

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

**CARACTERIZACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA MADERA DE *Pinus taeda* L. A
TURNO FINAL**

Rodríguez Derby

Romero Michael

Tutor: Dr. Arq. Benítez, Alejandro

Co-tutor: Lic. (M.Sc.) Berberian, Natalia

Tacuarembó, 28 de marzo de 2025

PÁGINA DE APROBACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORESTE – SEDE TACUAREMBÓ

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Trabajo Final de Ingeniería Forestal:

Título:

CARACTERIZACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA MADERA DE *Pinus taeda* A TURNO FINAL

Autor/es:

Rodríguez Fros, Derby Michael

Romero Vilches, Michael

Tutor:

Dr. Arq. Benítez García, Alejandro

Co-tutor:

Lic. (M.Sc.) Berberian Bakerdjian, Natalia Madelaine

Puntaje: _____

Tribunal:

Profesor..... (nombre y firma).

Profesor..... (nombre y firma).

Profesor..... (nombre y firma).

FECHA:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, debemos agradecer a nuestros tutor y cotutor Alejandro Benítez y Natalia Berberian por su aporte profesional y técnico durante todo el trabajo. A la empresa Arboreal, en especial a Agustín Sarries, Edison Dabán y Santiago Dogliotti por brindarnos la oportunidad y todos los recursos e información necesaria para realizar el trabajo. También a INIA, en especial a Fernando Resquin por prestarnos el instrumento Fakopp y brindarnos apoyo y seguimiento durante todo el trabajo.

A todos los docentes de la carrera, quienes nos brindaron su dedicación y las herramientas necesarias para desarrollar nuestros estudios. También a los funcionarios de la universidad. A nuestros compañeros y amigos que conocimos durante toda la carrera.

Por último y más importante, a nuestras familias; pilares fundamentales en el sostén de cada día durante todo este tiempo. Quienes nos brindaron su apoyo incondicional para continuar avanzando en las diferentes etapas de la carrera.

RESUMEN

La caracterización de la rigidez de la madera en árboles en pie es un aspecto clave para optimizar su aprovechamiento industrial, especialmente en plantaciones comerciales como las de *Pinus taeda* L. En este contexto, surge la necesidad de evaluar métodos no destructivos que permitan predecir propiedades mecánicas de la madera antes de la cosecha. El presente estudio se desarrolló en una plantación de *Pinus taeda* de 24 años, ubicada en las cercanías de Tacuarembó y gestionada por la empresa Arboreal, con el objetivo de evaluar la rigidez de la madera mediante mediciones acústicas en árboles en pie. Se utilizó un equipo sónico Fakopp® para determinar la velocidad de propagación de una onda acústica, a partir del tiempo de vuelo registrado. Las mediciones se realizaron en parcelas con distintas densidades a turno final. No se encontró evidencia estadística suficiente para afirmar que la densidad afecte la velocidad medida por el equipo. También se evaluó la posibilidad de establecer un ranking de árboles según la velocidad acústica, como parte de la caracterización. Además, se determinaron dos módulos de elasticidad en tablas comerciales obtenidas de los árboles muestreados: el dinámico, medido mediante una máquina de clasificación automática Viscan® (Microtec), y el estático, mediante métodos destructivos en una máquina de ensayos universales EasyQ, UTM-50. Las clases de velocidad acústica establecidas en árboles en pie resultaron significativamente diferentes. Los módulos de elasticidad dinámico (MOEd) y estático (MOEe) correspondientes a cada clase también presentaron diferencias, aunque no fueron estadísticamente significativas como para validar el método acústico como predictor confiable de la rigidez de la madera.

Palabras clave: Métodos no destructivos, velocidad acústica, propiedades mecánicas de la madera, módulo de elasticidad.

ABSTRACT

Characterizing wood stiffness in standing trees is essential to optimize their industrial use, especially in commercial plantations such as *Pinus taeda* L. In this context, there is a need to evaluate non-destructive methods to predict mechanical properties of wood prior to harvest. This study was conducted in a 24-year-old *Pinus taeda* plantation near the city of Tacuarembó, managed by the company Arboreal, with the objective of evaluating wood stiffness through acoustic measurements in standing trees. A Fakopp® sonic device was used to determine wave propagation velocity based on transit time. Measurements were taken in plots with different final rotation densities. No sufficient statistical evidence was found to confirm that density affected the measured velocities. A tree ranking based on acoustic velocity was also explored as part of the characterization. In addition, two modulus of elasticity values were determined on commercial boards from sampled trees: the dynamic modulus, measured using a Viscan® automatic grading machine (Microtec), and the static modulus, determined through destructive testing on a universal testing machine (EasyQ, UTM-50). The acoustic velocity classes established for standing trees showed statistically significant differences. Although the dynamic (MOEd) and static modulus (MOEe) values also differed across these classes, the differences were not statistically strong enough to validate the acoustic method as a reliable predictor of wood stiffness.

Keywords: Non-destructive methods, acoustic velocity, mechanical properties of wood, modulus of elasticity.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1.1. Objetivos | 15 |
| 1.1.1. Objetivo general | 15 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 15 |
| 1.2. Hipótesis | 15 |
| 1.3. Organización de la monografía | 15 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1. Forestación en Uruguay..... | 16 |
| 2.2. Características anatómicas de la madera del género <i>Pinus</i> | 18 |
| 2.3. Caracterización de la especie <i>Pinus taeda</i> L. | 20 |
| 2.4. Factores que afectan la rigidez de la madera | 20 |
| 2.4.1. Densidad de la madera | 20 |
| 2.4.2. Contenido de humedad de la madera | 21 |
| 2.4.3. Angulo microfibrilar | 21 |
| 2.4.4. Velocidad de crecimiento | 21 |
| 2.4.5. Defectos | 22 |
| 2.4.6. Madera juvenil y madera adulta..... | 22 |
| 2.5. Métodos no destructivos | 23 |
| 2.6. Módulo de elasticidad (MOE) | 24 |
| 2.7. Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp® | 25 |
| 2.8. Raleo | 25 |
| 2.8.1. Definición y objetivo de raleo..... | 25 |
| 2.8.2. Tipos de raleo | 25 |
| 2.9. Cosecha, transporte y clasificación de trozas | 26 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 27 |
| 3.1. Estrategia estadística | 27 |
| 3.2. Fase preparatoria del trabajo experimental..... | 28 |
| 3.2.1. Identificación y localización de las parcelas experimentales | 29 |
| 3.2.2. Cálculo de módulo de elasticidad a partir de tiempo de vuelo | 30 |
| 3.2.3. Calibración del equipo Fakopp | 31 |
| 3.2.4. Estandarización del procedimiento de medición | 31 |
| 3.3. Ensayo preliminar para el diseño del estudio final..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1. Evaluación de posiciones de medición | 32 |
| 3.3.2. Determinación del tamaño muestral..... | 33 |
| 3.4. Estudio final: Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp | 34 |
| 3.4.1. Efecto de la parcela en las mediciones..... | 34 |
| 3.4.2. Efecto de las clases de velocidad en las mediciones | 35 |
| 3.5. Estudio Final: Medición del módulo de elasticidad en tablas con diversas técnicas..... | 36 |
| 3.5.1. Previo a la medición del MOE: Procesamiento y acondicionamiento de tablas | 36 |
| 3.5.1.1. Cosecha, transporte y clasificación de las trozas..... | 36 |
| 3.5.1.2. Procesamiento mecánico y clasificación de trozas en el aserradero..... | 37 |
| 3.5.1.3. Secado de tablas | 39 |
| 3.5.1.4. Clasificación de tablas y armado de paquetes | 40 |
| 3.5.2. Medición del módulo de elasticidad en tablas..... | 41 |
| 3.5.2.1. Medición del módulo de elasticidad mediante técnica no destructiva (Viscan) .. | 42 |
| 3.5.2.2. Medición del módulo de elasticidad mediante ensayo destructivo (UTM-50, EasyQ)..... | 43 |
| 3.5.3. Efecto de las clases de velocidad (según Fakopp) sobre el MOE estático..... | 45 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 4.1. Resultados del ensayo preliminar..... | 47 |
| 4.1.1. Evaluación de posiciones de medición | 47 |
| 4.1.2. Determinación del tamaño muestral..... | 52 |
| 4.2. Resultados del estudio final: Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp... | 52 |
| 4.2.1. Efecto de la parcela en las mediciones con Fakopp | 53 |
| 4.2.2. Efecto de las clases de velocidad en las mediciones | 56 |
| 4.3. Resultados del estudio final: Medición del módulo de elasticidad en tablas con diversas técnicas | 59 |
| 4.3.1. Medición del módulo de elasticidad dinámico mediante equipo Viscan..... | 59 |
| 4.3.2. Medición del módulo de elasticidad estático mediante Ensayo Universal tipo EasyQ (UTM-50)..... | 62 |
| 4.4. Comparación de técnicas de medición del módulo de elasticidad y caracterización estructural de tablas | 64 |
| 4.4.1. Técnicas aplicadas en este trabajo | 64 |
| 4.4.2. Caracterización estructural de las tablas según módulo de elasticidad estático | 65 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 66 |
| 6. PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN | 67 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estructura de la pared celular de una traqueida | 19 |
| Figura 2. Ubicación geográfica del predio y georeferenciación de las parcelas | 29 |
| Figura 3. Calibración del equipo Fakopp en tablas secas de <i>Pinus taeda</i> L. | 31 |
| Figura 4. Ubicación de sensores para medición con Fakopp | 32 |
| Figura 5. Transporte de trozas identificadas por número y color según su parcela de origen | 37 |
| Figura 6. Diagrama de corte de optimización. Imagen proporcionada por Arboreal. | 38 |
| Figura 7. Tablas preparadas para el secado, diferenciadas por clases de velocidad según color. | 39 |
| Figura 8. Gráfico carga-deformación correspondiente al tramo elástico del ensayo | 43 |
| Figura 9. Esquema del dispositivo utilizado para medir el módulo de elasticidad en flexión | 45 |
| Figura 10. Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por posición. | 48 |
| Figura 11. Histograma y Q-Q plot de residuos del modelo de velocidad de vuelo, con posición como efecto fijo y árbol como aleatorio..... | 49 |
| Figura 12. Histograma de residuos del modelo mixto con transformaciones aplicadas a la velocidad de vuelo (Fakopp)..... | 51 |
| Figura 13. Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por parcela. | 53 |
| Figura 14. Histograma y Q-Q plot de residuos del modelo de velocidad de vuelo, con parcela como efecto fijo y árbol como aleatorio..... | 54 |
| Figura 15. Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por clases de velocidad. | 57 |
| Figura 16. Boxplot del MOEd (Viscan) por tipo de tabla (Fakopp) | 60 |
| Figura 17. Boxplot del MOEe (Ensayo Universal) por tipo de tabla (Fakopp). | 62 |
| Figura 18. Valores de MOE y especificaciones técnicas de la madera estructural como referencia comercial..... | 65 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I. Ubicación y características dasométricas de las parcelas muestreadas..... | 30 |
| Tabla II. Clasificación de trozas según la velocidad de la onda medida con el equipo Fakopp. | 35 |
| Tabla III. Identificación y detalle de paquetes de tablas según lote, dimensiones y estado..... | 39 |
| Tabla IV. Condiciones de secado y contenido de humedad final por espesor de tablas. | 40 |
| Tabla V. Características de los paquetes de tablas según espesor y color de marcación. | 41 |
| Tabla VI. Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (según Fakopp) por posición. Resultado de ANOVA. | 48 |
| Tabla VII. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo (Fakopp), con posición como efecto fijo y árbol como aleatorio..... | 50 |
| Tabla VIII. Medianas y rangos promedios de velocidad de vuelo por posición (Friedman). | 52 |
| Tabla IX. Parámetros para el cálculo del tamaño de muestra en el estudio final (Fakopp). | 52 |
| Tabla X. Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp) por parcela. Resultado de ANOVA..... | 54 |
| Tabla XI. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo, con parcela como efecto fijo y árbol como aleatorio. | 55 |
| Tabla XII. Medianas y rangos promedios de velocidad de vuelo por parcela (Friedman)..... | 55 |
| Tabla XIII. Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp) por clase de velocidad. Resultado de ANOVA. | 57 |
| Tabla XIV. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo (Fakopp), con clase de velocidad como efecto fijo. | 58 |
| Tabla XV. Medias ajustadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp), por clase de velocidad. Resultado de Welch-ANOVA y comparación Games-Howell..... | 59 |
| Tabla XVI. Medias ajustadas y error estándar (SE) del MOEd (Viscan) por tipo de tabla (Fakopp). Resultado de ANOVA..... | 60 |
| Tabla XVII. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de MOEd (Viscan), con tipo de tabla como efecto fijo. | 61 |
| Tabla XVIII. Medias ajustadas y errores estándar (SE) del Logaritmo del MOEd (Viscan) por tipo de tabla. Resultado de ANOVA. | 61 |
| Tabla XIX. Medias ajustadas y error estándar (SE) del MOEe (Ensayo Universal), por tipo de tabla (Fakopp). Resultado del ANOVA. | 63 |
| Tabla XX. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo del MOEe (Ensayo Universal), con tipo de tabla como efecto fijo. | 63 |
| Tabla XXI. Valores de MOE obtenidos por diferentes métodos y velocidad de onda según clase de velocidad. | 64 |

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la forestación en Uruguay ha experimentado un crecimiento constante, consolidándose como una actividad económica fundamental para el país. En particular, se ha destacado en la producción de materia prima para la industria forestal, lo que ha permitido generar importantes aportes a la economía nacional [1].

Según lo reportado por la Dirección General Forestal (DGF), en el año 2023 se cuantificaron 1.161.851 hectáreas totales forestadas, de las cuales se destacan 128.497 hectáreas de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*. Estas últimas presentaron un pico máximo de superficie en el año 2011, donde alcanzaron las 185.000 hectáreas y desde ahí la superficie forestada de estas coníferas ha venido disminuyendo. En lo que refiere a la distribución de la superficie forestada en el territorio, los departamentos con mayor área plantada son Rivera, Tacuarembó, Río Negro y Paysandú, seguidos por Cerro Largo, Durazno y Lavalleja [2].

En lo que refiere al comercio exterior las exportaciones del sector forestal han demostrado un crecimiento consolidado en los últimos años. En este sentido, en el año 2024 las exportaciones del sector forestal alcanzaron un desempeño destacado, impulsadas principalmente por el crecimiento de la celulosa, que se consolidó como el principal producto exportado del país, alcanzando un total de US\$ 3.007 millones (un incremento del 27% respecto al año anterior) [3]. En el año 2024, la madera aserrada representó el 44% de las exportaciones uruguayas de madera, alcanzando un total de US\$ 189 millones y superando las 300 mil toneladas. Las ventas de este producto aumentaron 10% en términos interanuales. Las proyecciones existentes para las regiones de Latinoamérica, Medio Oriente, Asia y Norteamérica indican un aumento en el uso de la madera como material de construcción a nivel global, con una tasa de crecimiento anual de 5% hasta 2027 [4].

No obstante, uno de los principales desafíos dentro de la gestión forestal es la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera, especialmente en lo que respecta a su rigidez, que influye de manera directa en la calidad de los productos finales obtenidos [5]. En este contexto, los métodos de medición no destructivos (MND) para la medición de las propiedades mecánicas de los árboles en pie han ganado una notable relevancia en los últimos años. Estas técnicas son valoradas principalmente porque permiten realizar evaluaciones sin afectar la integridad estructural de los árboles, lo que resulta clave para mantener la salud de los recursos forestales [6]. Una de las metodologías más empleadas consiste en medir el tiempo de vuelo de una onda acústica que atraviesa el tronco del árbol. Este tiempo de vuelo proporciona información sobre la

rigidez de la madera, lo que a su vez sirve como una estimación del módulo de elasticidad de los árboles [5]. Sin embargo, el proceso de medición puede verse afectado por diversos factores, tales como la variabilidad inherente entre los árboles o la densidad a turno final, lo que puede alterar los resultados a obtener [7]. Por ejemplo, el raleo de los árboles en la cantidad necesaria deja espacio en la tierra para que crezcan aquellos que van a seguir al menos 10 años más antes de su industrialización [8].

El *Pinus taeda* L. es una conífera que se ha mostrado adecuada para el desarrollo productivo de madera sólida, debido a su rápido crecimiento, lo que favorece la productividad, y a las cualidades de su madera, que la hacen apta para diversos procesos industriales [4].

En este estudio, se evaluó la viabilidad de clasificar grupos de árboles en función de la velocidad de propagación de la onda acústica, lo que permitió establecer un ranking de los ejemplares en términos de rigidez. Esta clasificación podría servir para relacionar la velocidad de la onda acústica obtenida con Fakopp con los módulos de elasticidad tanto estático como dinámico a nivel de tablas [9]. Además de caracterizar la rigidez de la madera a través de diferentes variables, se investigará la posible relación entre la densidad a turno final y las variables estudiadas, utilizando equipos especializados para la medición [10].

Con este enfoque, el estudio busca aportar información valiosa para mejorar la caracterización del recurso forestal en Uruguay, permitiendo una mejor predicción de las propiedades mecánicas de la madera, lo cual es esencial para optimizar los procesos productivos y la calidad del producto final [11].

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general caracterizar la rigidez de la madera de *Pinus taeda* L. mediante el empleo de diferentes metodologías de estimación del módulo de elasticidad.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Evaluar el desempeño del equipo Fakopp como instrumento predictivo de madera estructural en *Pinus taeda* L.
2. Analizar la influencia de la densidad de plantación a turno final en las mediciones realizadas con el equipo Fakopp.
3. Analizar el módulo de elasticidad dinámico y estático en tablas obtenido a través del Viscan y Ensayo Universal respectivamente para la caracterización de la rigidez de la madera de *Pinus taeda* L.

1.2. Hipótesis

1. Las densidades de plantación a turno final influyen significativamente en las lecturas de velocidad de onda obtenidas con el equipo Fakopp en árboles de *Pinus taeda* L.
2. El equipo Fakopp permite predecir de forma precisa el módulo de elasticidad de la madera de *Pinus taeda* L. en árboles en pie.

1.3. Organización de la monografía

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica, en la que se expone información relevante sobre los principales temas involucrados en este trabajo.

En la sección Materiales y métodos, se describen en detalle las pruebas y procedimientos realizados, incluyendo la metodología aplicada tanto en campo como en la industria, así como el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

La sección Resultados y discusión presenta los resultados correspondientes a cada prueba, acompañados de referencias a valores citados en trabajos similares. Asimismo, se incluyen discusiones en torno a los resultados obtenidos y a los análisis estadísticos aplicados.

Se decidió utilizar esta estructura de formato con el objetivo de facilitar la comprensión del desarrollo del trabajo, así como de los resultados y análisis correspondientes a cada prueba. El estudio finaliza con una Conclusión, donde se presenta un análisis general en función de los objetivos planteados.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Forestación en Uruguay

Uruguay se caracteriza por poseer una alta estabilidad política, democrática y social, con una gran solidez macroeconómica, lo que genera un ambiente propicio para el desarrollo de inversiones en el sector forestal, principalmente por empresas internacionales que buscan calidad, estabilidad y nuevas oportunidades [12].

En este marco surge la primera ley forestal Nro. 13723 de la década de los 70. Ésta tuvo como objetivo incentivar la forestación para promover el mercado interno, en una época que el país era mayormente agrícola ganadero [12]. Luego en 1987 con la aprobación de la segunda ley forestal Nro. 15939, a partir de la cual se observó un aumento significativo de hectáreas plantadas. Con esta segunda ley se realizaron importantes incentivos para la plantación de montes forestales a través de subsidios y exoneraciones impositivas en suelos definidos de prioridad forestal [13]. Gracias a estos incentivos, las plantaciones con fines industriales, tanto de *Pinus spp.* como de *Eucalyptus spp.*, aumentaron considerablemente, estas fueron utilizadas para producir pulpa de celulosa, madera sólida y energía [14]. Con la ley Nro. 16906 aprobada en 1998, también se promovieron las inversiones en el sector forestal, mediante la inversión directa a nivel nacional y extranjera [15]. Luego de esto la superficie forestada en el país continuó aumentando, lo que promovió el desarrollo de otras industrias dentro del sector. Las dos cadenas industriales principales que se originaron son: la transformación mecánica (aserrío y debobinado) y las plantas de producción de celulosa. También se exportaron chips y madera en rollo que también se destina a pulpa y aserrío en los países de destino [16].

La mayoría de las plantaciones forestales cuentan con certificación de la gestión forestal sostenible y cadena de custodia de sus productos. Esto permite una correcta trazabilidad de los productos desde su origen, promoviendo la sostenibilidad de los diferentes procesos involucrados [17].

En cuanto a la ubicación geográfica, Uruguay se encuentra en la misma latitud que los principales emprendimientos forestales en el hemisferio sur con los que comparte una zona climática (sur de

Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y zonas centrales de Chile y Argentina). Además de lo antes mencionado el país posee un marco jurídico estable, buena logística que aún está en proceso de mejora, así como la inexistencia de conflictos territoriales y un estable contexto político y sociocultural. Esto explica la elección de empresas extranjeras para invertir en Uruguay. Tales empresas, como UPM, Montes del Plata y LUMIN, están instaladas en el país desarrollando sus actividades e impulsando al sector debido a sus significativas demandas de personal profesional como de requisitos técnicos [16].

Según la sociedad de productores forestales en Uruguay se establecen tres zonas forestales bien marcadas, que corresponden a:

- Zona litoral oeste y centro: abarca los departamentos de Durazno, Paysandú, Río Negro y Soriano; tiene como principal destino materia prima para celulosa; y las especies plantadas en mayor medida son *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*.
- Zona noreste y sureste: en ella se encuentran los departamentos de Lavalleja, Maldonado, Cerro Largo y Treinta y Tres, tiene como destinos la celulosa y madera sólida; cuenta con todas las especies y las plantadas en mayor medida son *Eucalyptus grandis* en el norte y *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus smithii*, *P. elliotii* y *P. taeda* en el sur.
- Zona norte: aquí se ubican los departamentos de Rivera y Tacuarembó, su destino principal es la producción de madera sólida (aserrado-debobinado); en su gran mayoría la superficie de esta zona se encuentra plantada con *Pinus spp.* y las especies de *Eucalyptus spp* [18].

Según la dirección general forestal existen cerca de 80 aserraderos (incluyendo planta de debobinado), los cuales procesan una sola especie o grupo de especies, tanto *Pinus spp.*, como *Eucalyptus spp*. Estos se localizan en tres zonas del país: Tacuarembó-Rivera, Paysandú y zona Metropolitana. La primera zona es la que presenta mayor capacidad de producción y dinamismo. Las principales empresas que se ubican en esta zona con mayor producción son:

- Lumin: este proyecto ubicado en el departamento de Tacuarembó consume alrededor de 700.000 metros cúbicos de madera al año. De las cuales aproximadamente el 55% es de *Pinus spp.* y el restante de *Eucalyptus spp*. Producen tableros contrachapados que tienen diferentes categorías y "caras" tanto de *Pinus* como de *Eucalyptus*.

- Arboreal: este aserradero consume 570.000 metros cúbicos de trozas de *Pinus* al año. El aserradero está ubicado en el departamento de Tacuarembó. El objetivo de producción consiste en tablas secas de diferentes categorías que se exportan hacia China o Vietnam. En 2021, la empresa duplicó su capacidad e invirtió en una planta de fabricación de madera maciza. Es la primera planta de este tipo en el país y es una de las más grandes en la región. En 2023 alcanzó la certificación de madera estructural bajo las normas europeas.
- Urufor: este aserradero está ubicado en el departamento de Rivera y consume cerca de 400.000 metros cúbicos al año de *Eucalyptus grandis*. Producen tablas aserradas secas en horno y productos de madera laminada, utilizados en la industria del mueble y la construcción. Aproximadamente el 90% de su producción se destina al mercado internacional y el 10% se vende localmente.
- Dank: está ubicado en el departamento de Rivera y consume únicamente trozas de *Pinus* con un volumen aproximado de 265.000 metros cúbicos al año. Fue una de las empresas precursoras de la forestación en la zona. Produce madera para pallets, madera remanufacturada, madera de ingeniería y cuenta con capacidad de secado.
- Kluntex: se ubica en el departamento de Rivera y consume cerca de 84.000 metros cúbicos al año. Consume únicamente trozas de *Pinus* y produce tablas para mueblería y empaque.
- Valetor: ubicado en el departamento de Tacuarembó. Consume aproximadamente 50.000 metros cúbicos al año de trozas de *Pinus*.
- IMNSur: este aserradero se ubica en Rivera. Consume cerca de 40.000 metros cúbicos al año. Procesa fundamentalmente trozas de *Pinus* y *Eucalyptus*. Sus productos son exportados principalmente a México y Estados Unidos en forma de pallets y madera para pallets [19].

2.2. Características anatómicas de la madera del género *Pinus*

La madera del género *Pinus spp.* presenta a nivel anatómico una estructura homogénea y se compone por las siguientes estructuras: traqueidas axiales, parénquima axial, traqueidas radiales, radios parenquimáticos, células epiteliales, canales resiníferos y traqueidas en series axiales. Dentro de las mencionadas anteriormente las principales células que las componen son las

traqueidas. Estas células son alargadas con los extremos puntiagudos y cerrados; la función de estas es la conducción o soporte, dependiendo de si se trata del leño temprano o leño tardío. Las traqueidas ubicadas en el leño temprano son células que presentan la pared celular delgada, con el lumen grande presentando forma poligonal en corte transversal y su función es el transporte de sustancias. Por otro lado, las traqueidas del leño tardío tienen paredes celulares gruesas, lumen pequeño, tienen forma rectangular en un corte transversal. Su principal función es el sostén [20].

Los canales resiníferos en el género *Pinus spp.* están siempre presentes. En la madera se presentan como espacios intercelulares formados por un conjunto de células que secretan resina hacia su interior [21].

En la Figura 1 se visualiza la estructura de la pared celular de una traqueida, mostrando la lámina media (M), la pared primaria (P), las capas de la pared secundaria (S₁, S₂, S₃) y la capa verrugosa (W) [21].

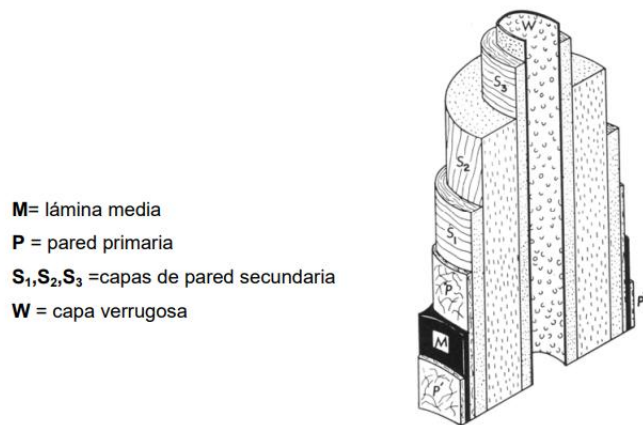


Figura 1. Estructura de la pared celular de una traqueida [21].

Dentro de la pared celular de la madera, la capa S₂ constituye la fracción de mayor espesor y resulta determinante en sus propiedades mecánicas. El reducido ángulo microfibrilar que presenta se asocia a un elevado módulo de elasticidad y a una menor compresibilidad, otorgándole una función estructural predominante. Por su parte, las capas S₁ y S₃, de menor proporción relativa, presentan ángulos microfibrilares más amplios, lo que conlleva una menor rigidez y propiedades mecánicas diferenciadas [22].

2.3. Caracterización de la especie *Pinus taeda* L.

El género *Pinus* pertenece al grupo de las gimnospermas, el cual se conforma por especies de árboles que presentan óvulos "desnudos", es decir no se desarrollan dentro de un ovario [23].

La especie *P. taeda* es originaria del sudeste de Estados Unidos, abarcando el este de Texas, centro de Florida hasta el sur de Nueva Jersey, siendo el clima cálido a húmedo, las temperaturas en el rango de 13 a 24 °C y precipitaciones de 1020 a 1500 mm por año. En cuanto a suelos, se desarrolla mejor sobre suelos profundos, de buen drenaje y con cierto nivel de acidez (pH de 4,5-5,5), aunque puede crecer en otros tipos de suelos [24].

En Uruguay, el *P. taeda* es la especie más plantada dentro del género. Esta madera es ampliamente conocida en los mercados internacionales por presentar buenas propiedades tecnológicas. En Uruguay el principal destino es la industria para la obtención de productos de madera sólida [25].

2.4. Factores que afectan la rigidez de la madera

2.4.1. Densidad de la madera

La densidad es un reflejo de la cantidad de materia leñosa por unidad de volumen. También se puede interpretar como el volumen de espacios vacíos existentes en una madera [26]. Se la puede considerar como densidad real o densidad aparente. Siendo la densidad real el peso del material leñoso sin tener en cuenta los espacios huecos incluidos los capilares. Por otro lado, la densidad aparente es la relación entre el peso y el volumen por unidad de medida sin descontar los espacios huecos [27].

En la práctica cuando se habla de madera se hace referencia a la densidad aparente. A su vez esta última puede tomarse como una medida de su calidad en cuanto a material estructural, debido a que su resistencia mecánica y otras propiedades físicas dependen del peso específico aparente. Esta densidad se suele emplear, ya que es imposible dejar de lado factores de gran importancia y decisivos en la apreciación de la calidad, como por ejemplo la cantidad y tipos de nudos, ángulo microfibrilar y contenido de humedad.

La densidad es una de las principales propiedades físicas de la madera, que además de ella dependen la mayoría de sus propiedades mecánicas. En general se puede hacer referencia a que maderas pesadas o más densas presentan mayor resistencia, son más elásticas y duras que las maderas livianas. Sin embargo, presentan mayores dificultades para trabajar y variación volumétrica [26].

2.4.2. Contenido de humedad de la madera

Además de las características anatómicas intrínsecas de la madera, existen factores internos y externos que afectan directamente su rigidez y resistencia mecánica. Entre las condiciones externas, el contenido de humedad desempeña un papel determinante: a medida que aumenta el contenido de agua en la madera, su resistencia mecánica disminuye de forma significativa, particularmente hasta alcanzar el punto de saturación de la fibra, alrededor del 30% de contenido de humedad. A partir de este umbral, las propiedades mecánicas tienden a mantenerse constantes, independientemente de incrementos adicionales de humedad [28].

2.4.3. Ángulo microfibrilar

Entre los factores internos, uno de los más influyentes es el ángulo microfibrilar, definido como la inclinación de las microfibrillas de celulosa en la capa S2 de la pared celular respecto al eje longitudinal del tronco. Este parámetro anatómico afecta directamente la rigidez, elasticidad y resistencia de la madera: a mayor ángulo microfibrilar, menor rigidez y resistencia, lo que ha sido observado en tratamientos de raleo intensivo donde el crecimiento acelerado de los árboles promueve valores más altos de ángulo microfibrilar, comprometiendo así la calidad estructural del material [28].

2.4.4. Velocidad de crecimiento

El *P. taeda* cultivado en regiones como Misiones (Argentina) ha sido objeto de programas de mejoramiento genético y prácticas silvícolas como el raleo intensivo, lo que ha permitido alcanzar altas tasas de crecimiento y un rápido incremento en volumen por unidad de superficie. Si bien este comportamiento es favorable desde una perspectiva productiva y económica, presenta consecuencias negativas sobre la calidad estructural de la madera, especialmente en lo que respecta a sus propiedades mecánicas. Diversos estudios han evidenciado que el crecimiento acelerado del árbol promueve la formación de madera juvenil en mayor proporción. Esta madera se caracteriza por un ángulo microfibrilar más alto, menor espesor de pared celular, menor densidad básica y longitud de traqueidas más cortas. El análisis de distintas intensidades de raleo mostró que los tratamientos más intensos (87,5%) resultaron en árboles con mayores diámetros, mayor proporción de copa viva y crecimientos radiales más rápidos, pero también en mayores ángulos microfibrilares y menor espesor de pared, factores que afectan negativamente las propiedades mecánicas [29].

2.4.5. Defectos

Además de las condiciones anatómicas y ambientales que influyen en la resistencia de la madera, la presencia de defectos estructurales constituye un factor crítico que incide negativamente en su comportamiento mecánico. Estos defectos pueden ser de origen natural como nudos, grietas, bolsas de resina, inclinación del grano o crecimiento no uniforme, o resultar del procesamiento y secado del material. En el caso de *P. taeda*, una especie de rápido crecimiento ampliamente utilizada en el sur de América, la alta tasa de crecimiento asociada a prácticas silvícolas intensivas, como el raleo severo, puede favorecer la aparición de madera juvenil con alta proporción de nudos y grano irregular, factores que deterioran sensiblemente la calidad estructural del material. Por ejemplo, la presencia de nudos disminuye la sección transversal efectiva y concentra tensiones, reduciendo la resistencia a la tracción y la flexión estática. Asimismo, las grietas longitudinales o las fisuras provocadas por tensiones internas durante el secado comprometen la capacidad de carga del elemento [30].

2.4.6. Madera juvenil y madera adulta

La madera juvenil se forma alrededor de la médula y se extiende por todo el fuste. Este tipo de madera presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas en relación con la madera adulta. En el caso de madera libre de defectos, las propiedades que influyen en la resistencia mecánica son el ángulo microfibrilar, longitud de fibra, densidad, porcentaje de leño tardío, espesor de pared celular y diámetro de lumen. Es acá que se puede observar la incidencia de la madera juvenil, la cual presenta un ángulo microfibrilar alto, lo que genera una contracción longitudinal 10 veces mayor en relación con la madera adulta [31].

La relación entre la resistencia de la madera juvenil y la madera adulta para el módulo de elasticidad varía entre 0.45 y 0.75 [32]. En el caso de maderas de alta calidad (alta resistencia) la relación madera juvenil /madera adulta es menor. En cambio, en el caso de madera con inferior calidad (baja resistencia) la relación madera juvenil/madera adulta es mayor [31].

Según estudios realizados en plantaciones de *P. taeda* en Uruguay (proyecto LATU-JICA), se determinó que la transición entre la madera juvenil y la adulta ocurre entre los anillos de crecimiento 8 y 12, lo que equivale a una distancia desde la médula de aproximadamente 11 a 16 cm. Esto significa que los anillos más internos (hasta el anillo 8 a 12) corresponden a madera juvenil, mientras que los más externos son considerados madera adulta [33].

La madera juvenil afecta negativamente las propiedades mecánicas de la madera en comparación con la madera adulta. Esta influencia desfavorable se debe a sus características anatómicas, físicas y químicas distintas:

- Presenta un ángulo microfibrilar alto, lo que provoca una mayor contracción longitudinal, llegando a ser hasta 10 veces superior a la de la madera adulta. Esto reduce la estabilidad dimensional.
- Tiene menor densidad básica, fibras más cortas, menor contenido de leño tardío y paredes celulares más delgadas.
- Se asocia frecuentemente con madera de compresión y grano espiralado, defectos estructurales que reducen la resistencia y aumentan la deformación [33].

2.5. Métodos no destructivos

Se entiende por método no destructivo toda prueba que permite caracterizar material y estructuras mediante un ensayo no invasivo sin alterar de manera permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material de estudio. Estos ensayos son empleados para localizar, medir y evaluar la composición de los materiales o en ciertos casos posibles defectos. Estas técnicas son basadas en la aplicación de fenómenos físicos, tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas, capilaridad, absorción, los que permiten estimar o evaluar una propiedad del material [34].

En base a la naturaleza de la técnica los métodos no destructivos se pueden clasificar en: Visuales, Nucleares, Mecánicos, Electromagnéticos y Acústicos. Los métodos visuales son los más empleados para la estimación de sus propiedades físicas y mecánicas. El nivel de precisión requerido depende de la habilidad y conocimiento de la persona que realiza el ensayo. Para poder definir la calidad estructural mediante un análisis visual se necesita realizar un estudio de esta, detectando sus irregularidades. Esta clasificación suele basarse en normas técnicas. Los métodos nucleares emplean radiación ionizante, tales como rayos X, rayos Gamma y resonancia magnética para evaluar el estado de los productos. Los métodos mecánicos son los que se basan en la aplicación de fuerzas al material y miden la deformación ocasionada por esta. Dentro de este método se incluye la clasificación mecánica, la resistencia a la perforación con penetrómetro, con resistógrafo o arranque de tornillo. La clasificación mecánica es empleada para evaluar la resistencia del material a partir del Módulo de Elasticidad por medio de un esfuerzo controlado de flexión y la medición de la deformación controlada. Los métodos electromecánicos se basan en la medición de corrientes eléctricas o campos magnéticos.

En cambio, los métodos acústicos miden el tiempo de propagación de una onda acústica a través de una distancia definida. Dentro de estos métodos existe una variedad de técnicas que dependen de la fuente del impulso, las características de la respuesta medida o de la forma de procesar la señal [34]. La precisión de los métodos acústicos para detectar defectos del material depende del tamaño de estas particularidades y de la longitud de la onda propagada. Esto condiciona a que el tamaño del defecto debe ser igual o mayor a la longitud de onda para poder ser detectado [35].

Dentro de los métodos acústicos, se encuentra el método de ultrasonido y el de ondas de impacto. Mientras que el primer método se caracteriza por utilizar ondas de mecánicas longitudinales con frecuencias superiores a los 20 KHz. En cambio, el método de ondas de impacto trabaja entre 0.5 y 20 KHz. En este método la onda se genera por un impacto y es recogida por un receptor que envía la señal a un ordenador. Las ondas sónicas permiten realizar estudios de mayor longitud gracias al empleo de frecuencias bajas. Sin embargo, estas bajas frecuencias generan señales menos claras, lo que afecta negativamente en la precisión de la medición. Un ejemplo de este método es el dispositivo “Microsecond Timer”, de la empresa Fakopp. El cual calcula el tiempo de propagación de una onda sónica entre dos puntos de distancia [34].

2.6. Módulo de elasticidad (MOE)

El MOE es la relación del esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud. La misma puede ser aplicada como una medida de flexibilidad o de rigidez de la madera. Esta propiedad como otras se encuentra afectada por la anisotropía de la madera. Cuanto más alto sea el valor del MOE, mayor será su rigidez [36].

El módulo de elasticidad se puede estimar de más de una forma. Una de ellas es a partir de los métodos no destructivos. Estos métodos permiten estimar propiedades mecánicas, o la aptitud para ciertos usos de la madera, sin destruirla. Los métodos no destructivos son variados. En pruebas sobre maderas se emplean por lo general los acústicos y los ultrasónicos [37].

Otra forma de estimar el MOE es a partir del Ensayo Universal. En esta prueba las muestras se someten a cargas crecientes hasta alcanzar un estado límite que puede provocar la rotura de la madera o bien su agotamiento, lo que se traduce posteriormente en la imposibilidad de usarla nuevamente. Estos ensayos dan resultados muy completos para las características de las propiedades mecánicas. También proporcionan el dato del módulo de rotura además del módulo de elasticidad [26].

2.7. Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp®

La medición de las propiedades mecánicas de la madera es fundamental para diversas aplicaciones en la industria forestal, especialmente en la selección de madera para la construcción y otros productos estructurales. Entre las propiedades más importantes se encuentran la resistencia a la flexión y la rigidez, las cuales están estrechamente relacionadas con el módulo de elasticidad (MOE) [38].

Las técnicas de medición no destructivas, como el sistema Fakopp, han avanzado significativamente en la evaluación de estos parámetros sin comprometer la integridad del material, este sistema funciona mediante la emisión de ondas acústicas que se transmiten a través de la madera, midiendo el tiempo que tarda la onda en recorrer la pieza. A partir de estos datos, y contemplando la densidad del material se puede calcular el módulo de elasticidad dinámico. Esto permite proporcionar una estimación rápida y confiable de la rigidez de la madera [39].

Además, la implementación de tecnologías como el Fakopp ha permitido optimizar procesos de selección y clasificación de madera, mejorando la calidad del producto final y reduciendo costos asociados a la clasificación manual y al descarte de piezas defectuosas [40].

2.8. Raleo

2.8.1. Definición y objetivo de raleo

El raleo es una intervención silvicultural o corta intermedia en la que se reduce el número de individuos por hectárea y tiene como objetivo estimular el crecimiento de volumen de madera de los árboles remanentes. Esto permite obtener productos de mayor diámetro y lograr un retorno anticipado del material, por medio de la comercialización de los productos obtenidos [41]. El control del espaciamiento entre los individuos influye directamente en la calidad de los rodales afectando el tamaño de los nudos, la proporción de madera juvenil y la densidad aparente de la madera [42]. Luego de esta intervención silvícola los individuos presentan un incremento en la tasa de crecimiento debido a la reducción de la competencia al aumento de la disponibilidad de luz, agua y nutrientes por el nuevo espaciamiento obtenido [43].

2.8.2. Tipos de raleo

Una plantación forestal puede ser raleada con distintos niveles de intensidad, los cuales van a depender del objetivo productivo para esa plantación. La cantidad de árboles a remover puede ser significativa o constituir una pequeña porción del rodal [44]. En base al aprovechamiento de los

árboles raleados, este manejo se puede clasificar en raleo Precomercial o raleo Comercial. La principal diferencia entre estos es que el raleo comercial tiene la posibilidad de generar ingresos con el material raleado, en cambio el raleo Precomercial solamente se encarga de controlar el espaciamiento de los árboles en el rodal sin generar recursos económicos con los árboles raleados. Dentro del raleo comercial se pueden diferenciar cinco manejos diferentes: raleo bajo, raleo de copa o por lo alto, raleo de dominantes, raleo mecánico y raleo libre [44].

2.9. Cosecha, transporte y clasificación de trozas

La cosecha, el transporte y la clasificación de trozas son etapas cruciales en la cadena de producción de madera, que influyen directamente en la calidad del producto. Cada una de estas fases involucra una serie de procesos técnicos y logísticos que deben ser optimizados para maximizar los beneficios económicos y reducir los impactos ambientales. La cosecha es la fase inicial de la explotación forestal, donde los árboles son talados y las trozas (troncos de madera de tamaño adecuado para ser procesados) son obtenidas. Este proceso debe llevarse a cabo de manera eficiente y sostenible, ya que el manejo inapropiado de la cosecha puede ocasionar la degradación del recurso forestal, afectar la biodiversidad y alterar el equilibrio de los ecosistemas [45].

El uso de tecnologías avanzadas en las máquinas de cosecha equipadas con cabezales de corte ha permitido mejorar la precisión y reducir el impacto ambiental durante la recolección de trozas. Estas tecnologías también facilitan la planificación y ejecución de las actividades de manera más eficiente, reduciendo costos y tiempos operativos [45].

Una vez cosechadas, las trozas deben ser transportadas desde el sitio de cosecha hasta los centros de procesamiento o las plantas de aserrío. El transporte es una fase crítica en la logística forestal, ya que implica tanto la manipulación de las trozas como la gestión de la infraestructura vial. El transporte puede realizarse por diferentes medios, como camiones, ferrocarriles o incluso por agua, dependiendo de la localización de la plantación forestal y la infraestructura disponible [46].

La clasificación de las trozas es el proceso mediante el cual se evalúa la calidad de la madera para determinar su valor comercial. Las trozas se clasifican generalmente en diferentes grados, lo que permite determinar su uso final. La clasificación puede ser manual o mediante sistemas automatizados que emplean tecnologías como el escaneo láser y la visión artificial, los cuales mejoran la precisión y velocidad del proceso [47].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de cumplir los objetivos planteados y poner a prueba las hipótesis del estudio, se diseñó una estrategia metodológica que combinó mediciones en árboles en pie y ensayos sobre madera aserrada. En esta sección se describen los materiales utilizados y los procedimientos aplicados para evaluar la rigidez de la madera de *P. taeda* L. mediante distintas metodologías.

Estas metodologías permitieron contrastar los resultados y profundizar en la caracterización de la rigidez de la madera. No obstante, antes de iniciar el estudio principal, se llevaron a cabo una serie de etapas preparatorias fundamentales para garantizar la calidad y representatividad de los datos. En primer lugar, se realizó la calibración del instrumento Fakopp. A continuación, se efectuó un relevamiento del rodal con el objetivo de identificar zonas con diferentes densidades de árboles por hectárea, lo que permitió definir parcelas homogéneas donde llevar a cabo las mediciones. Finalmente, se desarrolló un ensayo preliminar en 20 árboles, que permitió ajustar la técnica, sistematizar el procedimiento de medición en campo y determinar el número de árboles que debían seleccionarse en el estudio final.

Las siguientes secciones describen cada una de las etapas vinculadas con los objetivos específicos de este trabajo. Primero, se detalla el procedimiento de medición con el Fakopp en árboles en pie y el análisis de su posible uso como herramienta predictiva de madera estructural. Luego, se presenta la evaluación de la incidencia de la densidad de árboles a turno final sobre las mediciones obtenidas. Por último, se detalla el procedimiento utilizado para estimar el módulo de elasticidad dinámico a partir de tablas clasificadas con la máquina Viscan, así como el módulo de elasticidad estático obtenido mediante ensayos destructivos en una máquina universal. Estas metodologías permitieron contrastar los resultados y profundizar en la caracterización de la rigidez de la madera.

Los datos obtenidos se analizaron mediante técnicas estadísticas acordes a cada objetivo específico, las cuales se detallan en la siguiente subsección.

3.1. Estrategia estadística

Los datos generados a partir de estas metodologías fueron analizados mediante herramientas estadísticas apropiadas para cada tipo de información. Todos los análisis se realizaron en el software R [48], a través de la interfaz RStudio.

En los casos en que se ajustaron modelos, se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de los efectos fijos considerados. Cuando se presentó un diseño balanceado, se utilizaron sumas de cuadrados tipo I; en presencia de diseños desbalanceados, se optó por sumas

de cuadrados tipo III, las cuales permiten ajustar cada efecto considerando la presencia de los demás factores y manejar adecuadamente tamaños de muestra desiguales. Dado que las pruebas paramétricas (como ANOVA) ofrecen mayor potencia estadística y permiten una interpretación más directa de los efectos, se priorizó su uso siempre que los datos cumplieran con los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas requeridos.

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk [49] se evaluó la normalidad de los residuos, complementada con herramientas gráficas como histogramas y gráficos Q-Q. Para verificar homogeneidad de varianzas se utilizó la prueba de Levene [50]. En caso de que no se cumpliera la normalidad, se evaluaron transformaciones de la variable de respuesta. En los casos en que no se cumpliera el supuesto de homogeneidad de varianzas, se recurrió a la prueba de Welch (conocida también como Welch-ANOVA), una alternativa robusta al ANOVA clásico [51]. Si no se cumplía ninguno de los dos supuestos, se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman [52].

En aquellos casos en que se detectaron diferencias globales significativas entre grupos, se realizaron comparaciones múltiples mediante pruebas post-hoc, apropiadas al tipo de análisis utilizado. En particular, cuando se aplicó la prueba de Welch, se utilizó la prueba de Games-Howell, adecuada para comparar medias entre grupos con varianzas y tamaños muestrales desiguales [53]. Este enfoque permitió garantizar la validez estadística de las inferencias realizadas en cada etapa analítica.

3.2. Fase preparatoria del trabajo experimental

Antes de iniciar formalmente el estudio, se llevaron a cabo una serie de etapas clave destinadas a garantizar la validez y la reproducibilidad de los datos. Estas incluyeron la identificación y georreferenciación de parcelas experimentales con diferentes densidades de árboles, la calibración del equipo de medición utilizado (Fakopp) y la estandarización del procedimiento de medición en campo. Estas acciones permitieron establecer condiciones controladas y comparables para todas las observaciones posteriores. A continuación, se detallan las etapas desarrolladas en esta fase.

3.2.1. Identificación y localización de las parcelas experimentales

El estudio se llevó a cabo en un predio forestal denominado El Tala, ubicado en el departamento de Tacuarembó, Uruguay. Como se muestra en la Figura 2, se accede al predio desde la Ruta Nacional N.º 5, a la altura del kilómetro 408, tomando hacia el oeste un camino vecinal en el paraje “Bañado de Rocha”. Continuando por este camino hacia el norte, el predio se encuentra a 24 km de la ruta nacional. Las coordenadas geográficas generales del sitio son 31°26'51.64"S, 56°00'33.98"O.

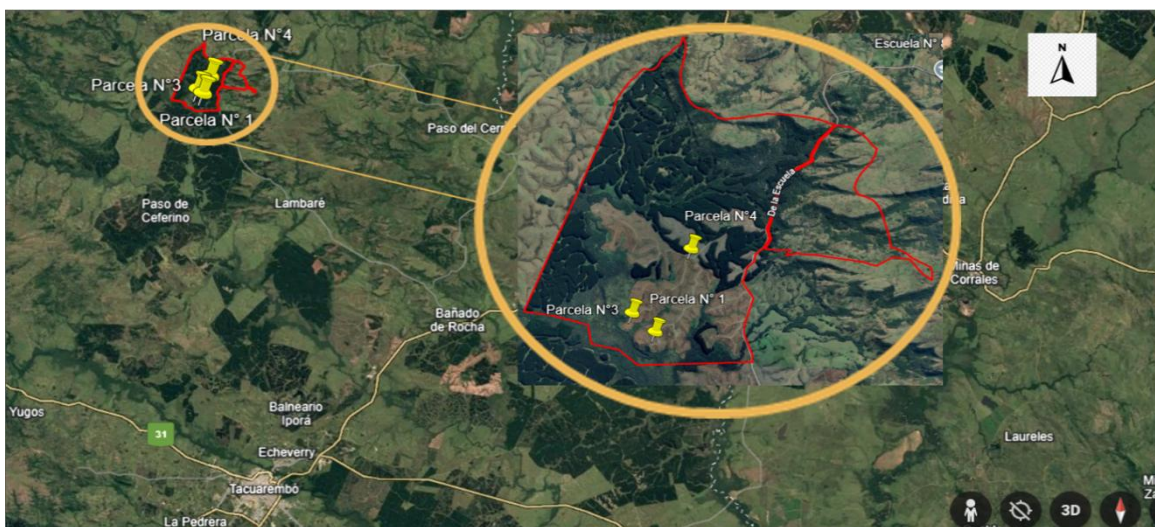


Figura 2. Ubicación Geográfica del predio y georeferenciación de las parcelas.

El predio pertenece actualmente a Forestal Oriental (UPM), fue plantado en el año 2000 y tenía 24 años al momento de la cosecha. Según el inventario, el área forestada total es de 1051 hectáreas, con una densidad promedio a turno final de 347 árboles por hectárea.

Con el fin de identificar zonas con diferentes densidades de plantación dentro del rodal, se recorrió toda el área forestada y se establecieron parcelas circulares de 26 metros de diámetro, equivalentes a 531 m². En cada parcela se contabilizó el número de árboles presentes, y mediante cálculo proporcional se estimó la densidad de árboles por hectárea. A partir de este relevamiento, se identificaron tres zonas con densidades claramente diferenciadas (numeradas 1, 3 y 4), las cuales se presentan en la Tabla I, junto con sus coordenadas geográficas y los diámetros promedio en punta fina de los árboles seleccionados.

Tabla I. *Ubicación y características dasométricas de las parcelas muestreadas.*

| Parcelas | Coordenadas geográficas | Densidad [Árboles/hectárea] | Diámetro en punta fina promedio [cm] |
|----------|------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 31°27'47.74"S, 56° 1'34.28"O | 433 | 34 |
| 3 | 31°27'38.41"S, 56° 1'46.52"O | 320 | 36 |
| 4 | 31°27'6.51"S, 56° 1'15.05"O | 170 | 43 |

Una vez definidas las zonas, se establecieron tres parcelas experimentales, una en cada densidad, y se seleccionó un mismo número de individuos representativos para cada una. Todos los árboles seleccionados fueron identificados y numerados para asegurar su trazabilidad a lo largo del estudio. Las trozas basales extraídas de estos árboles fueron los materiales utilizados en las distintas etapas de análisis. Todas las trozas presentaron un largo uniforme de 4,10 metros.

3.2.2. Cálculo de módulo de elasticidad a partir de tiempo de vuelo

El módulo de elasticidad dinámico se calculó a partir del tiempo de vuelo registrado con el equipo Fakopp [μ s], el cual se convirtió en Velocidad de propagación [m/s] y luego se utilizó en la siguiente fórmula:

$$MOEd = V^2 \times \rho \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo:

MOEd: Módulo de elasticidad dinámico [Pa]

V: Velocidad [m/s]

ρ : Densidad de la madera [Kg/m^3]

Para este estudio, se utilizó un valor de densidad (ρ) de 1000 kg/m^3 . Este valor corresponde al promedio anual utilizado por la empresa para trozas de *P. taeda* con menos de 72 horas desde la cosecha, y es similar al reportado por Meneses (2006) para *P. radiata* en Chile [54]. Suponer una densidad verde constante introduce un error estimado de aproximadamente 3 % en el cálculo del módulo de elasticidad (es decir, densidad \times velocidad acústica²) [55].

3.2.3. Calibración del equipo Fakopp

La calibración del equipo se realizó utilizando tablas secas de *P. taeda*, de sección 50×100×4000 mm, las cuales fueron colocadas sobre caballetes. A continuación, se insertaron los sensores (emisor y receptor) en los extremos de cada tabla. El sensor emisor fue golpeado con un martillo provisto por el fabricante, repitiendo la acción tantas veces hasta obtener valores de medición estables, con una variación menor a ± 10 [μs] entre repeticiones (Figura 3). Esta misma práctica fue replicada en campo, sobre los árboles en pie, antes de iniciar las mediciones de prueba.



Figura 3. Calibración del equipo Fakopp en tablas secas de *P. taeda*.

3.2.4. Estandarización del procedimiento de medición

Con el fin de sistematizar la toma de datos, se estableció un protocolo de medición en campo, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: a) profundidad de los sensores: estos fueron marcados a 2,5 cm desde el extremo, b) ángulo de inserción: se respetó el mismo ángulo tanto en el sensor emisor como el receptor (45°), c) distancia y alineación entre sensores: según normas de uso se deja 1 m de distancia entre los sensores, respetando la alineación en el eje vertical.

Para cumplir los parámetros mencionados, antes de iniciar las mediciones, se marcaron en cada uno de los árboles seleccionados, (tanto para el ensayo preliminar como para el estudio final) las alturas a las que se introducirían los sensores. Para ello, se pintaron dos anillos alrededor del fuste, a 0,5 m y 1,5 m de altura desde el nivel del suelo. Previo a cada medición, se limpió la corteza en las zonas marcadas con el objetivo de asegurar una correcta colocación de los sensores, tal como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Ubicación de sensores para medición con Fakopp.

3.3. Ensayo preliminar para el diseño del estudio final

Luego de la puesta a punto del protocolo experimental, y antes de la ejecución del estudio principal desarrollado en este trabajo, se realizó un ensayo preliminar con el objetivo de ajustar la metodología de medición, verificar el funcionamiento del instrumento Fakopp y definir el diseño experimental más adecuado para abordar los objetivos del trabajo. Para determinar si la posición de medición influía significativamente en los valores de velocidad registrados con el Fakopp se realizó una medición de prueba en 20 árboles. En cada árbol se seleccionaron tres posiciones para ubicar el aparato, y en cada una de ellas se realizaron cinco mediciones, lo que dio como resultado un total de 300 mediciones. Este ensayo inicial tuvo como objetivo, en primer lugar, evaluar si existían diferencias entre las velocidades obtenidas en las distintas posiciones de medición, con el fin de determinar si estas debían considerarse en el estudio final. En segundo lugar, se buscó estimar el tamaño de muestra mínimo que sería necesario para llevar a cabo los análisis propuestos en el estudio final presentado en este trabajo.

3.3.1. Evaluación de posiciones de medición

Para evaluar la significancia de las diferentes posiciones de medición en cada árbol, se empleó un enfoque combinado. En una primera etapa, se realizó un análisis descriptivo mediante el uso del gráfico denominado diagrama de caja (Boxplot), para explorar la distribución de las mediciones en las distintas posiciones. Este análisis permitió visualizar la dispersión de los datos, la presencia

de valores atípicos y posibles patrones en la variabilidad. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis inferencial a través del ajuste de un modelo, utilizando como variable dependiente la velocidad de onda medida con el equipo Fakopp.

Dado que se realizaron múltiples mediciones por árbol en distintas posiciones, se utilizó un modelo lineal mixto, adecuado para datos con medidas repetidas, donde las observaciones dentro de cada árbol no son independientes entre sí. En este modelo, el árbol se incluyó como efecto aleatorio, lo cual permite captar la variación entre individuos y controlar la dependencia de las mediciones dentro de una misma unidad experimental. Esta estructura evita subestimar la variabilidad residual y mejora la validez de las inferencias sobre los efectos evaluados. Por su parte, la posición de medición se incluyó como efecto fijo, ya que se evaluaron posiciones específicas con el objetivo de realizar inferencias puntuales sobre dichas ubicaciones. La inferencia estadística sobre los efectos se basó en un análisis de varianza, para lo cual se evaluó el cumplimiento de los supuestos correspondientes. En caso de que estos no se cumplieran, se aplicaron estrategias alternativas, las cuales se describen en detalle en la sección 3.1 y se implementan en la sección 4.1.1. El modelo de efectos mixtos utilizado para este análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + P_j + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.2})$$

$$i = 1, 2, \dots, 20 ; j = 1, 2, 3 ; k = 1, 2, 3, 4, 5$$

Siendo:

Y_{ijk} : tiempo de vuelo según Fakopp en el árbol i , posición j y repetición k

μ : media general

A_i : efecto aleatorio del árbol i , con $A_i \sim N(0, \sigma_A^2)$

P_j : efecto relativo de la posición j en el árbol

ε_{ij} : error asociado a la observación Y_{ijk} , tal que $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

3.3.2. Determinación del tamaño muestral

En función de los resultados obtenidos en la etapa previa (evaluación de posiciones), y con el objetivo de establecer una base sólida para el diseño del estudio final, se procedió a estimar el tamaño mínimo de muestra requerido. Para ello, se utilizó la fórmula propuesta por Cohen [56], la cual considera la variabilidad observada en los datos preliminares, la magnitud del efecto que se desea detectar, así como los niveles establecidos de significancia y potencia estadística.

$$n = \frac{(2)(\sigma^2)(z_{(\alpha/2)} + z_{(1-\beta)})^2}{\Delta^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo:

n : Tamaño de muestra por grupo

σ^2 : Varianza poblacional estimada

$z_{(\alpha/2)}$: Valor crítico para el nivel de significancia típico (α)

$z_{(1-\beta)}$: Valor crítico para la potencia estadística deseada

Δ : Diferencia mínima detectable entre las medias

3.4. Estudio final: Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp

Los resultados de las secciones 3.3.1 y 3.3.2, correspondientes al ensayo preliminar, y que se presentan y discuten en detalle en la sección de resultados y discusión, permitieron definir dos elementos clave para el diseño del estudio final. En primer lugar, se determinó que no existían diferencias significativas entre las distintas posiciones de medición evaluadas en los árboles, por lo que se optó por realizar una única medición por árbol, en una posición previamente estandarizada. En segundo lugar, a partir de la variabilidad observada en los datos, se estimó el tamaño mínimo de muestra necesario para detectar diferencias entre parcelas, estableciéndose en 23 árboles por parcela. Estas decisiones metodológicas, fundamentadas en los resultados preliminares, fueron aplicadas en la implementación del estudio principal.

3.4.1. Efecto de la parcela en las mediciones

Para evaluar la significancia de las diferentes parcelas se empleó un enfoque combinado. En una primera instancia, se utilizaron diagramas de caja (Boxplot) para explorar la distribución de las mediciones en las distintas parcelas. Posteriormente, dado que la distribución de datos entre parcelas era balanceada, se ajustó un modelo mixto con parcela como efecto fijo, para contrastar estadísticamente las velocidades medidas con el equipo Fakopp entre unidades experimentales, y árbol como aleatorio, ya que se contaba con cinco mediciones por árbol. La evaluación de los efectos se basó en una prueba de significancia (ANOVA), para la cual se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. En caso de que estos no se cumplieran, se aplicaron estrategias alternativas (detalladas en sección 3.1 e implementadas en sección 4.2.1). El modelo de efectos mixtos utilizado para este análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + P_j + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$i = 1, 2, \dots, 23 ; j = 1, 2, 3 ; k = 1, 2, 3, 4, 5$$

Siendo:

Y_{ijk} : tiempo de vuelo según Fakopp en el árbol i , parcela j y repetición k

μ : media general

A_i : efecto aleatorio del árbol i , con $A_i \sim N(0, \sigma_A^2)$

P_j : efecto relativo de la parcela j

ε_{ij} : error asociado a la observación Y_{ijk} , tal que $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

3.4.2. Efecto de las clases de velocidad en las mediciones

A partir de los datos obtenidos con el equipo Fakopp en la etapa previa, se calculó la velocidad media de propagación de la onda para cada árbol. Con base en estos resultados, se establecieron tres clases de árboles: alta, media y baja. El número de clases se definió en función del sistema de categorización que la empresa Arboreal proyectaba aplicar, en caso de comprobarse que el equipo Fakopp podía utilizarse como herramienta predictiva de la rigidez de la madera en árboles en pie. Para asegurar la trazabilidad del material durante el procesamiento en aserradero, los árboles se marcaron con pintura de distintos colores en ambas caras, según la clase de velocidad a la que pertenecían. En Tabla II se resumen los rangos de velocidad definidos para cada clase, la cantidad de trozas correspondientes y el color asignado para su identificación tanto en campo como en las etapas posteriores.

Tabla II. *Clasificación de trozas según la velocidad de la onda medida con el equipo Fakopp.*

| Grupos | Clases | Velocidad [m/s] | Cantidad de trozas | Color de identificación |
|--------|--------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| I | Alta | $x > 600$ | 15 | Verde |
| II | Media | $300 < x < 600$ | 26 | Rojo |
| III | Baja | $x < 300$ | 28 | Blanco y negro |

De manera similar a lo realizado en la etapa previa, se comenzó con un análisis descriptivo mediante diagramas de caja (Boxplot). A continuación, se ajustó un modelo lineal considerando como efecto fijo las clases de velocidad definidas previamente (Tabla II). Dado el desbalance en los tamaños muestrales entre grupos, se realizó un ANOVA con sumas de cuadrados tipo III. La inferencia estadística se basó en este análisis, previa evaluación del cumplimiento de los supuestos correspondientes. En caso de que estos no se cumplieran, se aplicaron estrategias alternativas

(detalladas en sección 3.1 e implementadas en sección 4.2.2). El modelo utilizado en este caso fue:

$$Y_{ij} = \mu + C_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo:

Y_{ij} : tiempo de vuelo (según Fakopp) en la clase de velocidad i , troza proveniente del árbol j

μ : media general

C_i : efecto relativo de la i -ésima clase de velocidad, con $i = 1, 2, 3$

ε_{ij} : error asociado a la observación Y_{ij} , tal que $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

Los tamaños de muestra por clase fueron: 15, 26 y 28 observaciones para las clases I (alta), II (media) y III (baja), respectivamente, lo que refleja la naturaleza desbalanceada del diseño.

3.5. Estudio Final: Medición del módulo de elasticidad en tablas con diversas técnicas

En esta sección se describen las metodologías utilizadas para evaluar el módulo de elasticidad (MOE) de las tablas obtenidas a partir del procesamiento de las trozas. Se aplicaron técnicas tanto no destructivas como destructivas, con el objetivo de caracterizar la rigidez del material en su estado final. Las mediciones se realizaron utilizando el equipo Viscan, que estima el MOE dinámico a partir de propiedades vibratorias, y un ensayo universal tipo EasyQ (UTM-50), que permite calcular el MOE estático mediante ensayo a flexión. Ambas aproximaciones proporcionan información complementaria sobre el comportamiento mecánico de la madera.

3.5.1. Previo a la medición del MOE: Procesamiento y acondicionamiento de tablas

Se detallan las etapas necesarias para la obtención de las tablas a partir de los árboles cosechados. El proceso incluyó la extracción y clasificación inicial de las trozas, su procesamiento mecánico en el aserradero, el secado controlado de las tablas, y su posterior clasificación y empaquetado. Estas etapas fueron claves para asegurar condiciones homogéneas en las muestras destinadas a la evaluación de propiedades mecánicas.

3.5.1.1. Cosecha, transporte y clasificación de las trozas

Se procedió a la cosecha de los árboles seleccionados, comenzando por la parcela 1 y repitiendo el procedimiento en forma independiente para las parcelas restantes. Las trozas fueron transportadas, donde se descargaron, organizaron en la cancha de acopio y clasificaron para su posterior procesamiento. Para este estudio se utilizaron exclusivamente las trozas basales de cada árbol, las cuales fueron identificadas antes de su carga y traslado (Figura 5).



Figura 5. *Transporte de trozas identificadas por número y color según su parcela de origen.*

Una vez recibidas en el aserradero la totalidad de las trozas, se realizó una nueva marcación de trozas tomando como referencia las tres clases de velocidad previamente definidas, incluyendo sus colores de identificación (ver Tabla II en Sección 3.4.2).

3.5.1.2. Procesamiento mecánico y clasificación de trozas en el aserradero

Una vez clasificadas las trozas en los tres grupos definidos previamente, se trasladaron al aserradero automático HewSaw modelo R250 A1.2, equipado con un reductor y descortezadora de trozas. En una primera etapa, las trozas son posicionadas mediante un escáner que optimiza su ubicación para maximizar la eficiencia del corte. El procesamiento comienza con el escuadrado de la troza mediante cuatro chipper canter, obteniendo así lo que se conoce como baza. Luego la baza pasa por una canteadora, momento en el cual se obtienen las primeras tablas y finalmente por dos juegos de sierras múltiples: uno en posición horizontal y otro en posición vertical.

Tal como se observa en la (Figura 6), es el diagrama de corte utilizado por el aserradero Hew Saw en Arboreal, para la optimización del aserrado en las trozas con mayor diámetro. A partir de las 69 trozas procesadas se obtuvo una variedad de espesores de tablas. De manera general, el sistema de corte permitió obtener 2 tablas de 38×200×4100 mm del centro de la baza, 4 a 5 tablas de

50×200×4100 mm de los laterales y de los cantos 1 a 2 tablas de 32×200×4100 mm o 25×200×4100 mm de los cantos.

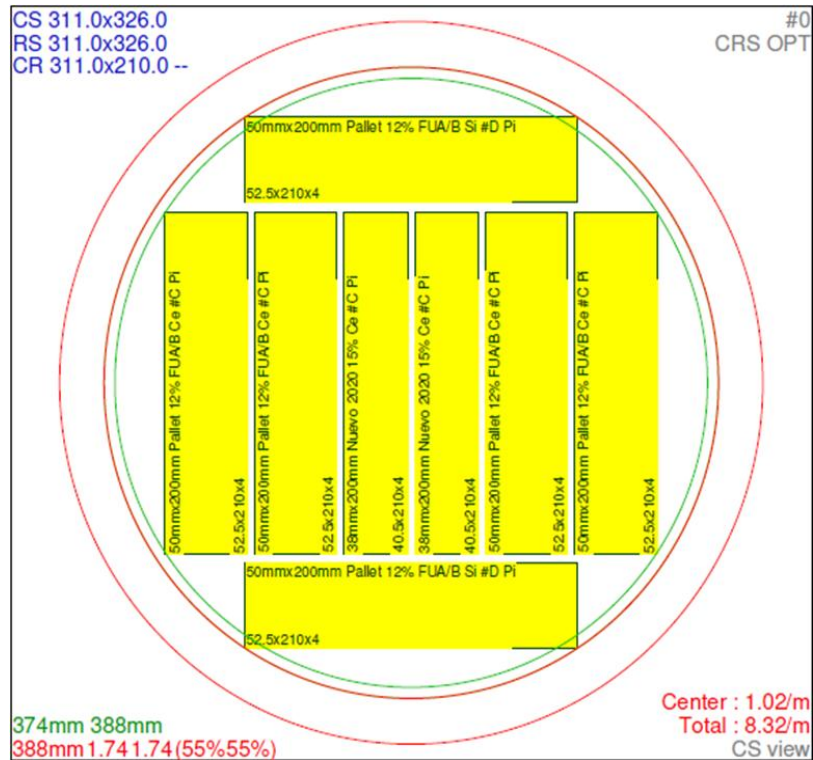


Figura 6. Diagrama de corte de optimización. Imagen proporcionada por Arboreal.

El aserradero cuenta con cuatro bandejas que almacenan las tablas procesadas, utilizando un escáner para clasificarlas automáticamente por espesor. Esto permite que las tablas sean agrupadas en paquetes con dimensiones homogéneas, lo que favorece la eficiencia y uniformidad del proceso de secado posterior.

A continuación, se procedió al empaquetado de las tablas, agrupándolas según su espesor (Figura 7). En los casos en que no se alcanzó la cantidad de tablas necesarias para completar un paquete, se formaron paquetes incompletos, manteniendo igualmente un único espesor por unidad.

La Tabla III resume la información correspondiente a cada uno de los paquetes obtenidos a partir del proceso de aserrado. En total, se generaron 7 paquetes, compuestos por 428 tablas, que fueron enviados a las cámaras de secado.



Figura 7. Tablas preparadas para el secado, diferenciadas por clases de velocidad según color.

Tabla III. Identificación y detalle de paquetes de tablas según lote, dimensiones y estado.

| Número de paquete | ID Lote | Dimensiones [mm] | Cantidad de tablas | Estado |
|-------------------|----------|------------------|--------------------|------------|
| 1 | LV210440 | 50 × 200 × 4000 | 90 | completo |
| 2 | LV210441 | 50 × 200 × 4000 | 90 | completo |
| 3 | LV210442 | 50 × 200 × 4000 | 47 | incompleto |
| 4 | LV210443 | 38 × 200 × 4000 | 95 | completo |
| 5 | LV210444 | 38 × 200 × 4000 | 41 | incompleto |
| 6 | LV210445 | 32 × 200 × 4000 | 40 | incompleto |
| 7 | LV210446 | 25 × 200 × 4000 | 25 | incompleto |

3.5.1.3. Secado de tablas

El proceso de secado comenzó con el ingreso de los distintos paquetes de tablas a las cámaras correspondientes. La duración del ciclo de secado y la temperatura del vapor aplicado dependieron del espesor de las tablas, siendo estas variables clave para lograr un secado eficiente y homogéneo.

El objetivo fue alcanzar un contenido de humedad final promedio menor o igual al 12 %, valor requerido por las normas técnicas para la realización de ensayos de módulo de elasticidad en flexión paralela a la fibra [57].

En Tabla IV se presentan los datos registrados para cada espesor, incluyendo la duración total del ciclo, la temperatura máxima alcanzada durante el proceso [°C] y el contenido de humedad final promedio [%] de las tablas.

Tabla IV. *Condiciones de secado y contenido de humedad final por espesor de tablas.*

| Espesores [mm] | Ciclo [horas] | Temperatura máxima [°C] | Contenido de humedad final [%] |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|---|
| 25 × 200 × 4000 | 56:6 | 84 | 11.7 |
| 32 × 200 × 4000 | 59.5 | 92 | 9.5 |
| 38 × 200 × 4000 | 65.6 | 95 | 30.7 |
| 50 × 200 × 4000 | 72.6 | 95 | 9.9 |

3.5.1.4. Clasificación de tablas y armado de paquetes

Una vez finalizado el proceso de secado, se procedió a desarmar los paquetes y a clasificar las tablas según dos variables: el color de marcación de las trozas (rojo, verde y blanco/negro) y los diferentes espesores obtenidos (Tabla V). Con base en estas dos variables, se conformaron un total de 12 paquetes diferenciados, que serán utilizados en las etapas posteriores para la evaluación del módulo de elasticidad.

Tabla V. Características de los paquetes de tablas según espesor y color de marcación.

| Identificación de paquete | Dimensiones [mm] | Color de tablas | Clase de velocidad (Fakopp) | Cantidad de tablas |
|---------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| A | 50 × 200 | Verde | Alta | 86 |
| B | 50 × 200 | Rojo | Media | 44 |
| C | 50 × 200 | Blanco y negro | Baja | 95 |
| D | 38 × 200 | Verde | Alta | 62 |
| E | 38 × 200 | Rojo | Media | 28 |
| F | 38 × 200 | Blanco y negro | Baja | 48 |
| G | 32 × 200 | Verde | Alta | 12 |
| H | 32 × 200 | Rojo | Media | 7 |
| I | 32 × 200 | Blanco y negro | Baja | 21 |
| J | 25 × 200 | Verde | Alta | 11 |
| K | 25 × 200 | Rojo | Media | 3 |
| L | 25 × 200 | Blanco y negro | Baja | 12 |

Para este trabajo se utilizó únicamente la información de las tablas 50 × 200 mm. Se optó por trabajar con tablas de una sección para evitar que los diferentes espesores influyeran en los resultados del MOE obtenidos mediante ambos métodos. Asimismo, se consideró el diagrama de corte del aserradero, evaluando las zonas de la troza de donde se extrajo las tablas. En particular, las piezas de 50 × 200 mm fueron cortadas íntegramente de los laterales de las trozas, asegurando que ninguna proviniera de madera cercana a la médula.

3.5.2. Medición del módulo de elasticidad en tablas

Una vez finalizado el procesamiento y la clasificación del material, se procedió a medir el módulo de elasticidad utilizando dos metodologías complementarias: una técnica no destructiva (Viscan) y otra destructiva (ensayo universal). A continuación, se describen los procedimientos aplicados y las consideraciones metodológicas asociadas.

3.5.2.1. Medición del módulo de elasticidad mediante técnica no destructiva (Viscan)

El Viscan es un clasificador de resistencia que utiliza un escáner óptico con interferómetro láser para medir la interferencia causada por la vibración inducida en la tabla al ser golpeada, usando un láser de referencia. De esta manera, determina el módulo de elasticidad dinámico de las tablas [10].

En Arboreal, esta clasificadora mecánica, utilizada en tablas secas de *P. taeda*, se rige bajo la norma española UNE-EN 14081-1+A1, que establece los procedimientos estandarizados para la clasificación de madera estructural con sección transversal rectangular, clasificada por su resistencia [58].

Para la realización de esta prueba se utilizaron todas las tablas de espesor 50×200 mm obtenidas tras la finalización del proceso de secado. En total, se analizaron 225 tablas, distribuidas en tres clases de velocidad: 86 identificadas con I (alta), 44 con II (media) y 95 con III (baja).

Para evaluar el módulo de elasticidad dinámico obtenido con la clasificadora Viscan, se realizó inicialmente un análisis descriptivo mediante diagramas de caja (Boxplot). Posteriormente, se ajustó un modelo lineal considerando como efecto fijo las tablas, provenientes de diferentes clases de velocidad definidas previamente (ver Tabla II en sección 3.4.2). Dado el desbalance de los tamaños muestrales entre grupos, en este caso en particular se utilizó un ANOVA con sumas de cuadrados tipo III, que permiten ajustar adecuadamente los efectos fijos en diseños con tamaños desiguales, teniendo en cuenta la presencia simultánea de otros factores en el modelo. La inferencia estadística se basó en este análisis, para lo cual se evaluó el cumplimiento de los supuestos correspondientes. En caso de que estos no se cumplieran, se aplicaron estrategias alternativas (detalladas en sección 3.1 e implementadas en sección 4.3.1). El modelo utilizado en este caso fue:

$$Y_{ij} = \mu + C_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo:

Y_{ij} : MOEd, según clasificadora Viscan, en la clase de velocidad i , tabla j

μ : media general

C_i : efecto relativo de la i -ésima clase de velocidad, según equipo Fakopp, $i = \text{I, II, III}$

ε_{ij} : error asociado a la observación Y_{ij} , tal que $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

3.5.2.2. Medición del módulo de elasticidad mediante ensayo destructivo (UTM-50, EasyQ)

La medición del módulo de elasticidad (MOE) mediante ensayo destructivo se realizó utilizando una máquina de ensayo universal (UTM-50, sistema EasyQ), aplicando carga en flexión sobre las tablas completas, empleadas como probetas de ensayo. Previo a la prueba, se acondicionaron las tablas con dimensiones de $50 \times 200 \times 4100$ mm, registrándose su contenido de humedad, densidad y medidas geométricas. De la totalidad de tablas de este espesor se seleccionaron 50 tablas correspondientes a cada clase de velocidad (ver Tabla II en sección 3.4.2), salvo la clase II (media), en la cual únicamente se obtuvieron un total de 44 tablas de este espesor. En resumen, para esta prueba se utilizaron 50, 44 y 50 tablas pertenecientes a las clases I, II y III respectivamente.

El módulo de elasticidad (MOE) se estimó a partir de la deformación de las probetas frente a la carga aplicada, observándose una alta correlación entre ambas variables (coeficiente de correlación = 0,99). La Figura 8 muestra el gráfico carga-deformación correspondiente al tramo elástico del ensayo. Se representa la relación entre la deformación (w) y la carga aplicada (F), utilizada para el cálculo del módulo de elasticidad, conforme a lo establecido en la norma [59].

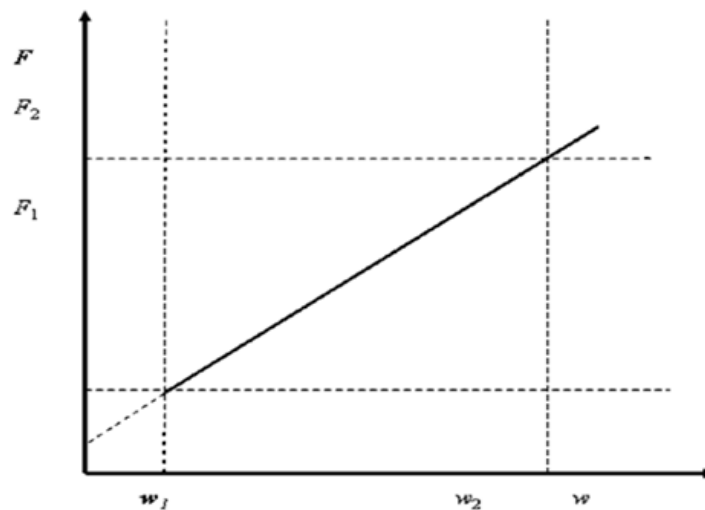


Figura 8. Gráfico carga-deformación correspondiente al tramo elástico del ensayo [57].

En las siguientes secciones se detallan el acondicionamiento del material y la definición de las probetas, el procedimiento de medición del MOE en flexión, y el análisis estadístico del efecto de las clases de velocidad determinadas mediante el dispositivo Fakopp sobre los valores obtenidos.

3.5.2.2.1. Acondicionamiento y determinación de las probetas

Las probetas fueron medidas con una precisión del 1 %. Antes de la medición del MOE, se acondicionaron siguiendo lo especificado en el capítulo 8 de la norma UNE-EN 408, la cual establece que una probeta está acondicionada cuando su masa alcanza un valor constante, es decir, cuando la variación de masa no supera el 0,1 % en un intervalo de 6 horas. [59]

Previo a los análisis, se determinó el contenido de humedad de las probetas según la norma EN 13183, utilizando un xilohigrómetro Gann para registrar el contenido de humedad lo más cercano posible a las zonas donde se producirán las deformaciones [60]. También se determinó la densidad de las probetas mediante la medición de masa y volumen de cada tabla a ensayar.

Las dimensiones de las probetas fueron de $50 \times 200 \times 4100$ mm, cumpliendo con la exigencia de la norma UNE: EN 408, que establece que la longitud debe ser como mínimo 19 veces la altura de la sección [59].

Para el cálculo del MOE se utilizó la siguiente fórmula:

$$E(m, l) = \alpha l^2 (F2 - F1) / 16I (W2 - W1) \quad (\text{Ec. 7})$$

Siendo:

$E(m, l)$: Módulo de elasticidad local en flexión [N/mm^2]

α : Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo

l^2 : Longitud base de medida

l : Longitud libre de la probeta entre las mordazas [mm]

$F2 - F1$: Incremento de la carga en la recta de regresión con correlación $\geq 0,99$ [Newton]

$W2 - W1$: Incremento de deformación correspondiente a $F2 - F1$ [mm]

I : Momento de inercia en mm^4

3.5.1.2.2. Medición del módulo de elasticidad local en flexión

Las probetas fueron cargadas sobre dos puntos simétricos con una luz entre 17-19 veces la altura de la sección (3600 mm). En Figura 9 se indican las dimensiones del montaje en relación con las especificaciones de la norma UNE-EN 14358 para ensayos de flexión en piezas de madera estructural [61].

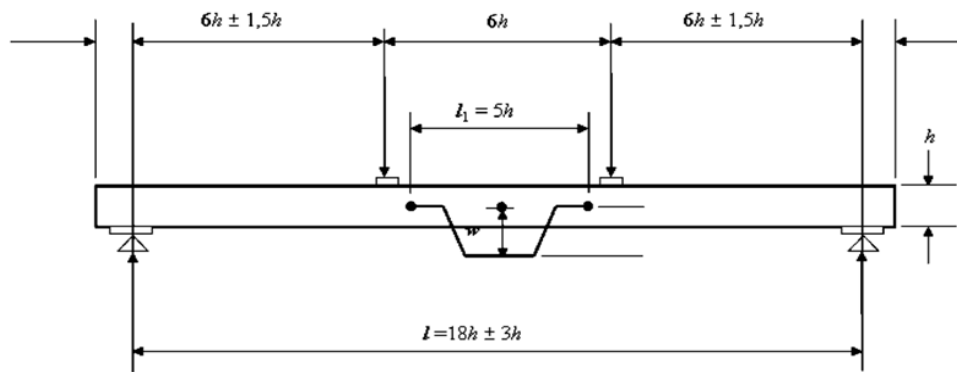


Figura 9. Esquema del dispositivo utilizado para medir el módulo de elasticidad en flexión [61].

Según lo establecido por la norma UNE-EN 14358, la carga fue aplicada con una velocidad constante inferior a 0,6 mm/s, lo que equivale a 0,003 veces la dimensión mayor de la sección transversal. Además, la carga no superó el 40 % de la carga máxima estimada, expresada en Newton: 9249 N para los grupos A y B, y 11143 N para el grupo C. Estos valores fueron determinados a partir de ensayos previos realizados sobre 10 tablas representativas de cada grupo [61].

3.5.3. Efecto de las clases de velocidad (según Fakopp) sobre el MOE estático

Para este análisis se empleó una metodología similar a la utilizada para el módulo de elasticidad dinámico obtenido con Viscan. Se ajustó un modelo lineal para el módulo de elasticidad estático determinado en laboratorio mediante el Ensayo Universal con método destructivo tipo EasyQ. UTM-50. Se definió un modelo que consideró como factor explicativo a la clase de velocidad, previamente establecida con la medición con el equipo Fakopp (Tabla II en sección 3.4.2). Si bien no es mucho, existe desbalance entre los grupos, por lo que al igual que en el caso de la medición del módulo de elasticidad dinámico, en el ANOVA se trabajó con sumas de cuadrados tipo III. La inferencia estadística se basó en este análisis, para lo cual se evaluó el cumplimiento de los supuestos correspondientes. En caso de que estos no se cumplieran, se aplicaron estrategias alternativas (detalladas en sección 3.1 e implementadas en sección 4.3.2).

El modelo utilizado en este caso fue:

$$Y_{ij} = \mu + C_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo:

Y_{ij} : MOEe, según Ensayo Universal, en la clase de velocidad i , tabla j

μ : media general

C_i : efecto relativo de clase de velocidad i , según equipo Fakopp, $i = \text{I, II, III}$

ε_{ij} : error asociado a la observación Y_{ij} , tal que $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

Los tamaños de muestra por clase fueron: 50, 44 y 50 observaciones para las clases I, II y III, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del ensayo preliminar

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo preliminar, cuyo objetivo fue evaluar dos aspectos clave para el diseño del estudio final. En primer lugar, se analizó si la posición de medición influía significativamente en los valores de velocidad registrados con el equipo Fakopp. En segundo lugar, se estimó el tamaño mínimo de muestra necesario para detectar diferencias entre parcelas con un nivel adecuado de potencia estadística. Los hallazgos de esta etapa permitieron establecer criterios metodológicos que fueron aplicados en el desarrollo del estudio final.

4.1.1. Evaluación de posiciones de medición

Para evaluar el efecto de la posición de medición sobre las velocidades registradas con el equipo Fakopp, se aplicó un enfoque combinado, que incluyó análisis descriptivo y analítico. Inicialmente se exploró la distribución de los datos mediante el uso de un diagrama de caja (Boxplot), que facilita la visualización de los registros por posición, y deja en evidencia claramente la distribución de los datos (Figura 10). El gráfico muestra la distribución de la velocidad de vuelo (m/s) en tres posiciones. Las tres cajas presentan medianas similares, lo que indica que las velocidades centrales no difieren sustancialmente entre posiciones. Las medias (representadas por los puntos negros) también son comparables, y cercanas a las medianas, lo que en principio sugiere una distribución relativamente simétrica sin sesgos marcados. En cuanto a la dispersión, las posiciones muestran rangos amplios, siendo la posición central (2) la de menor variabilidad. Las posiciones 1 y 3 presentan variabilidad y magnitudes similares, con velocidades que varían aproximadamente entre 300 y más de 800 m/s. No se observan valores atípicos destacados.

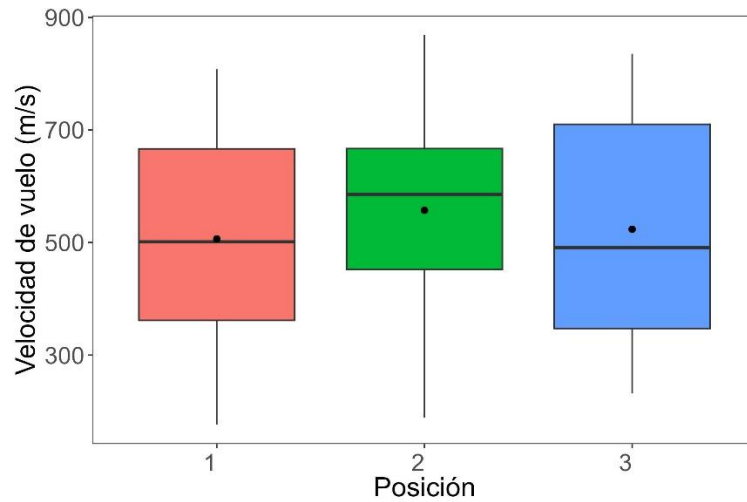


Figura 10. *Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por posición.*

Se prosiguió con el ajuste del modelo mixto (Ec. 2), considerando a la posición como efecto fijo y al árbol como efecto aleatorio. A partir del modelo ajustado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y el resultado indicó que el efecto de la posición no fue estadísticamente significativo ($p\text{-valor} > 0.05$) lo que sugiere que no habría diferencias entre las posiciones evaluadas (Tabla VI). Al comparar las medias estimadas entre posiciones, se observa una gran similitud entre ellas, lo cual coincide con lo anticipado a partir del diagrama de cajas de los datos originales. Cabe destacar que los errores estándar asociados a cada posición presentan el mismo valor (38,9), dado que los datos son balanceados.

Tabla VI. *Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (según Fakopp) por posición. Resultado de ANOVA.*

| Posición | Media | SE | p-valor |
|----------|-------|------|---------|
| 1 | 507 | 38,9 | |
| 2 | 557 | 38,9 | 0.3111 |
| 3 | 524 | 38,9 | |

Para poder concluir que no existen diferencias significativas entre las posiciones evaluadas a nivel poblacional, es necesario verificar que se cumplen los supuestos del modelo mixto ajustado, en particular la normalidad de los residuos y la homogeneidad de varianzas. La figura 11 presenta el histograma de residuos (izquierda) y el gráfico de cuantiles, comúnmente llamado Q-Q plot (derecha), los cuales permiten evaluar visualmente la adecuación del supuesto de normalidad. En

el histograma se observa cierta asimetría, con una mayor concentración de residuos en los valores altos, lo que indica que los errores no se distribuyen simétricamente en torno al valor cero, como se esperaría bajo normalidad. Por su parte, en el gráfico Q-Q, los cuantiles empíricos de los residuos se desvían sistemáticamente de la línea roja (que representa la distribución normal teórica), especialmente en los extremos. Este patrón de curvatura y alejamiento de la diagonal confirma que los residuos no siguen una distribución normal. Por lo tanto, en función de ambos gráficos se podría indicar que no se estaría cumpliendo uno de los supuestos fundamentales del modelo lineal.

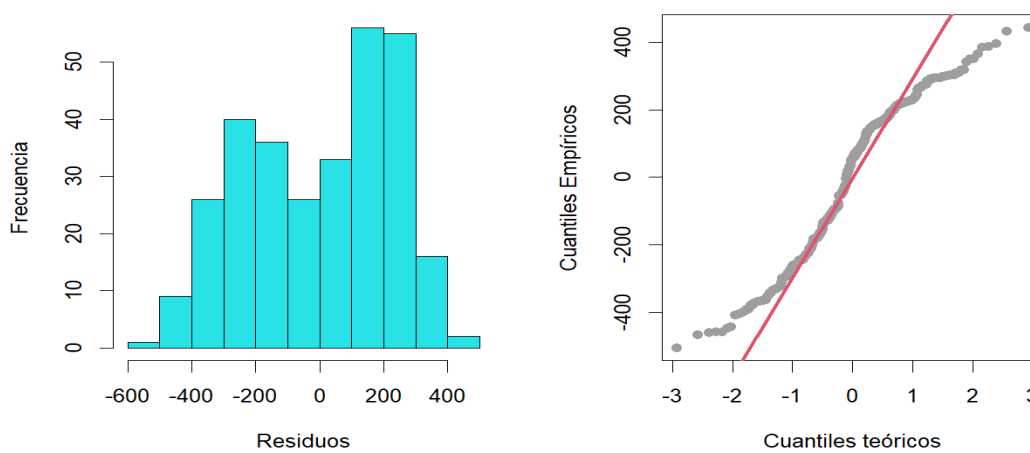


Figura 11. *Histograma y Q-Q plot de residuos del modelo de velocidad de vuelo, con posición como efecto fijo y árbol como aleatorio.*

Para corroborar analíticamente el cumplimiento de los supuestos del modelo, se aplicaron pruebas estadísticas correspondientes. En primer lugar, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los residuos del modelo [49]. Esta prueba contrasta la hipótesis nula de que los datos provienen de una distribución normal, por lo tanto, p-valores mayores que el nivel de significancia corroboran el cumplimiento del supuesto. En este caso, se obtuvo un p-valor $< 0,001$, lo que indica que existe evidencia estadísticamente significativa en contra de la normalidad.

Por otro lado, se aplicó la prueba de Levene para analizar la homogeneidad de varianzas entre los grupos definidos por la variable posición [50]. Esta prueba contrasta la hipótesis nula de que las varianzas de los distintos grupos son estadísticamente iguales, por lo tanto, p-valores mayores que el nivel de significancia corroboran el cumplimiento del supuesto. El resultado arrojó un p-valor de 0,4809, lo que implica que no se rechaza la hipótesis nula, y por tanto se considera que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

A modo de resumen, los resultados de las pruebas y sus implicancias se presentan de forma sintetizada en la Tabla VII. Esta incluye no solo el cumplimiento (o no) de los supuestos evaluados, sino también las estrategias de análisis alternativas consideradas. Este formato de tabla será presentado en los siguientes análisis del trabajo.

Tabla VII. *Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo (Fakopp), con posición como efecto fijo y árbol como aleatorio.*

| Prueba | Hipótesis que se testea en la prueba | Resultado de la prueba | |
|--|--|------------------------|------------------------------|
| | | p-valor | Conclusión ($\alpha=0,05$) |
| Shapiro-Wilk | Los datos siguen una distribución normal | < 0,001 | - No se cumple normalidad |
| Levene | Las varianzas de los grupos son iguales | 0,4809 | - Se cumple homogeneidad |
| Estrategias de análisis alternativos: | | | |
| 1) Transformaciones para lograr normalidad: Logarítmica, Raíz cuadrada, Raíz cúbica, Inversa | | | |
| 2) Prueba no paramétrica de Friedman, adecuada para diseños con medidas repetidas | | | |

Cada una de las transformaciones consideradas se aplicó a la variable de respuesta, velocidad de vuelo (m/s), y en cada caso se volvió a ajustar el modelo mixto y se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk sobre los residuos resultantes.

En todos los casos se obtuvo p-valores menores a 0,001, lo que indica que ninguna de las transformaciones logró solucionar el problema del no cumplimiento del supuesto de normalidad. Complementariamente, el análisis visual de los histogramas de residuos no mostró distribuciones con forma aproximadamente simétrica ni centradas en cero, como se esperaría en presencia de normalidad (Figura 12).

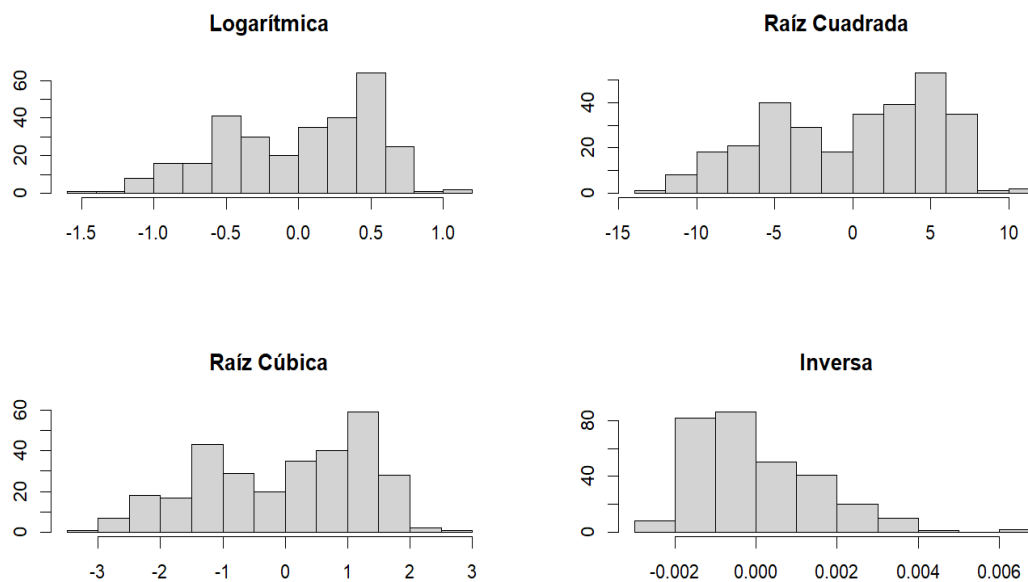


Figura 12. *Histograma de residuos del modelo mixto con transformaciones aplicadas a la velocidad de vuelo (Fakopp).*

Diversos estudios han demostrado que el ANOVA clásico presenta una relativa robustez ante desviaciones de la normalidad, siempre que las varianzas sean homogéneas y los tamaños muestrales similares [62][63][64][65], ambas condiciones que se cumplen en este caso. Si bien hubiera sido posible concluir sobre el efecto de las posiciones, tomando como referencia los estudios, no obstante, y con el objetivo de fortalecer la validez de la inferencia, se optó por aplicar una prueba no paramétrica, que no requiere el cumplimiento de ninguno de los supuestos que tiene ANOVA (Tabla VII, estrategia 2).

En particular, se utilizó la prueba de Friedman [52], ya que es adecuada para diseños con medidas repetidas, como en este caso, donde se realizaron múltiples mediciones por árbol, y que permite comparar medianas entre grupos. Esta prueba contrasta la hipótesis nula de igualdad entre los grupos evaluados, por lo tanto, p-valores menores que el nivel de significancia permiten concluir que existen diferencias entre ellos.

Aunque se observan diferencias en las medianas absolutas entre las posiciones evaluadas, los rangos promedio obtenidos en la prueba fueron similares, lo que se traduce en un p-valor mayor al nivel de significancia de 5% (Tabla VIII). Esto indica que las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre posiciones.

Tabla VIII. *Medianas y rangos promedios de velocidad de vuelo por posición (Friedman).*

| Posición | Mediana | Rango Promedio | p-valor |
|----------|---------|----------------|---------|
| 1 | 501,35 | 1,85 | |
| 2 | 585,50 | 2,20 | 0,522 |
| 3 | 490,92 | 1,95 | |

En resumen, a partir de todos los análisis realizados, se concluye que la posición de medición no afecta de forma significativa los valores registrados con el equipo Fakopp, por lo tanto, se optó por considerar una única posición por árbol en el diseño del estudio final.

4.1.2. Determinación del tamaño muestral

Para la determinación del tamaño muestral requerido en el estudio final, se aplicó la fórmula clásica para la comparación de medias entre grupos independientes, incorporando estimaciones obtenidas a partir del ensayo preliminar realizado sobre 20 árboles (Tabla IX). Se consideraron tanto parámetros derivados de los datos recolectados como supuestos estándar en estudios experimentales. Al sustituir los valores correspondientes (Ec. 2), se obtuvo un tamaño muestral de 22,09 árboles por parcela. En función de este resultado, se definió seleccionar 23 árboles por parcela para la implementación del estudio final.

Tabla IX. *Parámetros para el cálculo del tamaño de muestra en el estudio final (Fakopp).*

| Componente | Valor | Justificación |
|---------------|------------------|---|
| σ^2 | 273 ² | Varianza estimada a partir de las mediciones realizadas con el equipo Fakopp en el ensayo preliminar. |
| $z_{(0.025)}$ | 1,96 | Valor crítico correspondiente a un nivel de significancia del 5% |
| $z_{(0.80)}$ | 0,84 | Valor correspondiente a una potencia estadística del 80% |
| Δ | 230 | Diferencia mínima esperada entre las medias. |

4.2. Resultados del estudio final: Medición del módulo de elasticidad con equipo Fakopp

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la primera etapa del estudio final, centrada en la medición de la velocidad acústica utilizando el equipo Fakopp. En primer lugar, se evaluó si las distintas parcelas consideradas en el estudio tuvieron un efecto sobre los valores de velocidad acústica registrados en árboles en pie. Posteriormente, una vez cosechadas las parcelas y obtenidas las trozas, estas fueron clasificadas según clases de velocidades obtenidas con Fakopp

(Tabla II). A partir de dicha clasificación, se analizó si las categorías definidas presentaban diferencias entre los valores de velocidad obtenidos con el equipo Fakopp.

4.2.1. Efecto de la parcela en las mediciones con Fakopp

Para evaluar el efecto de la parcela sobre las velocidades registradas con el equipo Fakopp, se aplicó un enfoque combinado de análisis descriptivo y analítico, similar al utilizado para el efecto de la posición. En una primera etapa, se exploró la distribución de los datos mediante diagramas de caja (Boxplot), lo que permitió examinar la dispersión y simetría de las mediciones en cada parcela (Figura 13).

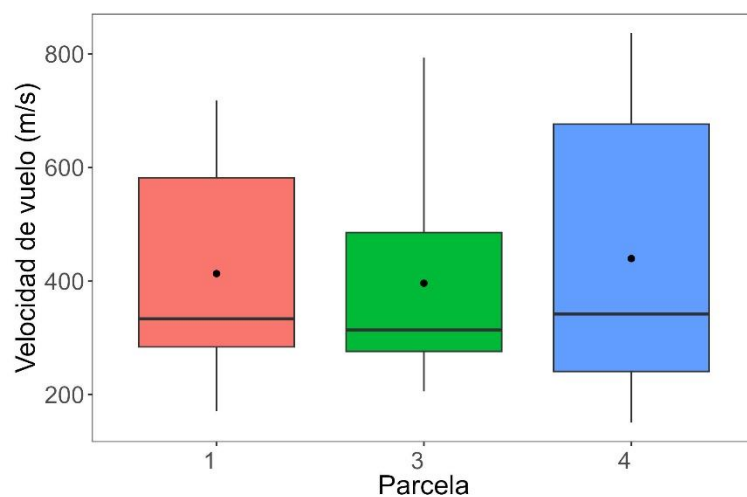


Figura 13. *Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por parcela.*

Las velocidades medidas con el equipo Fakopp presentan distribuciones similares entre parcelas, con medias y medianas cercanas en todos los casos. La distribución del 50 % central de los datos (representada por las cajas del gráfico) muestra un comportamiento levemente asimétrico positivo, evidenciado por valores de media superiores a las medianas. No se observaron valores atípicos. La parcela 3 exhibe la menor dispersión, mientras que la parcela 4 presenta la mayor variabilidad. No obstante, los desvíos estándar resultaron relativamente similares entre parcelas: 171, 175 y 248 para las parcelas 1, 3 y 4, respectivamente. En conjunto, las diferencias observadas entre parcelas parecen estar más relacionadas con la variabilidad interna que con desplazamientos en los centros de las distribuciones.

Para evaluar si existían diferencias significativas en las velocidades medidas con el equipo Fakopp entre parcelas, se ajustó el modelo mixto (Ec. 3), considerando a la parcela como efecto fijo y al

árbol como efecto aleatorio. A partir del modelo ajustado, se realizó un ANOVA y el resultado indicó que el efecto de la parcela no fue estadísticamente significativo ($p\text{-valor} > 0.05$) lo que sugiere que no hay diferencias entre las parcelas evaluadas (Tabla X).

Tabla X. *Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp) por parcela. Resultado de ANOVA.*

| Parcela | Media | SE | p-valor |
|---------|-------|------|---------|
| 1 | 413 | 28,5 | |
| 3 | 396 | 28,5 | 0.3149 |
| 4 | 440 | 28,5 | |

Antes de proceder con la interpretación del ANOVA, se verificó analíticamente el cumplimiento de los supuestos del modelo. Se presenta el histograma y el Q-Q plot, como herramientas gráficas que permiten visualizar el comportamiento de los residuos del modelo ajustado (Figura 14).

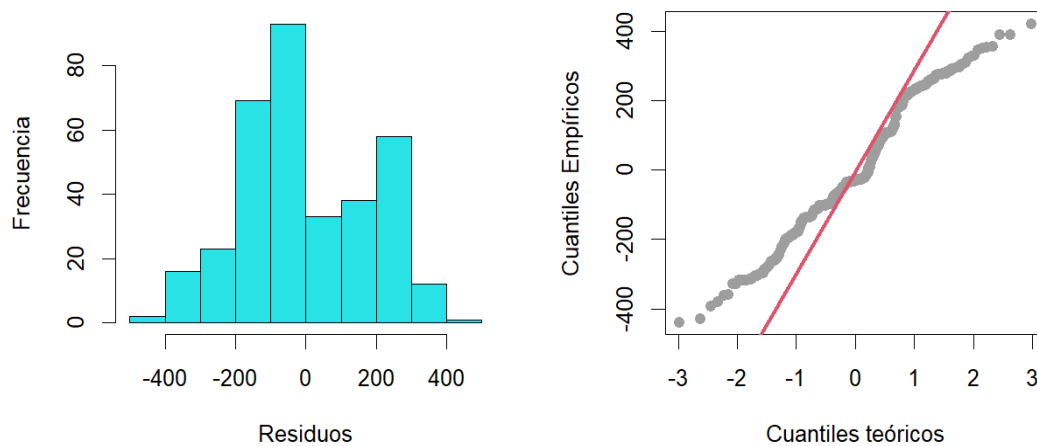


Figura 14. *Histograma y Q-Q plot de residuos del modelo de velocidad de vuelo, con parcela como efecto fijo y árbol como aleatorio.*

En el histograma se observa que la mayor concentración de residuos se encuentra por debajo del cero, no presentando una distribución simétrica en torno a este valor. Por su parte, en el gráfico Q-Q, los cuantiles empíricos de los residuos se desvían bastante de la línea roja (que representa la distribución normal teórica).

Por lo tanto, ambos gráficos sugieren que no se estarían cumpliendo ninguno de los dos supuestos del modelo propuesto. Para corroborarlo analíticamente se procedió a realizar las pruebas correspondientes (Tabla XI).

Tabla XI. *Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo, con parcela como efecto fijo y árbol como aleatorio.*

| Prueba | Hipótesis que se testea en la prueba | Resultado de la prueba | |
|--------------|--|------------------------|------------------------------|
| | | p-valor | Conclusión ($\alpha=0,05$) |
| Shapiro-Wilk | Los datos siguen una distribución normal | <0,001 | - No se cumple normalidad |
| Levene | Las varianzas de los grupos son iguales | 0,0073 | - No se cumple homogeneidad |

Estrategia de análisis alternativo:

1) Prueba no paramétrica de Friedman, adecuada para diseños con medidas repetidas

En función de los resultados, se puede constatar que realizar inferencias con base en el resultado del ANOVA no sería correcto por lo que se decidió realizar la prueba de Friedman que es una alternativa no paramétrica al ANOVA, recomendada en esta situación (más de una medición en cada unidad experimental, no se cumplen los supuestos de normalidad y varianzas homogéneas). Aunque se observan diferencias en las medianas absolutas entre las posiciones evaluadas, los rangos promedio obtenidos en la prueba fueron similares, lo que se traduce en un p-valor de 0,7376, mayor al nivel de significancia de 5% (Tabla XII). Esto indica que las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre parcelas.

Tabla XII. *Medianas y rangos promedios de velocidad de vuelo por parcela (Friedman).*

| Posición | Mediana | Rango Promedio | p-valor |
|----------|---------|----------------|---------|
| 1 | 333,40 | 2,09 | 0,7673 |
| 2 | 313,82 | 2,04 | |
| 3 | 341,93 | 1,87 | |

En resumen, a partir de todos los análisis realizados, se concluye que la parcela no afecta de forma significativa los valores registrados con el equipo Fakopp.

En consecuencia, en términos de densidad de árboles, se puede concluir que esta variable no tuvo una influencia relevante sobre los valores registrados de Fakopp.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por R. Martiarena en *P. taeda* implantado en Misiones, Argentina, quien no encontró diferencias significativas en la densidad básica ponderada

por el volumen de la madera, en base a distintos tratamientos de raleo (0, 33 y 66 %) con una edad de 20 años a la hora de la cosecha. Concluyó que la intensidad de raleo puede incidir positivamente en la producción de madera sin modificar la calidad de esta [66].

Por su parte R. Winck, en árboles de *P. taeda* de 20 años, con distintas intensidades de raleo (0, 50, 75 y 87,5 %), en la región de Misiones (Argentina), comprobó que las intensidades de 0 y 50 % favorecieron mayores valores de espesor de pared celular y menores valores de ángulo microfibrilar. Concluyendo que este manejo silvícola altera las propiedades anatómicas de la madera de esta especie, y que las mayores intensidades de raleo afectan negativamente la resistencia [67].

Este hallazgo contrasta con lo reportado por Soto, quien encontró un mayor MOE dinámico en plantaciones con menor densidad inicial (625 árboles/hectárea) de *P. radiata* de 28 años, en suelos de la Región del Biobío, Chile [68].

Por otro lado, la velocidad promedio obtenida en las tres parcelas fue de 416,3 m/s, un valor considerablemente inferior al informado por Butler, el cual fue de 3425 m/s para trozas basales de *P. taeda* en la Costa Atlántica de Georgia, Estados Unidos [69].

Dado que no se encontraron diferencias significativas entre las parcelas en la variable medida, para la siguiente etapa del estudio final (medición de MOE con técnicas destructivas y no destructivas) se considerará a todos los árboles como una única unidad muestral. Esta decisión permitirá aprovechar la totalidad de los datos disponibles, optimizando la potencia estadística y simplificando el análisis en etapas posteriores.

4.2.2. Efecto de las clases de velocidad en las mediciones

El diagrama de caja, que permite visualizar la distribución de la variable tiempo de vuelo, medido con el equipo Fakopp, en función de las tres clases de velocidad establecidas (Tabla II en sección 3.4.2) pareciera indicar que hay variabilidad en la distribución y en la dispersión de cada uno de los grupos (Figura 15).

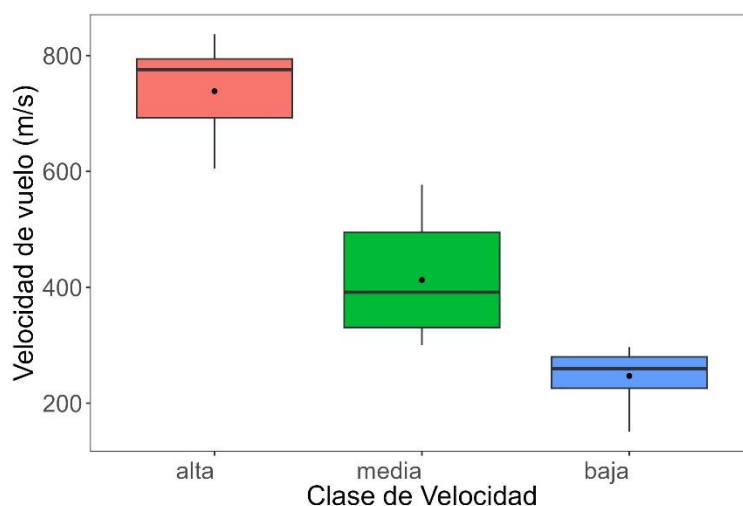


Figura 15. *Boxplot de velocidad de vuelo (Fakopp) por clases de velocidad.*

Las clases alta y media presentan distribuciones relativamente compactas, con menor dispersión y sin presencia evidente de valores atípicos. En contraste, la clase baja muestra una mayor variabilidad, con una caja más amplia y una dispersión superior, lo que indica una mayor heterogeneidad interna en esa categoría.

En conjunto, las diferencias entre clases son evidentes tanto en términos de medidas de centralidad como de dispersión, lo cual sugiere que la clasificación por velocidad estaría capturando adecuadamente distintas propiedades del material, diferenciadas por su respuesta al estímulo del equipo Fakopp.

Para evaluar si existían diferencias significativas entre las clases de velocidad se ajustó un modelo que consideraba a la clase como único efecto fijo (Ec. 4). Se realizó un ANOVA y el resultado obtenido sugiere (p -valor < 0.001), tal como lo indicaba la figura 15, que hay diferencias entre las clases de velocidad consideradas (Tabla XIII).

Tabla XIII. *Medias estimadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp) por clase de velocidad. Resultado de ANOVA.*

| Clase | Muestra | Media | SE | p-valor |
|-------|---------|-------|------|---------|
| alta | 15 | 739 | 18,5 | |
| media | 26 | 413 | 14,0 | <0,001 |
| baja | 28 | 247 | 13,5 | |

Si bien el desbalance entre las clases no afecta los valores estimados de las medias, sí incide en sus errores estándar (como se refleja en los distintos valores de SE en la Tabla XI), lo que compromete la precisión de las estimaciones y reduce la potencia estadística para detectar diferencias. Por esta razón, y con el objetivo de evaluar el efecto de cada factor controlando por los demás, independientemente del orden en que aparecen en el modelo, se optó por utilizar sumas de cuadrados tipo III.

Se procedió a corroborar el cumplimiento de los supuestos del modelo antes de sacar conclusiones sobre el resultado del ANOVA (Tabla XIV).

Tabla XIV. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de velocidad de vuelo (Fakopp), con clase de velocidad como efecto fijo.

| Prueba | Hipótesis que se testea en la prueba | Resultado de la prueba | |
|--------------|--|------------------------|------------------------------|
| | | p-valor | Conclusión ($\alpha=0,05$) |
| Shapiro-Wilk | Los datos siguen una distribución normal | 0.09892 | - Se cumple normalidad |
| Levene | Las varianzas de los grupos son iguales | 0,00086 | - No se cumple homogeneidad |

Estrategia de análisis alternativo:

1) Prueba Welch (o Welch-ANOVA), una alternativa que no requiere del supuesto de normalidad

No siendo posible concluir a partir del ANOVA realizado (Tabla XIII), se procedió a realizar la prueba de Welch. En esta prueba se obtuvo un p-valor inferior al nivel de significancia del 5%, lo que indica evidencia suficiente para afirmar que existen diferencias significativas entre al menos una de las clases de velocidad evaluadas (Tabla XV). Esta prueba permite que cada grupo tenga su propia varianza, lo cual se refleja en los distintos valores del error estándar (SE), representando de forma más precisa la dispersión real de los datos. Dado este resultado, se procedió a realizar una prueba de comparación múltiple de medias, siendo la opción adecuada en este contexto la propuesta de Games-Howell. Esta permitió identificar específicamente entre qué clases se observan diferencias significativas.

Tabla XV. Medias ajustadas y error estándar (SE) de velocidad de vuelo (Fakopp), por clase de velocidad. Resultado de Welch-ANOVA y comparación Games-Howell.

| Clase | Muestra | Media | SE | Welch p-valor | Games-Howell Letras |
|-------|---------|-------|------|---------------|---------------------|
| alta | 15 | 739 | 19,7 | | a |
| media | 26 | 413 | 17,8 | <0,001 | b |
| baja | 28 | 247 | 8,10 | | c |

(Letras distintas indican diferencia significativa entre clases, $\alpha=5\%$)

En este trabajo, los valores de velocidad acústica obtenidos oscilaron entre 151 y 837 m/s, un rango considerablemente inferior al reportado por Butler, quienes informaron velocidades entre 3060 y 3910 m/s en *P. taeda* de entre 24 y 33 años en la Costa Atlántica de Georgia, Estados Unidos [69].

Resultados similares fueron los que obtuvo Wang Xiping, quien concluyó que la velocidad de onda medida en árboles en pie no puede utilizarse directamente para evaluar la calidad de la madera, debido a la desviación significativa observada entre las mediciones realizadas en árboles en pie y en trozas [70].

4.3. Resultados del estudio final: Medición del módulo de elasticidad en tablas con diversas técnicas

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la segunda etapa del estudio final, enfocada en la medición del módulo de elasticidad (MOE) de las tablas obtenidas tras el procesamiento de las trozas. En primer lugar, se detallan los resultados obtenidos mediante el equipo Viscan, una técnica no destructiva que permitió estimar el MOE dinámico. A continuación, se presentan los resultados del ensayo universal tipo EasyQ (UTM-50), una técnica destructiva que permitió calcular el MOE estático mediante ensayos de flexión.

4.3.1. Medición del módulo de elasticidad dinámico mediante equipo Viscan

Inicialmente se elaboró un diagrama de cajas (Figura 16) para visualizar la distribución de los valores del MOEd obtenido a partir de la clasificadora Viscan, en cada una de las diferentes clases de velocidades establecidas a partir del equipo Fakopp (ver Tabla II en sección 3.4.2).

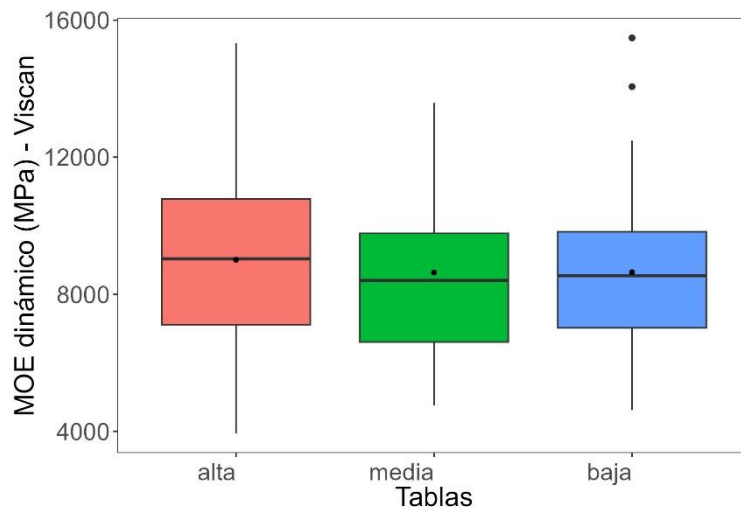


Figura 16. *Boxplot del MOEd (Viscan) por tipo de tabla (Fakopp).*

Se observa que la mediana es levemente mayor en el grupo de tablas clasificadas como alta, seguida por las categorías media y baja, lo que sugiere una tendencia general decreciente en los valores centrales de MOEd a medida que disminuye la calidad de la tabla. Las medias, representadas por puntos negros, se encuentran próximas a las medianas en los tres grupos, lo cual indica una distribución relativamente simétrica. En cuanto a la dispersión, el grupo de clase alta presenta la mayor variabilidad (longitud de la caja y los bigotes). Las categorías media y baja muestran una dispersión similar entre sí, aunque en el grupo de clase baja se identifican valores atípicos superiores, lo que indica la presencia de algunos valores considerablemente más elevados en comparación con el resto de las observaciones de ese grupo.

Para evaluar si existían diferencias significativas del MOEd al comparar los grupos de tablas provenientes de diferentes clases de velocidad, se ajustó un modelo que consideraba a la clase como único efecto fijo (Ec. 5). Se realizó un ANOVA y el resultado indica (p -valor = 0,507), tal como lo anticipaba la figura 16, que no hay suficiente evidencia para afirmar que haya diferencias en el MOEd según las tablas, procedentes de diferentes clases de velocidades (Tabla XVI).

Tabla XVI. *Medias ajustadas y error estándar (SE) del MOEd (Viscan) por tipo de tabla (Fakopp). Resultado de ANOVA.*

| Tipo/clase | Muestra | Media | SE | p-valor |
|------------|---------|-------|-----|---------|
| alta | 86 | 9004 | 245 | |
| media | 44 | 8635 | 343 | 0,507 |
| baja | 95 | 8642 | 234 | |

Las medias de módulo de elasticidad dinámico obtenidos (9004, 8635, 8642 MPa referido a clase alta, media y baja respectivamente) están dentro de los valores promedios históricos que registra la empresa para trozas basales provenientes de montes podados de *P. taeda* con 24 años.

Si bien el desbalance entre las clases no afecta los valores estimados de las medias, sí incide en sus errores estándar (como se refleja en los distintos valores de SE en la Tabla XVI), lo que compromete la precisión de las estimaciones y reduce la potencia estadística para detectar diferencias. Por esta razón, y con el objetivo de evaluar el efecto de cada factor controlando por los demás, independientemente del orden en que aparecen en el modelo, se utilizaron sumas de cuadrados tipo III. Tal como se realizó en etapas previas, se procedió a corroborar el cumplimiento de los supuestos del modelo (Tabla XVII).

Tabla XVII. Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo de MOEd (*Viscan*), con tipo de tabla como efecto fijo.

| Prueba | Hipótesis que se testea en la prueba | Resultado de la prueba | |
|--------------|--|------------------------|------------------------------|
| | | p-valor | Conclusión ($\alpha=0,05$) |
| Shapiro-Wilk | Los datos siguen una distribución normal | 0,01874 | - No se cumple normalidad |
| Levene | Las varianzas de los grupos son iguales | 0,1929 | - Se cumple homogeneidad |

Estrategia de análisis alternativo:

1) Transformación de la variable para lograr normalidad: Logarítmica

Se aplicó la transformación logarítmica a la variable de respuesta, MOEd, se ajustó nuevamente el modelo y luego se evaluó el cumplimiento de los supuestos sobre los residuos resultantes. Con esta transformación se consiguió la normalidad de los residuos (p-valor = 0,1961) y se presenta en Tabla XVIII los resultados de las medias estimadas con esta transformación.

Tabla XVIII. Medias ajustadas y errores estándar (SE) del Logaritmo del MOEd (*Viscan*) por tipo de tabla. Resultado de ANOVA.

| Tipo/clase | Muestra | Media | SE | p-valor |
|------------|---------|-------|--------|---------|
| alta | 86 | 9,07 | 0,0285 | |
| media | 44 | 9,03 | 0,0398 | 0,1961 |
| baja | 95 | 9,04 | 0,0271 | |

Este resultado es consistente con lo observado en los diagramas de caja (Figura 16), donde los valores de MOEd presentan distribuciones similares entre los tres grupos de tablas. En conjunto, estos resultados refuerzan la conclusión de que no se evidencian diferencias significativas en el

módulo de elasticidad dinámico medido con el equipo Viscan, en función del tipo de tabla, según la clasificación original de las trozas realizada con el Fakopp.

4.3.2. Medición del módulo de elasticidad estático mediante Ensayo Universal tipo EasyQ (UTM-50)

Al igual que en los análisis previos, se elaboró un diagrama de cajas para visualizar la dispersión y la tendencia central del Módulo de Elasticidad estático en función de las categorías de tabla (Figura 17). Se observa una tendencia decreciente tanto en la mediana como en la media del MOEe a medida que disminuye la categoría, con valores levemente superiores en el grupo "alta". Este patrón es similar al observado anteriormente para el MOEd medido con el equipo Viscan, aunque pareciera ser con magnitudes superiores en cada grupo, y al promedio general de 8760 MPa, registradas por dicho equipo. En cuanto a la dispersión, el grupo "media" presenta la mayor variabilidad, evidenciada por una mayor longitud de la caja y los bigotes, en comparación con los grupos "alta" y "baja", que muestran una dispersión similar entre sí. No se identifican valores atípicos en ninguno de los grupos, lo que sugiere una distribución interna relativamente homogénea dentro de cada categoría.

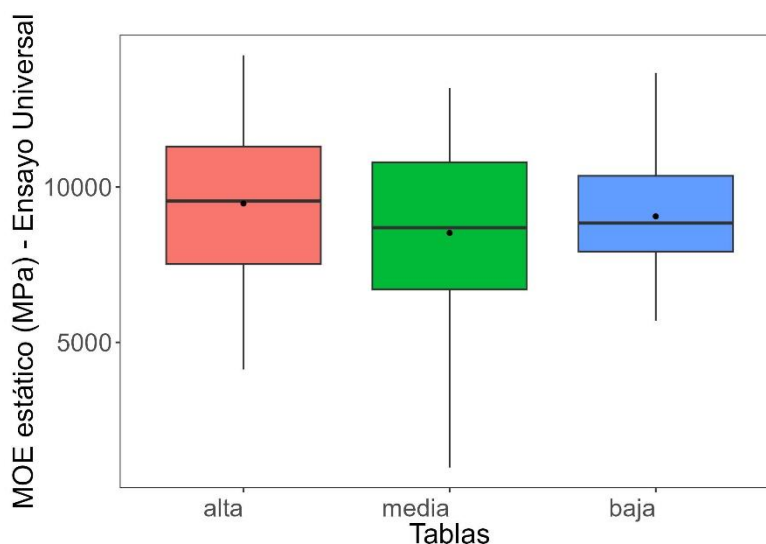


Figura 17. Boxplot del MOEe (Ensayo Universal) por tipo de tabla (Fakopp).

Para evaluar si existían diferencias significativas del MOEe al comparar los grupos de tablas provenientes de diferentes clases de velocidad, se ajustó un modelo que consideraba a la clase como único efecto fijo (Ec. 7). Se realizó un ANOVA y debido al desbalance de los datos, se trabajó con sumas de cuadrado tipo III. Tal como lo anticipaba la figura 17, el resultado del

análisis indica que no hay suficiente evidencia para afirmar que haya diferencias en el MOEe según las tablas, procedentes de diferentes clases de velocidades (Tabla XIX).

Tabla XIX. *Medias ajustadas y error estándar (SE) del MOEe (Ensayo Universal), por tipo de tabla (Fakopp). Resultado del ANOVA.*

| Tipo/clase | Muestra | Media | SE | p-valor |
|------------|---------|-------|-----|---------|
| alta | 50 | 9471 | 245 | 0,127 |
| media | 44 | 8525 | 343 | |
| baja | 50 | 9058 | 234 | |

Tal como se realizó en etapas previas, se procedió a corroborar el cumplimiento de los supuestos del modelo (Tabla XX).

Tabla XX. *Pruebas de normalidad y homogeneidad para el modelo del MOEe (Ensayo Universal), con tipo de tabla como efecto fijo.*

| Prueba | Hipótesis que se testea en la prueba | Resultado de la prueba | |
|--------------|--|------------------------|------------------------------|
| | | p-valor | Conclusión ($\alpha=0,05$) |
| Shapiro-Wilk | Los datos siguen una distribución normal | 0,2416 | - Se cumple normalidad |
| Levene | Las varianzas de los grupos son iguales | 0,0514 | - Se cumple homogeneidad |

Habiendo corroborado el cumplimiento de los supuestos, entonces es posible hacer inferencia a nivel poblacional a partir de los resultados del ANOVA (Tabla XIX) y por lo tanto, no existe suficiente evidencia a partir de las muestras seleccionadas, para indicar que haya diferencia en el MOEe, registrado con la prueba destructiva, en función del tipo de tabla (clase de velocidad alta, media o baja).

Al igual que los resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenidos con Viscan, los valores de módulo de elasticidad estático obtenidos en este trabajo son bastante similares a los registrados históricamente por la empresa para tablas de características y origen similar. En particular, el promedio del MOEe determinado mediante el método destructivo fue de 9018 MPa, valor que resulta superior al promedio reportado por Pérez del Castillo, quien obtuvo valores promedios de 7530 MPa en ensayos de propiedades mecánicas de *P. taeda* mediante flexión estática [31].

De igual manera H. O'Neill obtuvo valores de MOEe inferiores (8354 MPa), mediante ensayo universal de tablas secas de *P. taeda*, cosechadas a los 24 años, pertenecientes a la región Litoral del Uruguay [71].

4.4. Comparación de técnicas de medición del módulo de elasticidad y caracterización estructural de tablas

En esta última sección de resultados se presenta una comparación entre las técnicas aplicadas para la medición del módulo de elasticidad (MOE), así como una discusión sobre su posible utilidad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la industria maderera.

4.4.1. Técnicas aplicadas en este trabajo

Del análisis general de los resultados obtenidos con el equipo Fakopp, se observa una alta variación en la velocidad de onda, tanto entre diferentes posiciones de un mismo árbol como entre árboles de una misma parcela. Este comportamiento coincide con los resultados reportados por Pérez del Castillo en mediciones con Fakopp aplicadas a ensayos de propiedades mecánicas en *P. taeda* [31].

Sin embargo, en este estudio no se obtuvieron valores de MOE comparables con los esperados, como los registrados durante la calibración con tablas secas de *P. taeda* (Tabla XXI).

A modo de referencia, F. Isika reportó valores de módulo de elasticidad dinámico entre 5000 y 7000 MPa, utilizando el equipo Fakopp en *P. taeda* de entre 14 y 19 años en el sureste de Estados Unidos [72].

De forma similar, los valores de velocidad obtenidos en este trabajo se encuentran por debajo de los reportados por C. Mora, quien midió árboles en pie de *P. taeda* en tres sitios del sureste de EE. UU. (Georgia central, suroeste de Carolina del Sur y costa atlántica de Carolina del Norte), con velocidades de onda entre 2494 m/s y 4484 m/s [73].

Tabla XXI. Valores de MOE obtenidos por diferentes métodos y velocidad de onda según clase de velocidad.

| Clases | MOE dinámico [MPa] (desvío) | MOE estático [MPa] (desvío) | MOE con Fakopp [MPa] (desvío) | Velocidad según Fakopp [m/s] (desvío) |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| alta | 9004 (2409) | 9471 (2407) | 542 (150) | 739 (76) |
| media | 8635 (2411) | 8353 (2461) | 134 (134) | 413 (91) |
| baja | 8642 (2080) | 9058 (1822) | 63 (20) | 247 (43) |

4.4.2. Caracterización estructural de las tablas según módulo de elasticidad estático

El sistema de clases resistentes agrupa calidades de madera en función de sus propiedades estructurales, permitiendo su uso según valores característicos adecuados para el diseño y la función prevista. En el caso de la madera aserrada de *P. elliotii* o *P. taeda*, las piezas deben cumplir con los estándares de calidad establecidos en la norma UNIT 1261 [74], la cual define los valores característicos de las propiedades esenciales para especies coníferas [75]. Asimismo, los elementos de madera laminada encolada estructural utilizados en Uruguay deben cumplir con los requisitos de fabricación establecidos por la norma UNIT 1264 [76].

Considerando los valores de módulo de elasticidad estático (MOEe) obtenidos y presentados en la Tabla XXI, con valores promedio de 9471, 8353 y 9058 MPa para las clases alta, media y baja, respectivamente, se concluye que, de acuerdo con lo establecido por la norma UNE-EN 14080 [77], la madera de cualquiera de las tres clases analizadas puede clasificarse como madera estructural C14. Esto respalda su aptitud para ser utilizada en la fabricación de paneles estructurales.

La clasificación utilizada por la empresa Arboreal, basada en la norma europea UNE-EN 338 [78], se presenta en la figura 18.

| Productos | Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Uso previsto | Edificios y puentes | | | | | | | | | | | |
| Clases y perfiles resistentes aprobados | | | | | | | | | | | | |
| Características esenciales | Símbolo | Unidad | UC12 | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | TR26 | C30 |
| Resistencia a la flexión | $f_{m,k}$ | N/mm ² | 12 | 14,0 | 16,0 | 18,0 | 20,0 | 22,0 | 24,0 | 27,0 | 28,3 | 30,0 |
| Módulo de elasticidad | $E_{m,0,mean}$ | kN/mm ² | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 9,5 | 10,0 | 11,0 | 11,5 | 11,0 | 12,0 |
| Densidad | ρ_k | kg/m ³ | 290 | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 | 390 |
| Durabilidad | Clase 5 (EN 350, 5.2) | | | | | | | | | | | |
| Reacción al fuego, clase | D-s2, d0 conforme a la EN 14081, Tabla 3 | | | | | | | | | | | |

Figura 18. Valores de MOE y especificaciones técnicas de la madera estructural como referencia comercial [78].

5. CONCLUSIONES

En función del objetivo general planteado, se concluye que fue posible caracterizar la rigidez de la madera de *P. taeda*, ya que se obtuvieron valores de módulo de elasticidad dinámico y estático similares a los registrados por la empresa en su operativa diaria para tablas con iguales especificaciones técnicas y de origen. En este sentido, los valores de módulo de elasticidad estático también fueron comparables con resultados de ensayos de flexión realizados en *P. taeda*, tanto a nivel nacional como internacional.

Respecto al objetivo específico vinculado al instrumento Fakopp, se concluye que este no permitió caracterizar la rigidez de la madera en árboles en pie con el nivel de precisión requerido para evaluar su potencial como madera estructural.

En relación con la velocidad de onda obtenida mediante el Fakopp, no se logró comprobar la hipótesis inicial. Las diferencias en la densidad de árboles por hectárea al turno final, determinadas en cada parcela, no afectaron las mediciones realizadas con este instrumento. Asimismo, los valores de módulo de elasticidad obtenidos no coincidieron con los esperados, como sí ocurrió durante su calibración en tablas secas de *P. taeda*.

A partir de las velocidades registradas con el Fakopp, fue posible establecer tres clases de medición estadísticamente diferenciables. Las tablas correspondientes a cada clase presentaron valores distintos de módulo de elasticidad, tanto según el clasificador Viscan como mediante el ensayo destructivo en el Ensayo Universal. Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas como para validar la confiabilidad del instrumento, ni para afirmar que el ordenamiento obtenido según la velocidad (m/s) guarde proporcionalidad con los valores de módulo de elasticidad dinámico y estático de las tablas clasificadas.

6. PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN

Al finalizar este trabajo surgieron nuevas preguntas e inquietudes, derivadas de decisiones tomadas durante el proceso y que condicionaron el enfoque y el alcance del estudio. En este contexto, identificamos dos posibles líneas de investigación que podrían resultar de interés para continuar explorando la predicción del potencial estructural de la madera en árboles en pie desde una perspectiva alternativa.

Una primera variable que consideramos relevante es la edad del rodal. Entendemos que esta es una característica clave que podría influir significativamente en las propiedades estructurales de la madera. Para su evaluación, sería necesario contar con múltiples montes con edades contrastantes (preferentemente mayores a 20 años), lo cual permitiría realizar mediciones sobre una mayor cantidad de individuos. En ese marco, el instrumento Fakopp podría mostrar una mayor sensibilidad para detectar diferencias estructurales asociadas a la edad, aportando así una herramienta útil para la planificación de cosechas orientadas a la industria de paneles estructurales.

Una segunda línea de trabajo consiste en mantener la trazabilidad de las tablas obtenidas a partir de cada troza, previamente clasificada mediante el Fakopp. Esto permitiría correlacionar directamente los valores de velocidad de onda o de módulo de elasticidad dinámico registrados en el árbol en pie con los valores de módulo de elasticidad (dinámico o estático) medidos en cada tabla obtenida de ese árbol. Este enfoque posibilitaría una evaluación más precisa de la capacidad predictiva del instrumento.

Cabe señalar que este tipo de estudio requiere una importante disponibilidad de recursos logísticos y operativos, por lo que debería ser planificado en el marco de un aserradero que no esté comprometido con producción comercial en el momento de su realización.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) - Dirección General Forestal (DGF). *Inventario Forestal Nacional de Uruguay*, pp. 3-10, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agriculturapesca/files/documentos/publicaciones/Informe%20Inventario%20Forestal%20Nacional%20de%20Con%20C3%ADferas.pdf>. [Accedido: 13 sept. 2024].
- [2] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) - Dirección General Forestal (DGF). *Superficie Forestal de bosques plantados del Uruguay*, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/superficie-forestal-bosques-plantados-del-uruguay>. [Accedido: 31 may. 2025].
- [3] Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal. *Boletín Estadísticas Forestales*, pp. 5-13, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/boletin-estadisticas-forestales-2022>. [Accedido: 21 jun. 2025]
- [4] Uruguay XXI, *Sector Forestal en Uruguay*, pp. 28-34, 2005. [En línea]. Disponible: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/360c13a465dd9ee9bdc985fef09c5d1ef4c7bce.pdf>. [Accedido: 21 jun. 2025]
- [5] R. A. González, O. Pereyra y T. M. Suirezs. “*Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus taeda reforestado en la provincia de Misiones, Argentina*”, pp. 1-4, 1993. [En línea]. Disponible en: <https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/3409>. [Accedido: 20 sept. 2024]
- [6] M. G. González, C. M. Suárez y J. R. Fernández, “*Métodos de medición no destructivos para la evaluación de propiedades mecánicas de los árboles en pie*” *Revista Forestal Latinoamericana*, vol. 25, n°. 3, pp. 45-58, 2020.
- [7] F. Pérez, M. López y J. Gutiérrez, “*Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables*” *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 22, n°. 4, pp. 559-568, 2020. DOI:10.4067/S0718-221X2020005000414559
- [8] Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social (CERES). *La producción forestal en Uruguay, un sector líder y sostenible*, pp. 3, 2025. [En línea]. Disponible: https://ceres.uy/index.php/estudios/ficha_estudio/95. [Accedido: 31 may. 2025].
- [9] Fakopp Instrumente. *Sonic measurement of wood* – Fakopp. (s.f.). [En línea]. Disponible: <https://www.fakopp.com>. [Accedido: 20 sept. 2024].
- [10] Microtec, *Viscan automatic sorting system for Wood*, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.microtec.eu>. [Accedido: 20 sept. 2024].

- [11] L. Moya Silva *et al*, *Proyecto para la caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay*, Documento de Investigación N°3, Universidad ORT Uruguay, Montevideo, pp. 1-6, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://rad.ort.edu.uy/handle/20.500.11968/2847>. [Accedido: 20 sept. 2024].
- [12] FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). *Estado y tendencias de la ordenación forestal en 17 países de América Latina: resumen del estado actual del manejo y ordenación forestal en Uruguay*, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/4/j2628s/J2628S18.htm>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [13] P. Arbeletche y M. Guibert. “*Las dinámicas agropecuarias del siglo XXI en Uruguay*”. Pampa. Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales. pp. 31–54, 2018. [En línea]. Disponible: <https://univ-tlse2.hal.science/hal-02558167/preview/2018%20Pampa%2018%20Arbeletche%20Guibert.pdf>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [14] W, Oyhantçabal. “*El mecanismo para un desarrollo limpio en el Uruguay: hacia una nueva relación entre ganadería y silvicultura*”. Unasyuva, vol. 56, n.º 222, pp. 19-23, 2005. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/4/a0413s/a0413s04.htm> [Accedido: 07 jun. 2025].
- [15] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Forestal General. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, *Anuario OPYPa*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2020>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [16] Uruguay XXI, UY. “*Sector forestal en Uruguay*”, 2021. Disponible en [En línea]. Disponible: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [17] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Forestal General. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, *Anuario OPYPa*, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2018>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [18] Sociedad De Productores Forestales del Uruguay, *Forestación y zonas forestadas*, 2022 [En línea]. Disponible: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [19] M. Boscana y L. Boragno. *Encuesta de aserraderos 2020: informe final*. Montevideo, MGAP, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/INFORME%20FINAL.pdf>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [20] J. Hurrell. y D. Bazzano. *Pinos ornamentales y forestales*. Universidad Nacional del Nordeste, 2007. [En línea]. Disponible: <https://redbiblio.unne.edu.ar/pergamo/documento.php?ui=62&recno=40993&id=CABRAL.62.40993>. [Accedido: 17 jun. 2025].

- [21] A. Giménez, J. Moglia, P. Hernández, y P. Gerez, *Anatomía de madera*. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 2005. [En línea]. Disponible: <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>. [Accedido: 17 jun. 2025].
- [22] M. Umblandt *et al*, *Fundamentos teóricos prácticos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera: (Propiedades Físicas- Parte 1)*, Cátedra de propiedades físicas y mecánicas de la madera – Universidad Nacional de Santiago del Estero, 2022, [En línea]. Disponible: <https://fcf.unse.edu.ar/wp-content/uploads/2014/07/sd-47-prop-fisicas-y-mecanicas-madera-HUMBLANDT.pdf>. [Accedido: 24 jun. 2025]
- [23] L. Díaz *et al*, *Manual de prácticas de laboratorio "helechos y gimnospermas"*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2019. [En línea]. Disponible: http://bios.biologia.umich.mx/assets/files/manual_pteridofitas_y_gimnospermas_2024b.pdf. [Accedido: 17 jun. 2025].
- [24] E. Di Marco, *Procedimiento requerido en plantaciones: Pinus taeda L., familia Pinaceae*. Dirección de Producción Forestal MINAGRI, 2014. [En línea]. Disponible: <https://forestoindustria.magyp.gob.ar/archivos/procedimiento-requerido-en-plantaciones/pinus-taeda-l-familia-pinaceae.pdf>. [Accedido: 17 jun. 2025].
- [25] M. Cattaneo, y R. Methol. *Desarrollo de una raza local de Pinus taeda: Avances en investigación*. INIA, 2004. [En línea]. Disponible: <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7780/1/ST-159-349-358.pdf> [Accedido: 17 jun. 2025].
- [26] E. Coronel, *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*, 1994. pp. 43-45. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/603394960/Coronel-Maderas-i>. [Accedido: 18 jun. 2025].
- [27] O. Pereyra, y M. Gelid. *Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de Pinus taeda para plantaciones de Misiones y Norte de Corrientes*. Revista Floresta, vol. 33, n.º 1, pp. 3-19, 2002. [En línea]. Disponible: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/2308/1928>. [Accedido: 18 jun. 2025].
- [28] M. Suirezs y G. Berger. *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Editorial Universitaria de Misiones, Cuaderno de cátedra. pp. 20-37. [En línea]. Disponible: https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitaes/f5_978-950-579-154-5.pdf. [Accedido: 22 jun. 2025].
- [29] R. A. Winck, H. E. Fassola y M. C. Área, “Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de Pinus taeda”, *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol.17 n.º 2, pp. 37-63, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2015000200017&script=sci_arttext. [Accedido: 31 may. 2025].
- [30] J. Barnett, J. Gril, y P. Saranpää. *Introduction*. En B. Gardiner, J. Barnett, P. Saranpää, y J. Gril (Eds.), *The Biology of Reaction Wood*. Springer, pp. 1-11, 2014. [En línea]. Disponible: <https://hal.science/hal-01452015/document>. [Accedido: 18 jun. 2025].

- [31] A. Perez del Castillo, R. Castro y S., Ohta, "*Ensayos de Propiedades Mecánicas de Pinus taeda Por Seis Métodos No Destructivos.*" Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA (1998-2003), pp. 18-19, 2000. [En línea]. Disponible: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562. [Accedido: 23 jun. 2025].
- [32] Agriculture Handbook, *Wood Handbook*; Wood as an engineering material, USDA, pp. 131-132, 1999. [En línea]. Disponible: https://www.precisebits.com/PDF/fpl_gtr190.pdf. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [33] A. Perez del Castillo, R. Castro y S. Ohta, "*Ensayos de Propiedades Mecánicas de Pinus taeda Por Seis Métodos No Destructivos.*" Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA (1998-2003) pp. 1-2, 2000. [En línea]. Disponible: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562. [Accedido: 23 jun. 2025].
- [34] M. Basterrechea, *Comparación de las técnicas no destructivas de tomografía ultrasónica y resistencia a la perforación en la evaluación de discos de madera.* Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Estadual de Campinas, 2016. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/44444/1/PFC_MAR_AINHOA_BASTERRECHEA_AREVALO.pdf. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [35] G. Iñiguez. *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.415>. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [36] R. Tuset y F. Durán, *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización.* Montevideo, Uruguay: Hemisferio Sur, 1979.
- [37] C. Olivera y P. Cárdenas, *Evaluación de las propiedades físicas fundamentales, mecánicas y clasificación visual de tablas de madera de una plantación de Eucalyptus grandis Maiden ex Hill del departamento de Durazno de 26 años de edad,* tesis de Ing. Agr., Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay, 2007. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.fagro.edu.uy/iah/textostesis/2007/3555oli.pdf>. [Accedido: 27 jul. 2025].
- [38] M. Refort y G. Keil, "Importancia y determinación de las propiedades mecánicas de la madera" *Contacto Rural*, n° 1, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62492>. [Accedido: 5 oct. 2024]
- [39] L. Acuña et al. "La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural", *Revista de Obras Públicas*, vol. 162, n° 3142. pp. 57-68, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/6736269/LA_TRANSMISI%C3%93N_DE_ULTRASONIDOS_APLICADA_A_LA_MADERA_ESTRUCTURAL. [Accedido: 7 oct. 2024].
- [40] P. Y. Fank. y C. A. Mastrandrea, "Validación de un método acústico no destructivo para la determinación de la rigidez de tablas aserradas de pino resinoso (*Pinus elliotti* y *Pinus taeda*) cultivado en el nordeste de Argentina" *Revista Yvyrareta: País de Árboles*, vol. 11,

- n.º 24, pp. 114-121, 2017. [En línea]. Disponible en:
<https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/2669>. [Accedido: 5 oct. 2024].
- [41] G. Cueto, *Influencia del raleo sobre la productividad y calidad de la madera en Eucalyptus grandis*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2012. [En línea]. Disponible en:
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1849/1/0090cue.pdf>.
 [Accedido: 19 jun. 2025].
- [42] E. Macdonald, J. A. Hubert. *Review of the effects of silvicultura on timber quality of Sitka spruce*. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, vol. 75, n.º 2, pp. 107-138, 2002. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [43] H. García, G. Saravia, J. Chagas, A. Lopes, y A. Carvalho. “*Avaliação de um modelo de distribuição diâtrica ajustado para povoamento de Eucalyptus sp. submetidos a desbaste*”. *Revista Árvore*. Viçosa, vol. 29, n.º 2, pp. 271-280, 2005. [En línea]. Disponible:
<https://www.scielo.br/j/rarv/a/MKnK5TFpbzDZM8Mw7GMzknG/?lang=pt>. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [44] M. Espinosa y F. Muñoz. *Silvicultura de las plantaciones. Apuntes de clase*. Universidad de Concepción. Facultad de ciencias forestales, Departamento de Silvicultura, 2005. [En línea]. Disponible: https://www2.udec.cl/~fmunoz/Apuntes_Silvicultura_Plantaciones.pdf. [Accedido: 19 jun. 2025].
- [45] E. Jelavic, D. Jud, P. Egli y M. Hutter, "Towards Autonomous Robotic Precision Harvesting: Mapping, Localization, Planning and Control for a Legged Tree Harvester", arXiv preprint arXiv:2104.10110, 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://arxiv.org/abs/2104.10110>. [Accedido: 13 nov. 2024].
- [46] L. Caraballo, F. Correa y A. Cordatti, *Modelo para la planificación eficiente del transporte forestal: un análisis del transporte bimodal de trozas en Uruguay*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29898>. [Accedido: 13 nov.2024]
- [47] J. Pérez, "Clasificación de trozas utilizando tecnologías avanzadas: escaneo láser y visión artificial," *Revista de Tecnología Forestal*, vol. 28, n.º. 4, pp. 231-245, 2023.
- [48] R Core Team, R: *A language and environment for statistical computing*. *R Foundation for Statistical Computing*, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.R-project.org>. [Accedido: 1 jul. 2024].
- [49] S. Shapiro y M. Wilk, “An analysis of variance test for normality (complete samples).” *Biometrika*, vol. 52, n.º, 3/4. pp. 591-611, 1965. [En línea]. Disponible:
<https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>. [Accedido: 1 jul. 2024].
- [50] H. Levene. *Robust tests for equality of variances. Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*, pp. 278-292, 1960.

- [51] B. L. Welch, “*On the test of equality of variances.*” *Biometrika*, vol. 38, n.º ¾, pp. 553-570, 1951. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.553>. [Accedido: 11 jul. 2024].
- [52] M. Friedman, “*The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance*”. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 32, n.º 200, pp. 675-701, 1937. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>. [Accedido: 12 jul. 2025].
- [53] P. A. Games y J. F. Howell, “*Pairwise multiple comparison tests with unequal N's and/or variances: A Monte Carlo study.*” *Journal of Educational Statistics*, vol. 1, n.º 2, pp. 113-125, 1976. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3102/10769986001002113>. [Accedido: 11 jul. 2024].
- [54] M. Meneses, *Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de Pinus radiata D Don. en tres condiciones de sitio*, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifn325c/doc/fifn325c.pdf#:~:text=En%20la%20pr%C3%A1ctica%20la%20densidad%20de%20la,esta%20muy%20cercana%20a%20los%201000%20kg/m3>. [Accedido: 31 may. 2025].
- [55] B. Wielinga, C. A. Raymond, R. James y A. C. Matheson. “*Effect of Green Density Values on Pinus radiata Stiffness Estimation using a Stress-wave Technique*” *New Zealand Journal of Forestry Science*, n.º 39, 2009. [En línea]. Disponible: https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0013/4270/NZJFS-392009-71-79_WIELINGA.pdf. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [56] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.)*. Lawrence Erlbaum Associates, 1998.
- [57] Madera estructural. *Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Norma Española UNE-EN 384:2016-A1, pp. 9-13, 2020.
- [58] Estructuras de madera. *Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia*. Parte 1: Requisitos generales. Norma Española UNE-EN 14081-1:2016+A1, 2020.
- [59] Estructuras de madera. *Estructura aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Norma Española UNE- EN 408:2011+A1. pp. 7-13, 2019.
- [60] Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. *Parte 3: Estimación por método capacitivo*. Norma Española UNE-EN 13183-3. pp. 6-9, 2006.
- [61] Estructura de madera. *Determinación y verificación de los valores característicos*. Norma Española UNE-EN 14358. pp. 7-11, 2016.
- [62] G. Box, “*Non-Normality and Tests on Variances*”. *Biometrika*, vol. 40, n.º ¾, pp. 318-335, 1953. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.2307/2333350>. [Accedido: 12 jul. 2025].

- [63] G. V. Glass, P. D. Peckham, y J. R. Sanders, “*Consequences of failure to meet assumptions underlying the fixed effects analyses of variance and covariance*”, Review of Educational Research, vol. 42, n°3, pp. 237-288, 1972. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3102/00346543042003237>. [Accedido: 12 jul. 2025].
- [64] J. V. Bradley, “*Robustness?*”, British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, vol. 31, n°2, pp. 144-152, 1978. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1978.tb00581.x>. [Accedido: 12 jul. 2025].
- [65] M. J. Blanca, R. Alarcón, J. Arnau, R. Bono, y R. Bendayan, “*Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?*” Psicothema, vol. 29, n° 3, pp. 552-557, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.psicothema.com/pdf/4434.pdf>. [Accedido: 12 jul. 2025].
- [66] R. Martiarena. “*Efecto del raleo sobre el crecimiento y la densidad de la madera de Pinus taeda implantado en Misiones, Argentina*”. Revista: Ciência Florestal. Editorial: Centro Pesquisas Florestais, vol.24, n°3, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/WnnPb7KhSFhxL5hbSqSySgQ/>. [Accedido: 29 jun. 2025].
- [67] R. Winck, H. Fassola y M Área. “*Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de Pinus taeda*”. Revista: Maderas. Ciencia y tecnología, vol.17, n.º 2, pp. 395-402, 2015. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2015000200017. [Accedido: 29 jun. 2025].
- [68] L. Soto, L. Valenzuela y J. P. Lasserre, “*Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de Pino radiata de 28 años, en la zona de arenas, Chile*”, Maderas. Ciencia y tecnología, vol. 14, n°2, 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2012000200008&script=sci_abstract. [Accedido: 31 may. 2025].
- [69] M. A. Butler *et al.* “*Acoustic evaluation of loblolly pine tree- and lumber-length logs allows for segregation of lumber modulus of elasticity, not for modulus of rupture.*” Annals of Forest Science, vol.74, n° 2, pp. 3-7, 2017. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0615-9>. [Accedido: 07 jun. 2025].
- [70] X. Wang, R. Ross y P. Carter, “*Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. acoustic wave behavior.*” Wood and Fiber Science, vol. 39, n° 1, pp. 28-38, 2007.
- [71] H. O’Neill. *Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos*. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, 2004. [En línea]. Disponible: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=27673 [Accedido: 29 jun. 2025].
- [72] F. Isik, C. Mora y L. Schimleck. *Genetic variation in Pinus taeda wood properties predicted using non-destructive techniques*. Annals of Forest Science, n°68, 2011. [En línea]. Disponible: https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-011-0035-9?utm_source=chatgpt.com. [Accedido: 29 jun. 2025].

- [73] C. Mora *et al.*, *Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing Pinus taeda trees*. Forest service. U. S. Department of Agriculture. Journal Article Canadian Journal of Forest Research 39, pp. 1421-1429, 2009. [En línea]. Disponible: https://research.fs.usda.gov/treearch/33658?utm_source=chatgpt.com. [Accedido: 29 jun. 2025].
- [74] Madera de uso estructural. *Madera aserrada de uso estructural – Clasificación visual – Madera de pino taeda y pino ellioti (Pinus taeda y Pinus elliotii)*. NORMA UNIT 1261, pp. 1-19, 2018.
- [75] S. Böthig, *et al.* *Lineamiento de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de Pino y Eucalypto de Uruguay*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura representación Uruguay, pp. 15-20, 2023.
- [76] Madera de uso estructural. Estructura de madera – Madera laminada encolada – Requisitos de fabricación. NORMA UNIT 1264, pp. 1-19, 2019.
- [77] Estructuras de madera. *Madera laminada encolada y madera maciza encolada*. Norma Española UNE- EN 14080, pp. 1-11, 2016.
- [78] Madera estructural. *Clases resistentes*. Norma Española UNE-EN 338, pp. 24, 2016.