

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y ANATÓMICAS DE ÁRBOLES EN
PIE DE *PINUS TAEDA* UTILIZANDO TECNOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS**

por

**Lucía Belén REVETRIA MARTÍNEZ
Paula Micaela VENER DEL ARCO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2024**

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. For. (Dra.) Ana Paula Coelho Duarte

Tribunal:

Ing. Agr. (MSc.) Andrés Baietto

Ing. Mat. (Dr.) Diego Passarella

Fecha:

16 de diciembre de 2024

Estudiantes:

Lucía Belén Revetria Martínez

Paula Micaela Vener Del Arco

AGRADECIMIENTOS

A nuestra tutora, Dra. Ing. For. Ana Paula Coelho por el apoyo, dedicación, compromiso y predisposición durante todo el transcurso de realización de la tesis.

A la Universidad de la República, especialmente a nuestra institución Facultad de Agronomía, por la formación recibida.

A Ing. Química Silvia Böthig por los aportes enriquecedores y por permitirnos realizar las prácticas en Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

A todas las aquellas personas que de una u otra forma estuvieron acompañándonos.

En primer lugar, mi más profundo agradecimiento a Nicolás Pérez, con quien comparto la vida hace ya 6 años, siendo la mayor fuente de motivación en cada paso que doy, en especial en este largo recorrido académico. Su apoyo fue esencial para llegar hasta aquí.

A Gabriela Da Riva y Gustavo Pérez, por abrirme las puertas de su hogar y hacerme sentir parte de su familia. Sus palabras de aliento y constante apoyo me han acompañado en los momentos más difíciles, por lo que no tengo suficientes palabras para expresar mi eterno agradecimiento.

A mis tías quienes y tío, sin darse cuenta, fueron pilares importantes no sólo en el proceso académico sino en las distintas adversidades que se presentaron a lo largo de los años.

Por último, pero no menos importante, a mi querida abuela Graciela y a Margarita, por todo su cariño.

Paula Micaela Vener Del Arco.

El más profundo agradecimiento a mis padres y mis hermanos, por ser el pilar fundamental durante este largo trayecto de formación terciaria, por cada empujoncito para lograr cada meta.

A mi pareja, mis abuelos y al resto de mi familia, tíos/as, primas/os por cada mensajito de aliento antes o después de alguna evaluación, y por acompañarme en esta etapa transitada.

Un agradecimiento especial a mi prima María Cecilia Revetria, por ser esa persona impulsora desde antes de comenzar la carrera y durante todo el trayecto de la misma, por abrirme las puertas de su hogar, acompañarme y hacerme las cosas más sencillas en varias ocasiones.

Por último, a mis amigas por los momentos compartidos durante la convivencia y también por el apoyo a la distancia.

Lucía Belén Revetria Martínez.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3 HIPÓTESIS.....	13
2. CARACTERIZACIÓN DE <i>PINUS TAEDA</i>	14
2.1 ORIGEN Y DESCRIPCIÓN.....	14
2.2 ANATOMÍA DE <i>PINUS TAEDA</i>	15
2.2.1 Traqueidas	15
2.2.2 Pared celular	16
2.2.3 Canales resiníferos y resina	17
2.2.4 Densidad.....	17
3. MADERA DE <i>PINUS TAEDA</i>	19
3.1 MADERA NORMAL.....	19
3.2 DENDROCRONOLOGÍA Y ANILLOS DE CRECIMIENTO	20
3.3 MADERA DE REACCIÓN-COMPRESIÓN.....	21
4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES EN PIE	24
4.1 TOMÓGRAFO SÓNICO (FAKOPP)	25
4.2 ULTRASONIDO (SYLVATEST DUO).....	29
4.3 RESISTÓGRAFO (PENETRÓGRAFO).....	30

4.4 DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LA MADERA CON EL USO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	33
5. MODELO ÁRBOL DE DECISIÓN	35
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
6.1 LOCALIZACIÓN DEL PREDIO	36
6.2 SELECCIÓN DEL SITIO (RODAL).....	36
6.3 PRESELECCIÓN DE ÁRBOLES Y MEDICIONES EN PIE.....	37
6.4 SELECCIÓN FINAL DE ÁRBOLES	39
6.5 MARCACIÓN DE LOS ÁRBOLES SELECCIONADOS	39
6.6 APEO Y CORTE DE LOS DISCOS.....	40
6.6.1 Previo al apeo.....	40
6.6.2 Post apeo y en el monte.....	41
6.6.3 Corte de los discos	41
6.7 MEDICIONES CON EQUIPOS	42
6.7.1 Tomógrafo sónico	42
6.7.2 Resistógrafo	44
6.7.3 Clasificación visual de MC.....	47
6.7.4 Ultrasonido	47
6.8 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD	49
6.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	51
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
7.1 CLASIFICACIÓN VISUAL.....	53
7.2 RESISTÓGRAFO	55
7.3 TOMÓRGRAFO SÓNICO , ULTRASONIDO Y DENSIDAD	57
7.4 MODELO ÁRBOL DE DECISIÓN.....	60

8. CONCLUSION.....	63
9. BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Resumen del manejo silvícola presentado por LUMIN para el rodal seleccionado	37
Tabla 2 Clase según diámetro.....	38
Tabla 3 Árboles seleccionados según clase diamétrica.....	39
Tabla 4 Coeficiente de correlación de Spearman para cada indicador	56
Tabla 5 Coeficiente de correlación de Spearman entre equipos y con la densidad	58
Tabla 6 Coeficiente de correlación de Spearman por equipo según presencia y clasificación de MC.....	59
Tabla 7 Resultados del desempeño del modelo.....	62
Figura 1 Área de distribución natural (DN) de <i>P. taeda</i>	14
Figura 2 Leño temprano y leño tardío claramente diferenciados en <i>Pinus taeda</i>	15
Figura 3 Pared de una traqueida con sus capas	16
Figura 4 Esquema de un canal resinífero	17
Figura 5 Corte transversal observándose los anillos de crecimiento.....	20
Figura 6 Formación de madera de compresión	22
Figura 7 Corte transversal de madera de <i>P. taeda</i> al microscopio óptico	22
Figura 8 Equipo Fakopp.....	26
Figura 9 Operario utilizando el Fakopp	27
Figura 10 Malla de difracción con las rutas de medición con propagación radial y tangencial.....	28
Figura 11 Tomograma obtenido para el disco C17	29
Figura 12 Equipo de Ultrasonido (Sylvatest Duo)	30
Figura 13 Esquema del equipo (resistógrafo) junto a la salida (resistograma)	31
Figura 14 Perfil de perforación en <i>Picea abies</i>	32
Figura 15 Resistograma de un árbol con pudrición.....	33
Figura 16 Imagen satelital del rodal seleccionado.....	36
Figura 17 Representación de la marcación de los árboles seleccionados con los sensores normales y emisores Ludwig.....	40

Figura 18 Flujo operativo del tomógrafo acústico ArborSonic 3D	42
Figura 19 Ejemplo de tomograma obtenido, en este caso para rodaja A7	43
Figura 20 Ejemplo de resistograma obtenido en el software (derecha) y gráfico de los indicadores (izquierda).....	46
Figura 21 Esquema de las mediciones realizadas según las diferentes técnicas no destructivas, densidad y evaluación visual.....	48
Figura 22 Posicionamiento de los equipos para realizar las mediciones	48
Figura 23 <i>Rodaja C14 dividida en las 16 cuñas para determinación de densidad aparente básica</i>	49
Figura 24 Dispositivo para obtener Ps en LATU	50
Figura 25 Relación entre el ancho del lumen y la presencia/ausencia de MC	53
Figura 26 Relación entre el espesor de la pared celular y la presencia/ausencia de MC....	54
Figura 27 Relación entre la longitud de traqueidas y la presencia/ausencia de MC	54
Figura 28 Correlación entre el ancho de los anillos de crecimiento y ancho en resistograma	55
Figura 29 Forma del anillo de crecimiento con MC.....	57
Figura 30 Importancia relativa de las diferentes variables explicativas en la predicción de MC	60
Figura 31 Modelo árbol de decisión que predice la presencia de madera de compresión..	61

RESUMEN

La madera de compresión (MC) se forma en las gimnospermas en la parte inferior de las ramas y troncos inclinados como un mecanismo biomecánico de adaptación, lo que genera un efecto negativo para la industria. Por lo tanto, es fundamental desarrollar metodologías que permitan detectar la presencia de MC en árboles en pie para evitar que este material llegue a los procesos industriales. Con este objetivo, se evaluaron ensayos no destructivos (END) para la detección temprana de MC en árboles en pie de *Pinus taeda*. Se seleccionaron dieciocho árboles siguiendo criterios fenotípicos, y se realizaron mediciones utilizando un tomógrafo sónico (Fakopp), Ultrasonido (Sylvatest) y resistógrafo (penetrómetro). Además, se determinaron propiedades físicas y se llevó a cabo una evaluación visual de la presencia de MC. Los resultados indicaron que el resistógrafo es el equipo que presenta la mayor correlación con la MC; sin embargo, es recomendable utilizar estas técnicas en conjunto, ya que se ha observado una complementariedad entre ellas. Es necesario continuar con estudios que permitan identificar la mejor combinación de END y reducir el error del modelo (árbol de decisión) propuesto para la estimación de MC en árboles en pie.

Palabras clave: madera de compresión, tomografía sónica, tomografía ultrasónica, resistografía, pinos

ABSTRACT

Compression wood (CW) is formed in gymnosperms in the lower part of branches and inclined trunks as a biomechanical adaptation mechanism, which generates a negative effect for the industry. Therefore, it is essential to develop methodologies to detect the presence of CW in standing trees to prevent this material from reaching industrial processes. With this objective, nondestructive testing (NDT) for the early detection of CW in standing trees of *Pinus taeda* was evaluated. Eighteen trees were selected according to phenotypic criteria, and measurements were made using a sonic tomograph (Fakopp), ultrasound (Sylvatest) and resistograph (penetrometer). In addition, physical properties were determined and a visual evaluation of the presence of CW was performed. The results indicated that the resistograph is the equipment that presents the highest correlation with CW; however, it is advisable to use these techniques together, since a complementarity between them has been observed. It is necessary to continue with studies to identify the best combination of NDT and reduce the error of the model (decision tree) proposed for the estimation of CW in standing trees.

Keywords: compression wood, sonic tomography, ultrasonic tomography, resistography, pine trees

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal ha presentado un fuerte crecimiento en Uruguay. En la década del 60 se empezó a ver como un sector viable y fue impulsado por la primera y segunda ley forestal (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], 2018). La primera Ley Forestal N° 13.723 (1968) fue aprobada en 1968 y quedó operativa a partir del 1975; con esta, el impuesto IMPROME (Impuesto a la Productividad Mínima Exigible) se invierte en plantaciones forestales aprobadas y calificadas como bosques protectores o de rendimiento por la Dirección General Forestal (DGF), así como también se incentivó a productores agropecuarios a incorporar la forestación a sus actividades productivas a través de exoneraciones impositivas. Como consecuencia de esta primera Ley Forestal, se plantaron 15.000 ha y, a finales de los 80, se dieron las primeras exportaciones forestales como rolos pulpables (Soust, 2012).

Luego de eso, el sector no disponía de un marco legal ni de incentivo a la actividad, por lo que su desarrollo se estancó; esto derivó en la aprobación de la segunda Ley Forestal N° 15.939 (1987), con el fin de desarrollar la industria nacional (Soust, 2012). En esta Ley, además, se establecen los requisitos a cumplir en la instalación y/o exportación de un recurso forestal para que sea legítimo; por lo que todo proyecto forestal presentado a la DGF y Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), para ser aceptado, debe cumplir con los requisitos.

Actualmente, según la DGF (2023) al año 2021, la superficie forestada consta de 1.108.371 ha efectivas; del total de esa superficie, sólo 145.000 ha representan a *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*, y entre estas la primera ocupa el 86,6%, ubicándose en Rivera, Tacuarembó y Paysandú.

En cuanto a los usos, la madera de *P. taeda* es reconocida a nivel mundial por sus destacadas propiedades tecnológicas (Cattaneo & Methol, 2004). En Uruguay, se destina principalmente a la obtención de productos de madera sólida a través de procesos industriales (Cattaneo & Methol, 2004). Por lo tanto, es de fundamental importancia la calidad de esa madera para obtener eficiencia en dichos procesos. En ese sentido es que en plantaciones de *Pinus* es de fundamental importancia llevar a cabo un adecuado calendario de podas y raleos, para disminuir la incidencia de nudos y aumentar así la madera clear.

Por otro lado, otro aspecto que afecta la calidad de la madera es la presencia de madera de compresión (MC). En el presente trabajo, se pretende estimar propiedades físicas y presencia de MC de árboles en pie de *P. taeda* utilizando tecnologías no destructivas como el resistógrafo, tomógrafo sónico y Ultrasonido, verificando si los resultados de estas técnicas se correlacionan con la realidad.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la densidad de la madera y presencia de MC en árboles de *P. taeda* partir de indicadores obtenidos mediante el uso de tecnologías no destructivas (resistógrafo, tomógrafo sónico y Ultrasonido).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la densidad básica de la madera de *Pinus taeda*.
2. Estudiar los anillos de crecimiento respecto al ancho de leño temprano y leño tardío por año e identificar visualmente la presencia de MC u otros defectos.
3. Desarrollar indicadores de forma a partir de los resistogramas y tomogramas.
4. Correlacionar los datos obtenidos a partir de las tecnologías no destructivas con los datos de densidad, ancho de los anillos y presencia de MC.

1.3 HIPÓTESIS

1. El ancho de los anillos de crecimiento calculados con el resistógrafo se correlaciona al ancho dendrológico medido manualmente.
2. Los indicadores de forma utilizados se correlacionan con la presencia de MC.
3. La energía del resistograma varía con la presencia de MC.
4. El módulo de elasticidad (MOE) dinámico del tomógrafo sónico se correlaciona positivamente con el MOE dinámico del ultrasonido.
5. La densidad de la madera aumenta en presencia de MC.

2. CARACTERIZACIÓN DE *PINUS TAEDA*

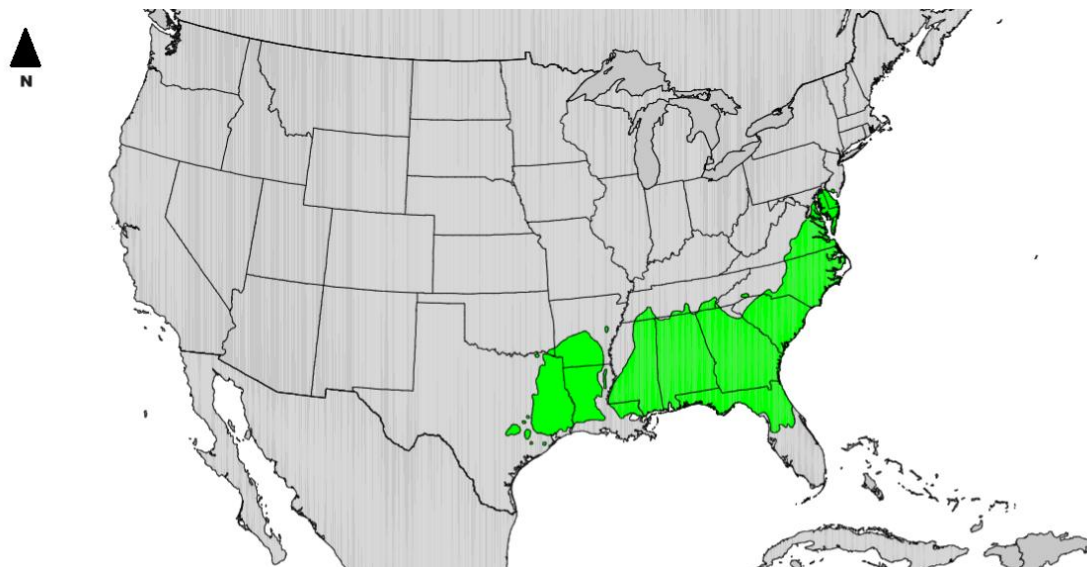
2.1 ORIGEN Y DESCRIPCIÓN

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 (Díaz et al., 2019).

Según Di Marco (2014), la especie *P. taeda* es originaria del sudeste de Estados Unidos (ver figura 1), 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.

Figura 1

Área de distribución natural (DN) de *P. taeda*



Nota. En verde DN de *P. taeda*. Tomado de Little (1971).

En Uruguay, *P. taeda* es la especie más plantada del género *Pinus*, siendo la madera 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 (Cattaneo & Methol, 2004).

Las maderas de los pinos se clasifican comúnmente en maderas blandas y duras según su dureza y densidad relativa. En el caso de *P. taeda*, se considera de madera blanda; dentro de las características de este tipo de madera, se destaca la liviandad por una menor densidad que las maderas duras, coloraciones claras, pocos canales resiníferos, así mismo también presentan menor durabilidad natural en uso exterior y en contacto con el suelo, pero se puede mejorar con tratamientos químicos como el uso de preservantes (Hurrell & Bazzano, 2007).

2.2 ANATOMÍA DE *PINUS TAEDA*

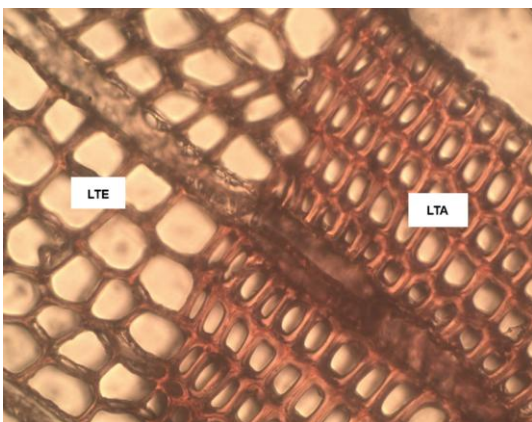
2.2.1 Traqueidas

En cuanto a la anatomía de la madera de *Pinus*, al tratarse de una conífera tienen una estructura menos heterogénea, donde las células principales 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 (Hurrell & Bazzano, 2007).

Las traqueidas del leño temprano son células que presentan la pared celular delgada, con el lumen grande presentando forma poligonal en corte transversal (ver figura 2) y su función es el transporte de sustancias. Por otro lado, las traqueidas del leño tardío presentan paredes celulares gruesas, lumen pequeño, presentando forma rectangular en un corte transversal (ver figura 2), siendo la función de estas, el sostén (Hurrell & Bazzano, 2007)

Figura 2

Leño temprano y leño tardío claramente diferenciados en Pinus taeda



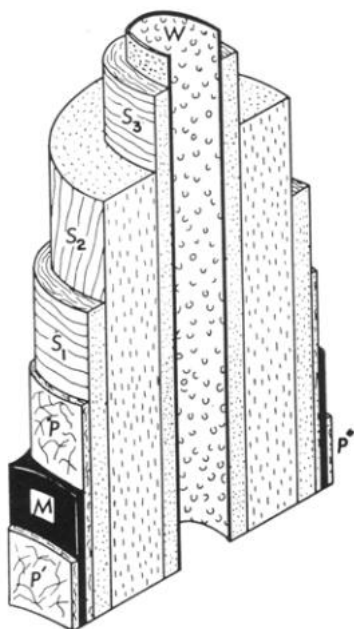
Nota. LTA: Leño tardío. LTE: Leño temprano.

2.2.2 Pared celular

En cuanto a la pared celular, según Giménez et al. (2005), esta se divide en lámina media, pared primaria, pared secundaria (capa S1, S2 y S3) y la capa verrugosa (ver figura 3).

Figura 3

Pared de una traqueida con sus capas



Nota. P: Pared primaria. M: Lámina media. S1, S2 y S3: Capas de la pared secundaria. W: Capa verrugosa. Tomado de Giménez et al. (2005).

La formación de la célula comienza con la formación de la pared primaria, que es elástica, lo cual permite acompañar el crecimiento de la célula en su diferenciación; al alcanzarse el tamaño definitivo de la célula, se da la deposición de la pared secundaria con sus diferentes capas: S1, S2 y S3 (Giménez et al., 2005). La capa de mayor relevancia es la capa S2 debido a su mayor tamaño; en esta el ángulo microfibrilar (AMF) es pequeño, dando como resultado un alto módulo de elasticidad (Barnett et al., 2014).

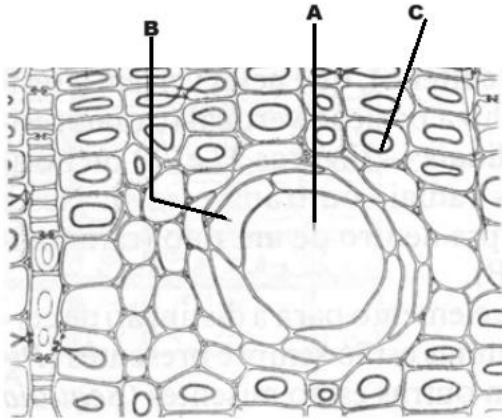
En paralelo al depósito de la pared secundaria, se da el proceso de lignificación (de afuera hacia adentro), siendo más intenso en la lámina media y en la pared primaria; las células meristemáticas y la mayoría de las parenquimáticas no están lignificadas (Fromm, 2013). En cuanto a la capa verrugosa, son restos de protoplasma que puede aparecer revistiendo el lumen (Giménez et al., 2005).

2.2.3 Canales resiníferos y resina

Una particularidad de estas coníferas es la presencia de canales resiníferos (ver figura 4), los que están rodeados de células parenquimáticas que se especializan en la producción de resina y la vierten en los canales resiníferos (Giménez et al., 2005).

Figura 4

Esquema de un canal resinífero



Nota. A: Canal resinífero. B: Células epiteliales. C: Células parenquimáticas. Adaptado de Giménez et al. (2005).

2.2.4 Densidad

La densidad de la madera se puede discriminar como densidad real y densidad aparente. Para Pereyra y Gelid (2002) la densidad real de la madera corresponde al peso real del material leñoso descontándose los espacios porosos; mientras que, la densidad aparente es la relación entre la masa y volumen sin descontar los espacios porosos.

Si bien la densidad es una propiedad física, está se relaciona a la cantidad y tipo de células, así como la disposición de éstas en la madera, es decir, se correlaciona con la anatomía y al contenido de humedad de esa madera; dado que se trata de un material higroscópico, tanto la masa como el volumen varían con el contenido de humedad, por lo que, al determinar la densidad se debe especificar en qué condiciones se hizo (Pereyra & Gelid, 2002).

Al no ser un valor estándar, se encuentra variaciones incluso dentro de un mismo individuo. Megraw (1985) encontró que la densidad de *P. taeda* aumenta desde la médula hacia la parte externa en sentido radial. Así mismo, se determinó que la densidad varía según la proporción

de madera juvenil y madera adulta. En ese sentido, los árboles más viejos presentan mayor densidad por un mayor contenido de madera adulta (Megraw, 1985).

Peterson (1967) demostró que la densidad es mayor en el leño tardío que en el leño temprano debido a una mayor proporción de pared celular en las traqueidas; por otro lado, según Erikson y Harrinson (1974) como se cita en Pereyra y Gelid (2002), la tasa de crecimiento también genera variaciones en la densidad, por lo que, un aumento acelerado de la tasa de crecimiento repercute en un aumento en la proporción de leño inicial, reduciéndose así la densidad.

Resumiendo, a partir de lo que expresan los autores citados en este apartado, la densidad es un valor variable y dependiente de varios factores, por lo que no se puede establecer un valor de referencia. Sin embargo, para Trendelenburg y Mayer-Wegelin (1956) como se cita en Pereyra y Gelid (2002), la determinación de la densidad de la madera es de fundamental importancia debido a su relación con las propiedades físicas y mecánicas.

3. MADERA DE *PINUS TAEDA*

3.1 MADERA NORMAL

Según Barnett et al. (2014), el término madera normal (MN) hace referencia a la madera que tiene las propiedades más deseadas por la industria maderera, tales como, fibra recta, alta densidad, alta resistencia a la flexión y contracción uniforme sin deformación en el secado.

Según Bocage et al. (2000), la MN se divide en madera juvenil y madera adulta: la primera se forma en el centro del árbol cuando éste es joven; dicha madera presenta características físicas y mecánicas inferiores a la madera adulta, dado que, cuando el árbol es joven busca crecer obteniéndose peores características mientras que, en la adultez ya equilibró las tensiones y por eso las características son superiores, así, dicha madera adulta se encuentra en la periferia de la madera.

Cuando se habla de características físicas y mecánicas inferiores se hace referencia a que, en la madera juvenil es común que se encuentre menor densidad, traqueidas más cortas, paredes celulares delgadas, baja cantidad de celulosa y mayor cantidad de lignina, mayor AMF y mayor proporción de MC (Bocage et al., 2000). El hecho de tener menor cantidad de celulosa y mayor cantidad de lignina hace que la madera sea menos resistente y con menor rendimiento pulpable por la menor cantidad de celulosa, pero rígida debido al mayor contenido de lignina (Bocage et al., 2000).

Por otro lado, el AMF indica la resistencia a la tracción longitudinal y, en la medida que este ángulo sea mayor, la resistencia es menor. Justamente, la madera juvenil tiene un mayor AMF con relación a la adulta, esto hace que tenga menor resistencia a la tracción, así como problemas durante el secado de la madera que lleva a que se produzcan fallas como alabeos (Donaldson, 2008).

Particularmente en *P. taeda*, según Megraw (1986) como se cita en Plada y Stockle (2011), establecen que, en madera adulta el AMF es de 5-10°C mientras que, en la madera juvenil se dan valores de 25-30° alcanzándose valores de hasta 50° en los anillos junto a la médula.

3.2 DENDROCRONOLOGÍA Y ANILLOS DE CRECIMIENTO

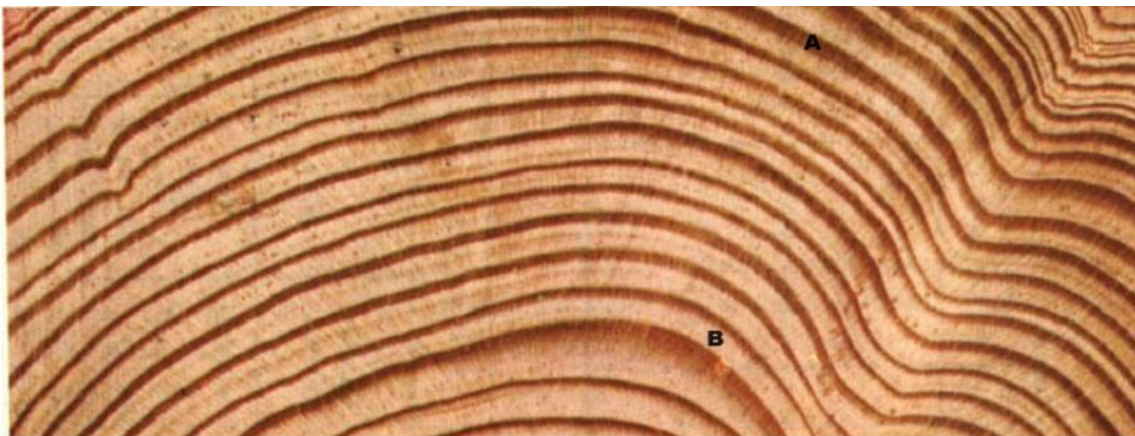
La dendrocronología estudia los anillos de crecimiento en la madera de los árboles con el fin de obtener, por ejemplo, información tal como la edad del árbol o climatología a la que el mismo estuvo expuesto (Paiz, 2020).

Los anillos de crecimiento se pueden observar al realizar un corte transversal de la madera. En zonas de clima templado, como en Uruguay, pueden representar el incremento anual del árbol (Frank et al., 2019). Los anillos se dividen en leño temprano y leño tardío (ver figura 5).

La madera del leño temprano, también llamado de primavera o inicial, presenta células de paredes delgadas y lumen grandes, por lo que la coloración resultante del conjunto de células es clara; dicha madera se desarrolla al inicio del periodo vegetativo, momento en que se reinicia la actividad del árbol luego de la dormancia (Giménez et al., 2005). Por otro lado, la madera de leño tardío, también llamado leño de otoño, se desarrolla a fines del periodo vegetativo; las paredes de esas células son más gruesas y con lúmenes más pequeños que en el leño temprano, esto como consecuencia de la disminución de la actividad de esas células. A simple vista el leño tardío se distingue por presentar coloración más oscura debido al grosor de las paredes celulares (Giménez et al., 2005).

Figura 5

Corte transversal observándose los anillos de crecimiento



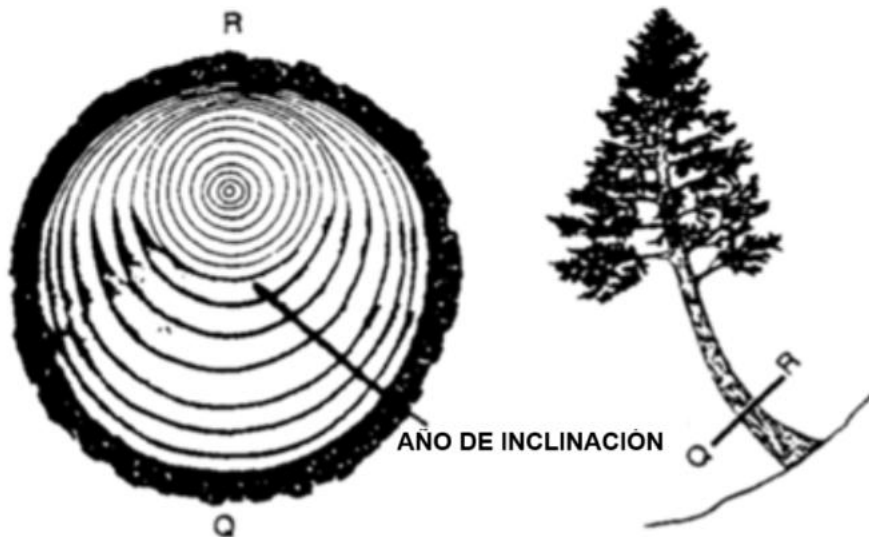
Nota. A: Leño tardío. B: Leño temprano. Adaptado de Giménez et al. (2005).

Según Hermoso (2001) como se cita en Frank et al. (2019) para la mayoría de las coníferas, la densidad aparente aumenta con la disminución del ancho de los anillos de crecimiento, dado que, cuanto más ancho es el anillo mayor cantidad de leño temprano formado, el cual se caracteriza por tener baja densidad aparente; así mismo, los anillos de crecimiento anchos implican baja resistencia. Lo anterior toma importancia en la madera para usos estructurales, donde se busca un ancho de anillos pequeño para evitar que la madera sea de baja resistencia.

3.3 MADERA DE REACCIÓN-COMPRESIÓN

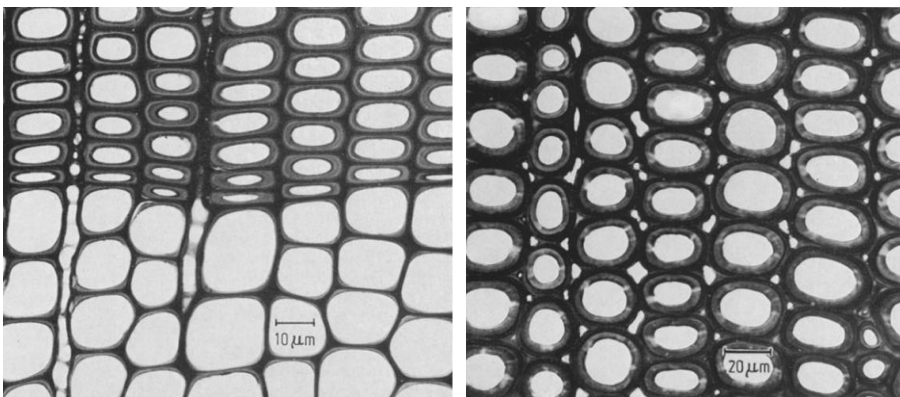
Para Tocquard (2014) como se cita en Gomes y Saracho (2023), la madera de reacción se origina en troncos inclinados y ramas de plantas leñosas; su formación es en respuesta a la fuerza gravitacional con el objetivo de superar la inclinación del fuste, buscando que este crezca recto y, para esto, se dan variaciones en la actividad del cambium que conducen a cambios en la anatomía del xilema, formándose así la madera de reacción. Existen dos tipos de madera de reacción: la madera de compresión, presente en coníferas, y la madera de tracción en latifoliadas.

La MC se forma en la parte inferior de las ramas o troncos inclinados (ver figura 6). Según Van Der Sijde et al. (1985), esta madera es resultado del aumento de la actividad local del cámbium; la apariencia de esta madera es de coloración rojiza (más oscura que la MN) debido a una mayor proporción de lignina, presenta textura áspera, mayor densidad y dureza que la MN, y en corte transversal de un tronco generalmente se observa la médula excéntrica. Al tener mayor proporción de lignina en comparación a la celulosa, esta madera es más frágil debido a una fase plástica más acotada, pudiéndose producir el colapso repentino.

Figura 6*Formación de madera de compresión*

Nota. Madera de compresión en el árbol en pie (derecha) y corte transversal de un fuste (izquierda) donde se observa la médula excéntrica. Adaptado de Degraff y Agard (1984).

Según Parham y Côté (1971), las paredes celulares son más gruesas que en MN y, a su vez, las traqueidas son redondeadas, por lo tanto, existen espacios intercelulares lo que también puede conducir al colapso repentino (ver figura 7).

Figura 7*Corte transversal de madera de P. taeda al microscopio óptico*

Nota. A la izquierda traqueidas en madera normal diferenciándose el leño tardío (células superiores) y leño temprano (células inferiores). A la derecha traqueidas en madera de compresión (nótese la morfología más redondeada y mayor espacio intercelular en comparación con madera normal). Tomado de Parham y Côté (1971).

Para Barnett et al. (2014) la MC presenta un mayor AMF en la capa S2 de la pared celular, por lo que, tiene menor resistencia a la tracción longitudinal, a su vez, se reduce el módulo de elasticidad (MOE) y aumenta la fragilidad de la madera. Además, esta característica hace que se aprecien deformaciones en el secado de piezas con presencia de MC.

Por otro lado, la MC se puede clasificar en: madera de compresión normal (MCN), la cual se produce por inclinación de los árboles en terrenos con pendiente; y la madera de compresión anormal (MCA), la cual tiende a formarse en árboles aparentemente rectos o no expuestos a condiciones donde tienden a generar MCN, es decir, en terrenos sin pendientes o levemente ondulados (Malan & Kassier, 2002).

Como la MCA se presenta en árboles que crecen sobre terrenos sin pendientes ni ondulaciones, presenta la dificultad de no poderse detectar previamente, lo cual es un problema para la industria en el procesamiento de los árboles, así como en la identificación de árboles sanos y afectados (Malan & Kassier, 2002).

Tal como se menciona en Barnett et al. (2014), las variaciones en las fibras y traqueidas de la MC no son más que una respuesta natural del árbol para aumentar sus posibilidades de supervivencia. Esto incluye mantener el recorrido ascendente de la copa lo más corto posible, devolver la verticalidad a los árboles parcialmente derribados por el viento, o mantener la disposición óptima de las ramas para una eficiente captación de luz.

Para el árbol, la producción de madera de reacción es tan común como generar MN. La utilización del término MN implica que la madera de reacción es anormal y carente de valor, sin embargo, según Barnett et al. (2014), los árboles tal como los conocemos no podrían haber evolucionado sin la madera de reacción, hecho que debe ser considerado en la búsqueda de mejorar la calidad de la madera.

4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES EN PIE

Las técnicas o ensayos no destructivos (END y en inglés Non Destructive Testing [NDT]) como su nombre lo indica, permiten realizar mediciones, caracterizar materiales y estructuras sin alterar o producir una alteración permanente en las propiedades físicas, mecánicas, químicas o dimensionales, pero si puede producirse algún daño mínimo en la muestra (Íñiguez, 2007). Estos ensayos son útiles para identificar, medir y evaluar defectos en los materiales, además de determinar su composición y asegurar un buen comportamiento durante su uso. En el caso de la madera, estos ensayos son particularmente importantes, ya que es fundamental conocer sus propiedades físicas y mecánicas, así como su nivel de deterioro causado por agentes bióticos o abióticos (Basterrechea, 2016).

Según Angulo-Ruiz et al. (2021) el hecho de utilizar END presenta ciertas ventajas, como rapidez en los resultados, el nivel de confiabilidad, así como disminución en la pérdida de material en comparación a los métodos tradicionales, lo que lleva a una disminución en los costos.

Estos ensayos son ampliamente utilizados en la clasificación y evaluación de madera estructural, pero están demostrando ser adecuadas para la evaluación de árboles en pie para determinar la calidad de la madera detectando defectos de manera temprana (Basterrechea, 2016).

Basterrechea (2016) clasifica los ensayos en:

- visuales;
- electromagnéticos;
- nucleares;
- acústicos;
- mecánicos.

Los ensayos acústicos se basan en medir la velocidad de transmisión del sonido en el material. La velocidad de un impulso generado por un impacto o una señal eléctrica se

determina midiendo el tiempo de propagación o la frecuencia de vibración de la pieza. Además, la emisión acústica de una pieza sometida a impactos proporciona información valiosa sobre sus propiedades mecánicas (Íñiguez, 2007).

Dentro de los ensayos acústicos se encuentra el ultrasonido que, según Basterrechea (2016), son ondas mecánicas longitudinales que no son audibles por el ser humano, con frecuencias superiores a los 20 kHz y pudiendo llegar hasta los 10^6 kHz. El funcionamiento es el mismo que el descrito para los ensayos acústicos, la diferencia está en que las frecuencias deben ser más bajas para tener mayor alcance de los impulsos y poder avanzar a través de las irregularidades en el material, dado que, las ondas ultrasónicas más largas rodean con mayor facilidad las irregularidades que las ondas más cortas.

Por otro lado, los ensayos mecánicos se basan en la aplicación de fuerzas al material para medir las deformaciones producidas por estas, así como la respuesta mecánica del material (Basterrechea, 2016).

En el presente trabajo, se emplearon ensayos acústicos y mecánicos para detectar la presencia de MC para lo cual se utilizaron los siguientes equipos: tomógrafo sónico (Fakopp), ultrasonido (Sylvatest) y resistógrafo (penetrómetro) los cuales se describen más adelante.

4.1 TOMÓGRAFO SÓNICO (FAKOPP)

El tomógrafo sónico utiliza la misma tecnología que un MicroSecond Timer (MST), proporcionando una medida recogiendo la onda acústica producida por un impacto externo sobre el sensor emisor (Sequera, 2017); lo específico del tomógrafo es que se pueden utilizar más que un par de sensores, recogiendo información más completa de una sección transversal (Fakopp, 2015).

Este equipo (ver figura 8) está compuesto por sensores, los cuales se colocan rodeando el árbol, cajas amplificadoras y batería. Las cajas amplificadoras permiten que los sensores se interconecten entre ellos y a la batería; finalmente, la batería permite la conexión de las cajas

amplificadoras a la computadora donde se utiliza un software (ArborSonic 3D, Fakopp) el cual permite el procesamiento de los datos obtenidos (Angulo-Ruiz et al., 2021).

Figura 8
Equipo Fakopp



Nota. Tomado de Fakopp (2015).

Tal como se describe en el Manual de usuario (Fakopp, 2015), este equipo permite obtener un registro del tiempo que tarda en propagarse la onda acústica producida por un impacto externo sobre cada sensor; deben ser al menos tres impactos limpios y precisos por sensor. Así mismo, el acoplamiento de los sensores no precisa de una preparación previa en la muestra a medir, sino que, los sensores se introducen directamente en la muestra con ayuda de un martillo de goma (ver figura 9).

Figura 9

Operario utilizando el Fakopp

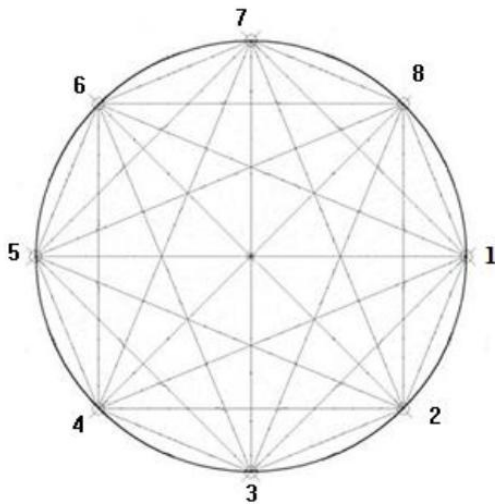


Nota. Adaptado de Fakopp (2015).

Según Basterrechea (2016), en el software se asocian las velocidades a una escala de colores para el rango de velocidades a partir de la interpolación de los datos que se obtienen en la malla de difracción; esta parte de un único punto (transductor emisor) y es recibida por todos los puntos de la malla (transductores receptores); de esta forma se generan muchas rutas de propagación de las ondas, cubriendo así en forma de malla el disco o el área de medición del árbol a evaluar (ver figura 10).

Figura 10

Malla de difracción con las rutas de medición con propagación radial y tangencial



Nota. Tomado de Basterrechea (2016).

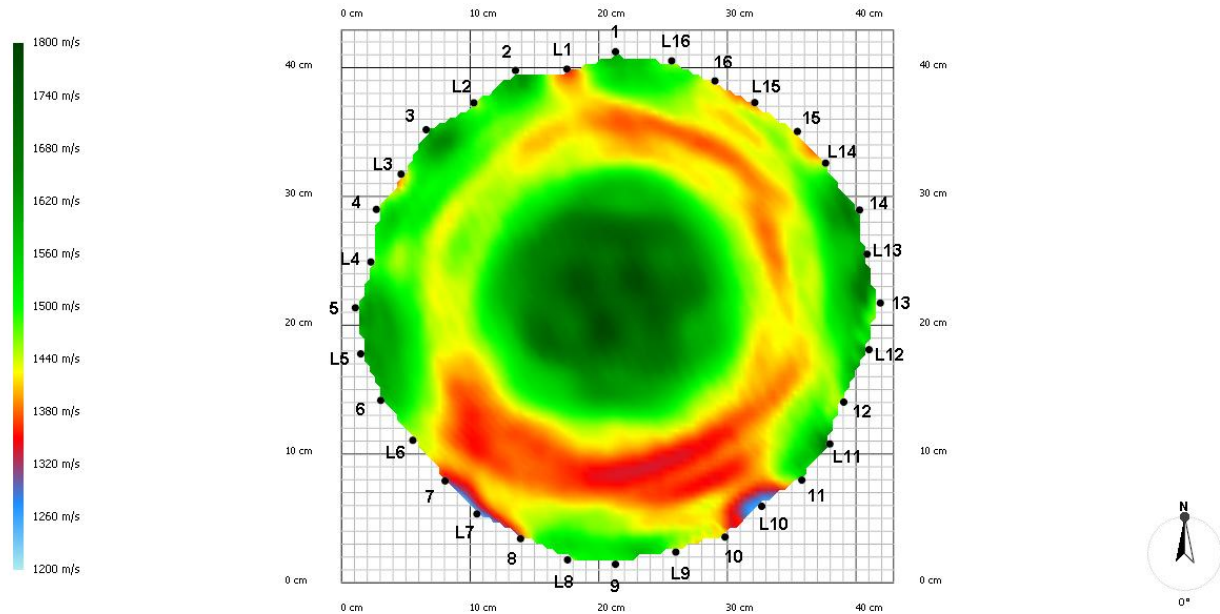
Se debe considerar que la velocidad de propagación de las ondas es en dirección radial y tangencial, y las velocidades radiales son superiores a las tangenciales, por lo que es esperable que en la imagen generada (tomograma) no sea homogénea, aunque sea un fuste íntegro y sin defectos; esto es muy importante a la hora del análisis de la tomograma para evitar las interpretaciones erróneas (Basterrechea, 2016).

En resumen, este equipo mide la velocidad del sonido entre los diferentes sensores para posteriormente analizar la velocidad a la que viajó el sonido. En la madera que presenta pudrición, así como cavidades la velocidad es más lenta, mientras que el sonido viaja más rápido a través de la madera sólida y sana (Gilbert et al., 2016).

La salida del software es una imagen (tomograma) de la estructura interna del fuste/árbol a partir de la propagación de las ondas sonoras en dirección radial y tangencial (ver figura 11). Con esto lo que se busca es detectar defectos tales como nudos, pudriciones o estructura hueca (Angulo-Ruiz et al., 2021).

Figura 11

Tomograma obtenido para el disco C17



4.2 ULTRASONIDO (SYLVATEST DUO)

El Sylvatest es un equipo de origen suizo, que permite clasificar la madera según sus propiedades mecánicas a través de la velocidad de onda de transmisión de ultrasonido.

Este equipo portátil (ver figura 12) mide el tiempo de transmisión de onda ultrasónica: está compuesto de una pantalla donde se van reflejando las mediciones que se realizan; en ella se acoplan mediante cables dos sensores piezoeléctricos de punta cónica y frecuencia 22 kHz, uno emisor y otro receptor (Sequera, 2017). Estos transductores piezoeléctricos tienen capacidad de generar energía al ser pulsados, produciendo vibraciones mecánicas y emitiendo las ondas de ultrasonido (Grabher et al., 2015).

Figura 12

Equipo de Ultrasonido (Sylvatest Duo)



Nota. Tomado de Sequera (2017).

Así mismo, este equipo cuenta con un microprocesador para realizar las mediciones, así como para seleccionar distintos parámetros tales como especie, tipo de sección, entre otras. En cuanto al empleo de este, para obtener un buen ajuste con la madera los orificios a realizar en el árbol o pieza de madera a utilizar deben ser de 5 mm de diámetro y 10 mm de profundidad. Este equipo es útil para determinar la densidad y predecir el MOE de la madera (Grabher et al., 2015).

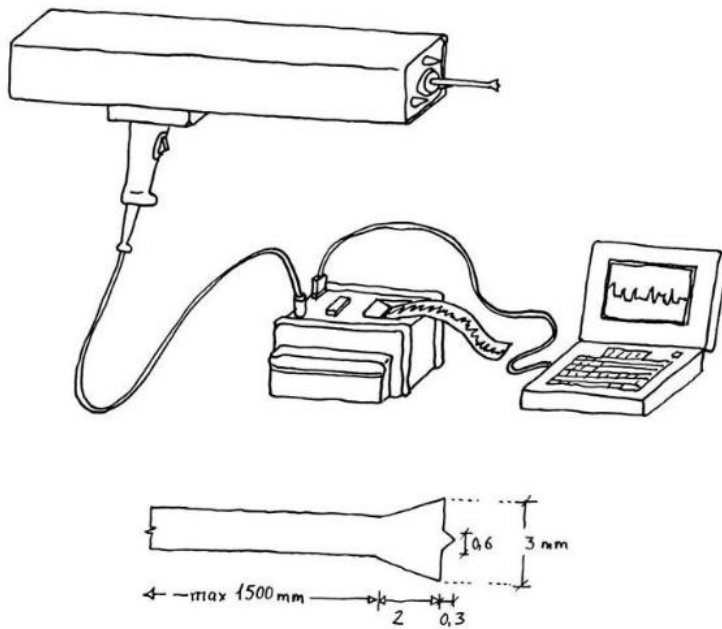
4.3 RESISTÓGRAFO (PENETRÓGRAFO)

El resistógrafo es un dispositivo portátil (ver figura 13) que consiste en una broca fina la cual va girando y avanzando a una velocidad constante, penetrando la madera en dirección radial y creando una perforación de entre 2 y 3 mm de diámetro. Al girar, la broca corta y penetra la madera, generando una gráfica llamada resistograma (Basterrechea, 2016).

El resistograma muestra una curva que indica la amplitud (%), relacionada con el consumo de energía (fuerza) de la broca en función de la profundidad de perforación. El consumo de energía está vinculado a las propiedades del material atravesado por la broca, lo que permite que el perfil resistográfico proporcione información sobre las características físicas y mecánicas de la madera o su estado de degradación (Basterrechea, 2016).

Figura 13

Esquema del equipo (resistógrafo) junto a la salida (resistograma)



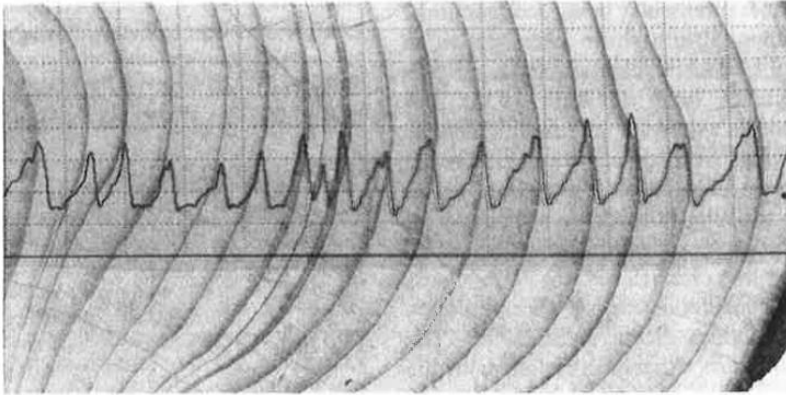
Nota. Tomado de Íñiguez (2007).

Como ventajas, se puede mencionar que se trata de un equipo cuya salida solo requiere la interpretación del gráfico (Calaza, 2007) además de ser una técnica precisa, rápida de ejecutar y confiable (Íñiguez, 2007).

Al tener un grado de precisión muy alto, permite detectar variaciones de densidad entre leño temprano y leño tardío (ver figura 14); por otro lado, también permite inspeccionar la zona oculta de las piezas que quedan dentro de paredes o empotradas en el suelo, y se pueden detectar pudriciones internas (Íñiguez, 2007).

Figura 14

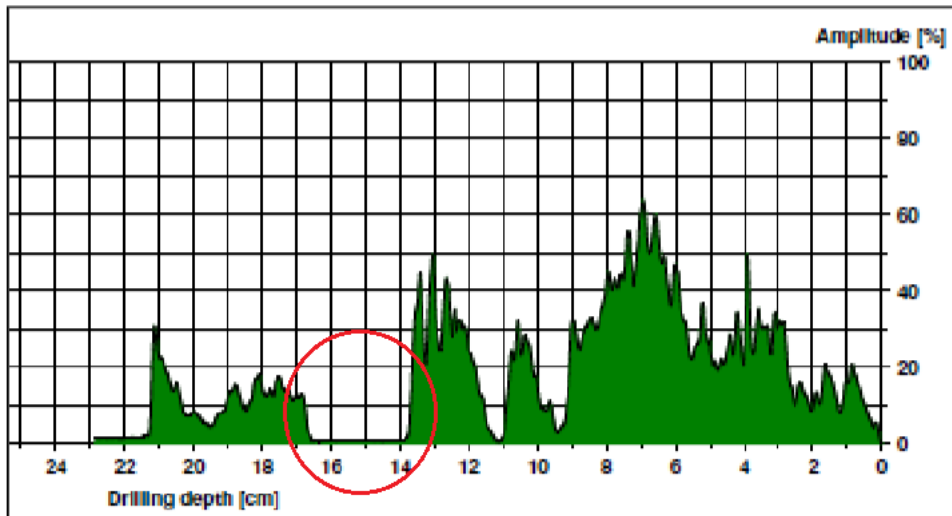
Perfil de perforación en Picea abies



Nota. Tomado de Rinn et al. (1996).

En la figura 14 se puede apreciar una superposición de un resistograma en una rodaja de *Picea abies*, de esta forma queda ilustrado el procedimiento realizado y explicado anteriormente.

Así mismo, según Basterrechea (2016) y Íñiguez (2007) es posible detectar pudriciones internas del árbol (ver figura 15), ya que, en la medida que el equipo detecte una pudrición la resistencia a la perforación será inferior que cuando avanza por madera sana. En caso de que exista un hueco no habrá resistencia a la perforación, como resultado se observará una variación de amplitud en el tramo del hueco.

Figura 15*Resistograma de un árbol con pudrición*

Nota. En rojo la discontinuidad indicaría la presencia de un hueco en la estructura interna del árbol. Tomado de Basterrechea (2016).

Por otro lado, como desventajas, Basterrechea (2016) menciona que es una medición puntual, además tiene un peso significativo que dificulta su transporte en campo, y el precio del equipo es elevado.

4.4 DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LA MADERA CON EL USO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Como se mencionó previamente, los END permiten estimar diferentes propiedades en los árboles, permitiendo reducir pérdidas de árboles en evaluaciones tradicionales/destructivas y descartar material previo a la cosecha, lo cual redundaría en un manejo más eficiente y por tanto una optimización de los recursos económicos. Así mismo, permiten la obtención rápida de resultados con un alto nivel de confiabilidad (Angulo-Ruiz et al., 2021).

Los END permiten detectar diferentes defectos en la madera: en el caso del tomógrafo sónico, a partir de la imagen generada (tomograma) de la estructura interna del fuste, permitiría detectar defectos tales como la presencia de nudos, así como saber si el fuste se encuentra hueco (Angulo-Ruiz et al., 2021); Por otro lado, con ultrasonido se puede determinar la

densidad de la madera y predecir el MOE mediante el principio de la medición de la velocidad de propagación de una onda de tensión a través de la madera. Por tanto, algunos de los defectos que puede detectar son; grietas y fisuras, pudrición de la madera, contenido de humedad y densidad (Basterrechea, 2016). Todo lo anterior permite estimar la resistencia, durabilidad, estabilidad, integridad estructural, así como calidad de la madera.

Finalmente, el resistógrafo permite evaluar la calidad de la madera mediante la medición de la resistencia a la penetración, por lo que, a partir de su empleo se puede determinar diferentes defectos como la pudrición (Íñiguez, 2007). Otro uso está relacionado a la detección de galerías de insectos; la plaga más común de *Pinus spp.* es *Sirex noctilio*, insecto que perfora la corteza para colocar las larvas y estas generan galerías en el interior de la madera; con el penetógrafo se pueden detectar estas galerías a partir de una baja resistencia a la penetración (Aguilar & Lanfranco, 1988).

Además, el resistógrafo permite estimar la densidad y dureza del material, inferir el contenido de humedad, así como ver variaciones en la calidad y uniformidad de la madera en diferentes partes del fuste, en la medida que se penetra en distintos sitios de este (Íñiguez, 2007).

Cabe mencionar que, si bien estos ensayos se utilizan para detectar los diferentes defectos, como nudos, degradación y pudrición de la madera, huecos, grietas y fisuras, así como dureza y densidad, no se encontró antecedentes de uso de estos equipos para la detección de MC. Sin embargo, a partir de las características de la MC, especialmente, la mayor densidad, mayor AMF y menor MOE presente en MC en comparación con la MN, se puede inferir que, en la medida que exista MC la velocidad de propagación de onda de tomógrafo sónico y ultrasonido será más variable.

También es posible encontrar correlaciones entre los equipos. En ese sentido, según Arciniegas et al. (2014), existe una alta correlación entre la tomografía acústica y las velocidades de ultrasonido.

Por otro lado, con relación al resistógrafo, como la MC tiene mayor densidad, es esperable que, en la medida que exista MC, la resistencia a la penetración sea mayor y se observen picos de energía más elevados en el resistograma (Rinn et al., 1996).

5. MODELO ÁRBOL DE DECISIÓN

Rokach y Maimon (2008) entienden que un árbol de decisión es un modelo predictivo que puede ser utilizado para representar tanto clasificadores como modelos de regresión; los árboles de decisión se refieren a un modelo jerárquico de decisiones y sus consecuencias.

Según Quinlan (1986) los componentes de un árbol de decisión son;

- raíz: Es el primer nodo del árbol representando la variable de mayor importancia para dividir los datos, por tanto, representa el punto de partida.
- nodos internos: Son los puntos donde los datos se dividen en base a una característica específica.
- ramas: Representan las conexiones entre los nodos y dependiendo si la condición es verdadera o falsa, el camino en el árbol tomará una dirección u otra.
- hojas: Son los nodos terminales del árbol, por lo tanto, representan la predicción final.

En cuanto a las ventajas y desventajas, James et al. (2013) mencionan como ventajas; los árboles de decisión son de fácil interpretación incluso para personas sin experiencia en análisis de datos, este modelo puede manejar características numéricas como categóricas sin necesidad de transformaciones especiales de los datos, además, a diferencia de otros modelos, los árboles de decisión no requieren estandarización de las características.

Por otro lado, como desventaja, los árboles de decisión son sensibles a pequeñas variaciones en los datos, por lo que, cambios en los datos de entrenamiento pueden producir grandes cambios en la predicción final (James et al., 2013).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 LOCALIZACIÓN DEL PREDIO

El sitio seleccionado fue un rodal de la empresa LUMIN el cual contaba un importante historial de presencia de MC. Dicho sitio (ver figura 16) se encuentra ubicado en la zona “Curticeiras” en el departamento de Rivera, el acceso a este predio es por la ruta 27 a 10 km de la ciudad.

Figura 16

Imagen satelital del rodal seleccionado



Nota. Coordenadas 31°01'11.37"S 55°31'55.81"W. Adaptado de Google Earth (2023).

6.2 SELECCIÓN DEL SITIO (RODAL)

Como criterio para la selección de dicho rodal se tuvo en cuenta que este tuviera una edad próxima a cosecha o tala rasa, que contara con podas hasta por lo menos 6 m de altura, que se tratara de un rodal fácilmente accesible y que contara con la máxima información necesaria. De esta forma, el rodal seleccionado se encuentra sobre un suelo CONEAT 7.31 donde el material geológico está constituido por areniscas rojas poco silicificadas y apoyadas sobre areniscas de Tacuarembó. Así mismo cuenta con buen drenaje, pendientes que oscilan entre un 6% y un 10% y la textura es arenosa.

En la tabla 1 se observa el manejo silvícola de este rodal desde la plantación y hasta el año 2011 donde se registra el último manejo.

Tabla 1

Resumen del manejo silvícola presentado por LUMIN para el rodal seleccionado

Año	Edad	Manejo
1999	0	Plantación a 1000 arb/ha
2002	3	Raleo pre comercial de 1000 a 700 (selectivo) y poda hasta 1,5m
2003	4	Poda hasta 3.2m (700 arb/ha)
2004	5	Poda hasta 4.6m (668 arb/ha)
2005	6	Poda hasta 6.17m (650 arb/ha)
2006	7	Poda hasta 7.4m (543 arb/ha)
2011	12	Raleo comercial de 700 a 300 arb/ha (sistemático 1 fila cada 11 y selectivo en la fila)

6.3 PRESELECCIÓN DE ÁRBOLES Y MEDICIONES EN PIE

Se preseleccionaron 120 árboles en total a los cuales se les midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) teniendo en cuenta los siguientes criterios excluyentes:

- a) Que no esté en el borde.
- b) Sin exposición directa al viento.
- c) Que no falten más de 3 árboles alrededor (no se cumplió debido a una baja densidad del rodal).
- d) Claro balance en la estructura de la copa.
- e) Sin bifurcación.
- f) La pendiente debe ser menor al 6%.
- g) Sin síntomas de enfermedad.

Esa selección se basó en tres clases diamétricas (de acuerdo con el inventario), con un total de 40 árboles cada clase. Cada individuo se identificó con un número según el orden en que era seleccionado, agregando antes una letra A para la clase 1, B para la clase 2 y C para la clase 3 (ver tabla 2). De esta forma, se obtuvo A1- An, B1 – Bn y C1- Cn. Esta identificación se mantuvo durante todo el ensayo.

Tabla 2
Clase según diámetro

Clase	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Diámetro (cm)	35 a 40	40,1 a 45	45,1 a 50

De los 120 árboles a los que se les midió el DAP se eligieron 36 árboles en total (12 árboles por clase diamétrica) siguiendo como criterio la facilidad para su extracción. Con estos se realizó una ficha con la descripción fenotípica de estos árboles y se realizaron las siguientes actividades:

- a) Medición de diámetro a 1,10 metros y diámetro a la altura del brote (DAB) por dos métodos:
 - a. con cinta diamétrica;
 - b. con forcípula: DAP máximo y DAP a 90°.
- b) Medición de altura total, altura a la primera rama viva y altura a la primera rama seca.
- c) Diámetro mayor y menor de la copa.
- d) Aspecto de la copa: equilibrio de la expansión de la copa (equilibrada o desequilibrada).
- e) Registro de forma del tronco a 1,10 metros (circular, elipse o irregular).
- f) Grosor de las ramas (categorización visual: 1 finas, 2 intermedias y 3 gruesas).
- g) Ángulo de inserción de las ramas (visualmente).
- h) Curvatura presente y a que altura del árbol (visualmente).
- i) Medición de la inclinación del árbol a 1m de altura con nivel de celular (no resultó útil porque la corteza irregular afecta mucho la medición).
- j) Ubicación del árbol dentro del rodal (esquema).
- k) Distancia al árbol más cercano.
- l) Distancia al borde.
- m) Fotografía del árbol completo.
- n) Fotografía de copa desde abajo.

6.4 SELECCIÓN FINAL DE ÁRBOLES

De los 36 árboles estudiados y sus respectivas fotos se seleccionaron finalmente 18 árboles (6 árboles por clase diamétrica). En la tabla 3 se presentan los 18 árboles seleccionados. Cabe destacar que las 18 rodajas con las que se trabajó para los análisis mantuvieron esta misma denominación.

Tabla 3

Árboles seleccionados según clase diamétrica

Clase 1	Clase 2	Clase 3
A4	B2	C10
A7	B3	C11
A9	B12	C13
A10	B19	C14
A29	B24	C16
A30	B25	C17

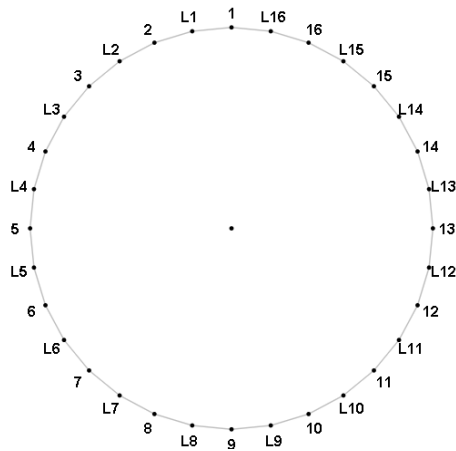
6.5 MARCACIÓN DE LOS ÁRBOLES SELECCIONADOS

La marcación se realizó a 1,10 m de altura con cinta de pintor de color azul, así mismo, se marcó el Norte y Este con líneas de spray continuas desde la base hasta 1,6 m.

A su vez, en la cinta azul se utilizó marcador permanente negro para los puntos referentes a los sensores del tomógrafo (16 sensores normales y 16 emisores Ludwig) en donde el 1 se posiciona al norte y se sigue en sentido antihorario, tal como se observa en la figura 17.

Figura 17

Representación de la marcación de los árboles seleccionados con los sensores normales y emisores Ludwig



6.6 APEO Y CORTE DE LOS DISCOS

6.6.1 Previo al apeo

1. Se midió la altura de los sensores 1, 5, 9 y 13.
2. Se registró en una planilla por cuál sensor del tomógrafo pasó la línea del Este (fucsia).
3. Se pintó con spray de un color diferente, la línea donde antes estaba la cinta azul.
4. Se reforzaron las marcas del Norte (verde) y del Este (fucsia).
5. Con un clavo se aumentaron las marcas de los sensores 1, 5, 9 y el sensor que coincide con el Este (13).
6. Se pasaron líneas con spray en sentido vertical que atravesase todos los discos y el tocón, por los sensores 5 y 9. Los sensores 1 y 13 no fue necesario volver a marcar porque coinciden con la marca del Norte y en la mayoría de los casos con el Este.
7. Se verificaron los adhesivos con las marcas de entrada y salida de los distintos resistogramas y se engramparon.
8. Se realizó la estimación del factor de forma. Para esto se hizo la medición en pie del diámetro a los 5m para lo que se utilizó escalera, y con este dato se calculó el factor de forma (FF): $FF = \text{Diámetro a 5m} / \text{DAP}$.

9. La empresa siguió sus procedimientos operativos para el apeo con las precauciones de seguridad pertinentes.

6.6.2 Post apeo y en el monte

1. Se midió la conicidad del fuste, midiendo el diámetro con forcípula a cada 2 metros hasta alcanzar los 20 metros de altura.
2. Se midió la curvatura del fuste:
 - a. Se midió la/las flechas existentes colocando una cuerda tirante recostada al tronco y midiendo con regla la distancia máxima desde el tronco hasta la cuerda. También se midió la distancia desde la base a la flecha y la distancia total (recta) desde donde comienza hasta donde termina la flecha.
 - b. Se dibujó un croquis esquematizando la forma del árbol.
 - c. Se marcó en otro croquis la orientación cardinal de las flechas.
3. Para cada árbol se observó la cabeza correspondiente a la base, y se evaluó el grado de afectación de MC, categorizando de 0 a 3 donde 0 es sin mancha de MC, 1 es de 0-33%, 2 de 33 a 66% y 3 es más de 66%.
4. Se marcaron las cabezas de las trozas, cada una con un color individual y una flecha en sentido que indicada donde había más sospecha de MC, para saber cómo posicionar la troza en el momento del aserrado.

6.6.3 Corte de los discos

De cada uno de los 18 individuos apeados se cortaron los discos de un espesor aproximado de 3 a 4 cm, teniendo en cuenta la merma de la motosierra (1cm) y verificando que no se cortara la zona del tomógrafo y del resistógrafo especialmente. Se obtuvieron 7 rodajas/discos por individuo (disco A – disco G). A los efectos de este trabajo se utilizó únicamente el disco A y B:

- Disco A: Contiene las mediciones del tomógrafo, para hacer cuñas de densidad/humedad.
- Disco B: Contiene las medidas del resistógrafo, para evaluación visual de la presencia de MC.

6.7 MEDICIONES CON EQUIPOS

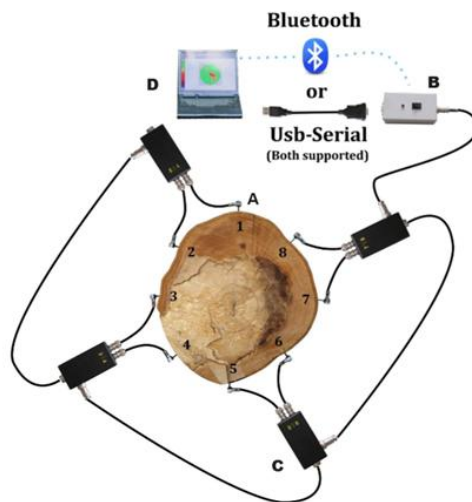
6.7.1 Tomógrafo sónico

Para las medidas con el tomógrafo sónico se utilizaron 16 sensores normales y 16 Ludwig (que solo emiten la onda, no captan), los primeros tienen 9 cm de largo desde la punta hasta el final de la cabeza, mientras que los Ludwig miden 7 cm. Se utilizaron las matrices de velocidad resultantes de los reportes del software para cada árbol; de esa matriz se extrajeron los datos de velocidad radial, es decir, los correspondientes a sensores opuestos que coinciden con las direcciones de las mediciones del resistógrafo.

Como se explicó previamente, el sensor 1 siempre se posicionó al Norte y los demás siguen en sentido antihorario (ver figura 17). Estos sensores se colocaron con martillo de goma hasta que se notaran lo suficientemente firme. Así mismo, se midió la profundidad de penetración de los sensores 1, 5, 9 y 13 registrando el promedio, este dato se utilizó como espesor de la corteza en el software. Se aseguró que las cajas que reciben los sensores estén conectadas siguiendo el orden numerado que figuran en cada caja. Desde el costado de la última caja se conectó a la caja de la batería, como se muestra en la figura 18.

Figura 18

Flujo operativo del tomógrafo acústico ArborSonic 3D



Nota. a) sensores; b) batería; c) cajas amplificadoras; d) computadora con software ArborSonic 3D. Adaptado de Fakopp (2015).

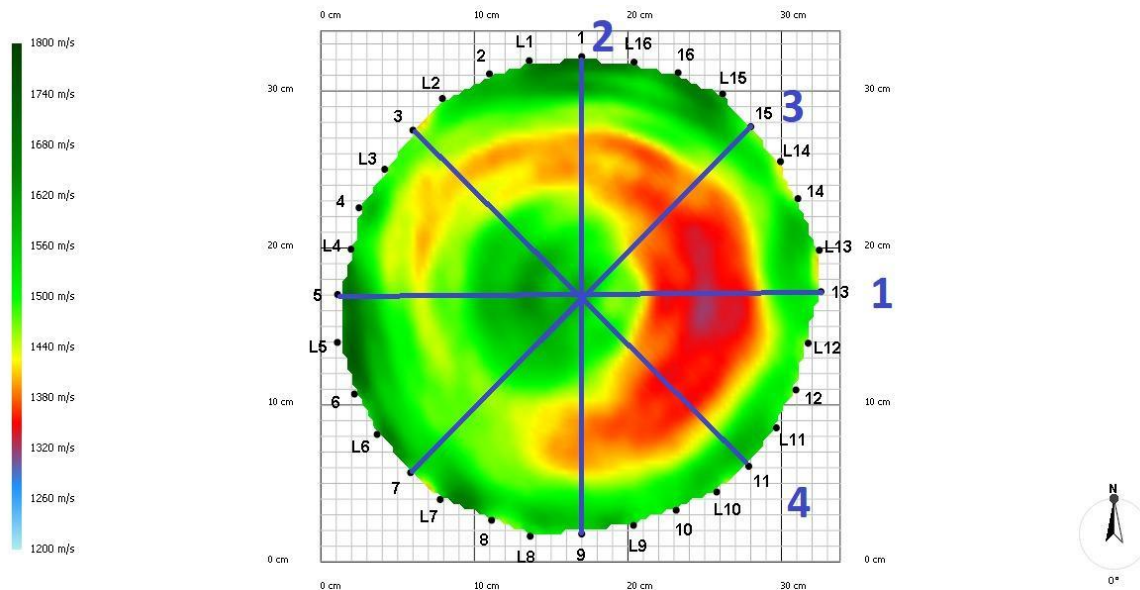
Se realizaron las mediciones de distancia con calibre digital, siguiendo las instrucciones del software; previo a realizar las mediciones se calibró el cero del instrumento, juntando ambas puntas y presionando el botón hasta que este indicara cero. Entre cada medición con el calibre digital se revisó que los brazos estén correctamente ajustados.

Para la toma de mediciones sobre los sensores, se utilizaron 5 golpes por sensor, con 5% de desviación y una diferencia entre par de sensores menor o igual a 3. Este golpe se realizó siguiendo las instrucciones del software donde se indica que debe ser un golpe con la muñeca suelta, sin golpear con fuerza, y entre cada golpe esperar a que el software suene para validar la medición.

Una vez que se obtuvo el tomograma, se tomó captura de pantalla para que el equipo que haría los resistogramas tomara como referencia la posición de la médula, indicando la dirección con número de sensores y la identificación del árbol (ver figura 19).

Figura 19

Ejemplo de tomograma obtenido, en este caso para rodaja A7



Lo que se observa en la figura 19 es la imagen obtenida por el tomógrafo para las mediciones con el resistógrafo, donde:

1. Primer par de medidas: desde el sensor más cercano a la médula, pasando por la zona con probabilidad de presencia de madera de compresión y por la médula.
2. Segundo par de medidas: perpendicular a la primera medida, en sentido antihorario, buscando pasar por la médula.
3. Tercer par de medidas: desde el sensor que queda centrado entre las entradas de la primera y segunda medida, pasando por la médula.
4. Cuarto par de medidas: perpendicular a la tercera medida, desde el sensor más cercano a la médula, pasando por la médula.

6.7.2 Resistógrafo

Las mediciones con el resistógrafo se realizaron inmediatamente luego de realizar las mediciones con el tomógrafo, se hicieron a una distancia de 5 cm por debajo de la línea de medición con el tomógrafo sónico. Se realizaron en total 8 resistogramas por árbol, es decir, de la zona donde se sacó la rodaja de cada árbol.

Consideraciones que se tuvo en cuenta para la utilización del resistógrafo:

- Durante la medición el equipo debería estar firme y estable, se debería mantener presión de la punta del resistógrafo contra el árbol para que la medida no se interrumpiera;
- Se utilizó una velocidad de penetración de 150 cm/min y una velocidad de rotación de 2500 r/min.
- Si el diámetro con corteza superara los 50 cm (largo máximo de la mecha), era necesario descortezar la zona de medida.
- Se limpiaba la punta del resistógrafo luego de cada medición para evitar sobrecalentamiento por acumulación de material (aserrín y resina).

Previo a realizar cada medición se cambió el ID del resistograma en el equipo; la identificación de los puntos fue la misma que en el tomógrafo, con la identificación del árbol, sensor de entrada y sensor de salida previsto (ej A9_13-5).

El punto de salida real de la aguja se identificó como el sensor de salida con una comilla (ej 13') y marcado con un punto de aerosol; a su vez, se marcó en otro color el punto de entrada, y sólo se marcó el punto de entrada y salida del último resistograma realizado entre esos dos puntos, dado que sería este el que quedó bien.

En los casos en que la aguja salía en una posición muy distante a lo planificado, lo cual puede suceder por la presencia de un nudo, o si la aguja volvía por sobrecalentamiento, se repitió la medición. De esta forma, al ID de la repetición se le agregó una letra al final del nombre, siguiendo un orden alfabético en caso de hacer más de una repetición (ej A7_13-5a).

Se tomó una foto del punto de salida marcado y se registró en la planilla cuál fue el par de sensores más cercano al punto de salida y las distancias x,y tomando como punto 0 el sensor de la izquierda, pero en el plano del resistógrafo, para facilitar su identificación posterior en la rodaja.

Los resistogramas se sincronizaron en Tablet durante el trabajo de campo para una mejor visualización; así mismo se guardaron los registros digitales donde las mediciones de cada día se descargaron en diferentes carpetas con la fecha correspondiente.

En laboratorio se procesaron los resistogramas, buscando picos y valles de energía, así como variaciones pronunciadas posiblemente causadas por la MC. Esto se fue comparando con lo observado en las diferentes rodajas para cada resistograma.

En total se procesaron 144 resistogramas para las 18 rodajas. En la medida que se midió el ancho de los anillos de forma manual (con regla), se corroboró en el software marcando dichos anillos. Se preparó una planilla Excel para cada resistograma, en estas se registró el ancho de cada anillo medido en el resistograma, así como si la orientación era radial (como esperado) o no.

Con los datos del ancho de cada anillo se utilizó otra planilla Excel para cada resistograma con el fin de obtener diferentes indicadores basados en la esbeltez, factor de forma y asimetría de los picos, así como el gráfico asociado (ver figura 20):

- Esbeltez 1: $F_{\text{máx}}/(x_f-x_i)$
- Esbeltez 2: $F_{\text{máx}}/(X_d[0.75F_{\text{máx}}] - X_{iz}[0.75F_{\text{máx}}])$
- Factor de forma 1: $(X_d[0.75F_{\text{máx}}] - X_{iz}[0.75F_{\text{máx}}])/x_f-x_i$

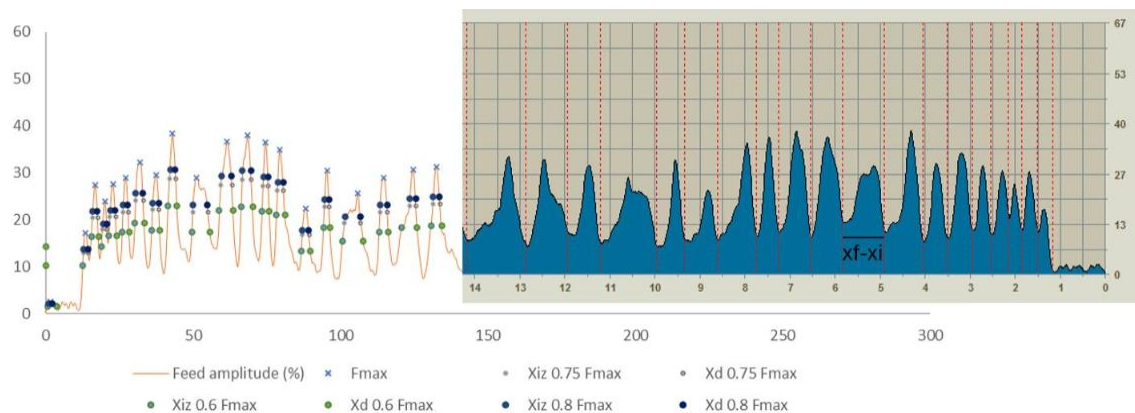
- Factor de forma 2: $(X_d[0.8F_{m\acute{a}x}] - X_{iz}[0.8F_{m\acute{a}x}]) / (X_d[0.6F_{m\acute{a}x}] - X_{iz}[0.6F_{m\acute{a}x}])$
- Asimetría del pico: $(x_{F_{m\acute{a}x}} - x_{\mu}) / (x_f - x_i)$
- Promedio feed amplitude.

El indicador Esbeltez, hace referencia a la relación entre la altura y el ancho de los picos del resistograma, y está muestra gráficamente la respuesta de resistencia de la madera (Marí et al., 2021). Por otro lado, el Factor de Forma (FF) describe la forma del pico en términos de sus dimensiones y características geométricas. Este factor generalmente toma en cuenta la relación entre la anchura a media altura del pico (es decir, la anchura del pico a la mitad de su altura máxima) y su altura total. Un pico con un alto factor de forma será más agudo y estrecho (indicando posible presencia de MC), mientras que un pico con un bajo factor de forma será más ancho y menos pronunciado (Rosell, 2006).

Con relación a la asimetría del pico, refiere a la medida en que el pico se desvía de una forma simétrica. En un pico perfectamente simétrico, ambos lados del pico serían idénticos en términos de su pendiente y forma. La asimetría, por otro lado, indica que un lado del pico es más inclinado o ancho que el otro, donde pueden indicar la presencia de heterogeneidades en el material como lo es la MC.

Figura 20

Ejemplo de resistograma obtenido en el software (derecha) y gráfico de los indicadores (izquierda)



Nota. Fmáx: fuerza máxima. Iz: Izquierda. D: derecha.

Posteriormente, se conformó una planilla Excel única donde se incorporaron los datos de todos los resistogramas en la que se sintetizó la información, incluyendo el ancho de los

anillos medidos manualmente junto con el obtenido en resistogramas, el valor de los indicadores presentados anteriormente.

6.7.3 Clasificación visual de MC

En la misma planilla mencionada en el último párrafo del apartado anterior, se agregó también la presencia (0 ausencia y 1 presencia) de MC y su clasificación (0,1,2,3, 4 y 6) discriminando por leño temprano, leño tardío y la suma de ambos. Cuando se habla de clasificación se hace referencia a la combinación de la cantidad que ocupa la MC en el anillo y a la intensidad de color.

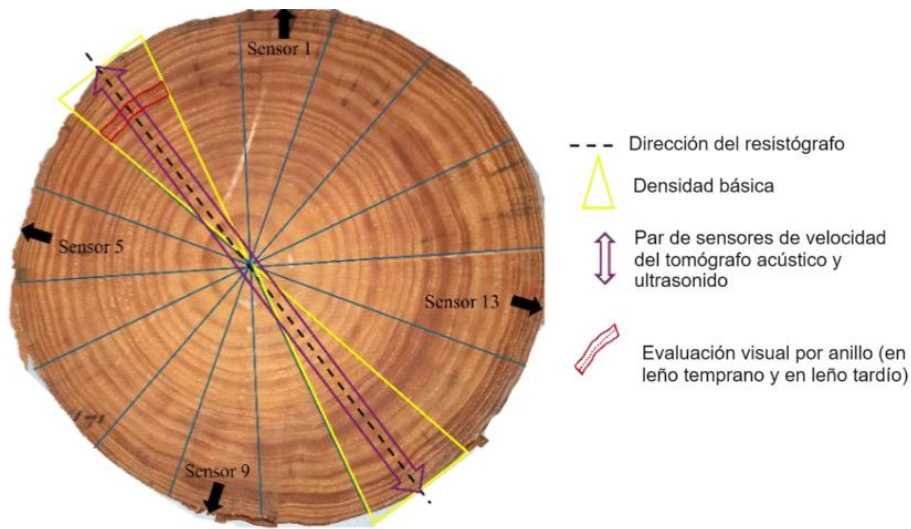
Para lo anterior se fue discriminando visualmente por resistograma y por anillo, para luego contrastar la correlación entre la apreciación y clasificación visual con el tomograma obtenido para cada rodaja.

6.7.4 Ultrasonido

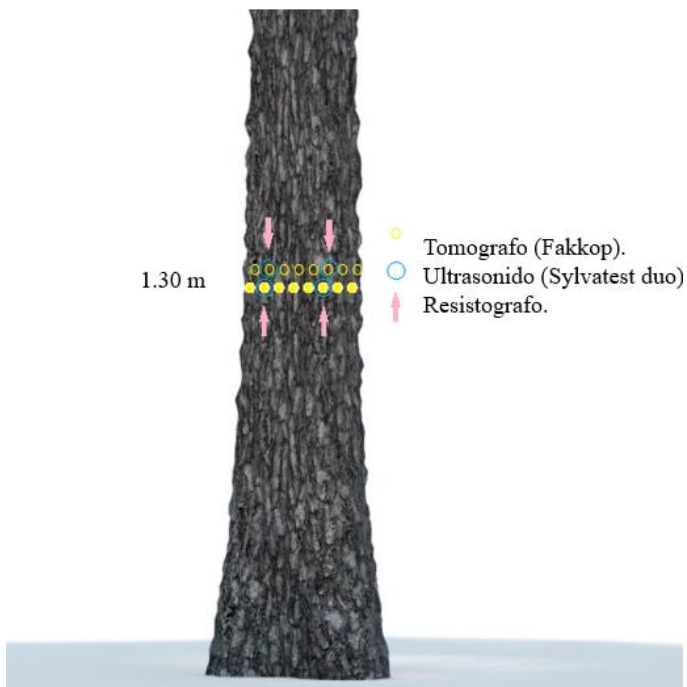
Las mediciones con el ultrasonido se realizaron a la misma altura en que se realizó el tomograma y aprovechando los orificios de los sensores. Se realizaron 8 medidas transversales por árbol, por par de sensores, es decir 1-9, 2-10, 3-11, 4-12, 5-13, 6-14, 7-15 y 8-16 (no se consideran los Ludwig). Se tomaron 3 repeticiones por punto de medición. A su vez, no se descortezó la zona, sino que se realizó un orificio con punzón y martillo de forma de ver la madera. El apoyo de los cabezales se realizó entre dos personas, sosteniendo firmemente en forma horizontal y la presión fue utilizando el peso del propio cuerpo.

Figura 21

Esquema de las mediciones realizadas según las diferentes técnicas no destructivas, densidad y evaluación visual

**Figura 22**

Posicionamiento de los equipos para realizar las mediciones



A modo de síntesis, en la figura 21 y 22 se presenta un esquema de las diferentes mediciones y determinaciones que se realizaron sobre las rodajas, así como el posicionamiento de los equipos en el árbol en pie.

6.8 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

La densidad fue determinada en los discos del tomograma y para esto se dividió en cuñas, totalizando 16 cuñas por disco (ver figura 23).

Figura 23

Rodaja C14 dividida en las 16 cuñas para determinación de densidad aparente básica



Se determinó la densidad aparente básica (Dab), la cual es la relación entre la masa seca de la muestra y el volumen verde, es decir, el volumen de dicha muestra con un contenido de humedad mayor o igual al punto de saturación de fibras (Cisternas, 1994).

Se utilizó el método por inmersión para determinar el volumen verde ya que las probetas tenían forma irregular (forma de cuña). Este método está basado en el Principio de Arquímedes, el cual expresa que el empuje sufrido por un cuerpo que se sumerge es igual al peso del líquido que se desplaza, que a su vez es igual al volumen del cuerpo sumergido (Trugilho et. al., 1990).

Para determinar el volumen verde, las probetas fueron sumergidas en agua por un periodo aproximado de 48 horas para asegurar que tengan un contenido de humedad adecuado. Posteriormente se quitaron las probetas del agua y se limpiaron para sacar el excedente de

agua para proceder a pesarla en una balanza de precisión, y así obtener el peso saturado, dicho peso corresponde al peso inicial (P_i). Por otro lado, para obtener el peso sumergido se armó el dispositivo de pesar (ver figura 24) que incluye la balanza, pesas y mordazas y se dejó estabilizar para colocar en tara la balanza; luego se procedió a colocar cada probeta en la mordaza, se dejó estabilizar y se tomó el valor del peso sumergido (P_s).

Figura 24

Dispositivo para obtener P_s en LATU



Con los datos obtenidos se pudo determinar el volumen verde, realizando un balance de fuerzas y descartando los pesos de los accesorios que se utilizaron al determinar el peso saturado (como mordaza). Por otro lado, el peso sumergido (P_s) es igual a la resta del peso inicial de la probeta (P_i) menos el volumen verde de la misma, realizando un despeje se obtiene el valor de volumen verde.

Por último, para obtener el peso anhidro, las probetas fueron colocadas en estufa a 105 °C por 48 a 72 hs, hasta obtener un peso constante, el cual se obtiene cuando se realizan dos pesadas consecutivas y entre una y la otra existe una diferencia de peso menor o igual a 0,1%.

Finalmente, se realizó el cálculo de la D_{ab} , de la siguiente manera: $D_{ab} = P_a/V_v$ donde:

- P_a es el peso de la muestra en estado anhidro (seco).
- V_v hace referencia al volumen verde de la muestra.

6.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software Infostat, con el fin de obtener las siguientes correlaciones:

- Ancho de los anillos de crecimiento calculados con el resistógrafo x ancho medido manualmente en rodajas (correlación de Pearson p-valor $< 0,05$).
- MOE dinámico del tomógrafo sónico x MOE dinámico del Ultrasonido (correlación de Pearson p-valor $< 0,05$).
- Indicadores derivados del resistógrafo x MC (Correlación de Spearman p-valor $< 0,05$).
- Densidad x MC (Correlación de Spearman p-valor $< 0,05$).
- Densidad x Fmáx (Correlación de Spearman p-valor $< 0,05$).

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman con los datos presentados en forma de lista. Este coeficiente evalúa la correlación entre dos variables utilizando los rangos en lugar de los valores brutos de esas variables. La correlación de Spearman puede ser calculada con la fórmula de Pearson, si antes se transforman las puntuaciones en rangos (Martínez Ortega et al., 2009).

Por otro lado, se debe observar la significancia; para que la correlación sea significativa el p-valor debe ser $< 0,05$ y para decidir si la correlación es baja, moderada o alta se debe observar el valor de Rho (ρ) el cual va de 0 a 1; Martínez Ortega et al. (2009) menciona que diferentes autores utilizan diversas escalas, por lo que para la interpretación de los datos se generó la siguiente:

- 0-0,40 correlación baja.
- 0,41-0,60 correlación moderada.
- $> 0,61$ correlación alta.
- 1 correlación perfecta.

Así mismo, dicho valor de ρ indica la fuerza de la relación y el signo la dirección.

Por otro lado, se realizó el modelo denominado “árbol de decisión” (ver figura 31) se utilizó el programa R, el cual se basa en un lenguaje de programación de código abierto para el

análisis estadístico y gráfico de un conjunto de datos, y se utilizó la función “rpart” en el programa R.

Para la construcción del árbol de decisión, en primera instancia todas las variables fueron utilizadas en el modelo, pero luego del análisis de importancia (ver figura 30), se definió el conjunto de variables a incluir en el árbol de decisión.

Por tanto, se utilizaron las tres variables de mayor importancia relativa; de esta forma el conjunto de datos fue dividido aleatoriamente en dos conjuntos, uno de entrenamiento (70%) y otro de prueba (30%). El conjunto de entrenamiento (1915 datos) se utilizó para la elección del modelo de árbol de regresión óptimo, y este modelo se usó en el conjunto de datos de prueba (821 datos) para evaluar la precisión de su rendimiento.

Finalmente, el desempeño del modelo se calculó tanto para los conjuntos de entrenamiento como para los de prueba (ver tabla 7).

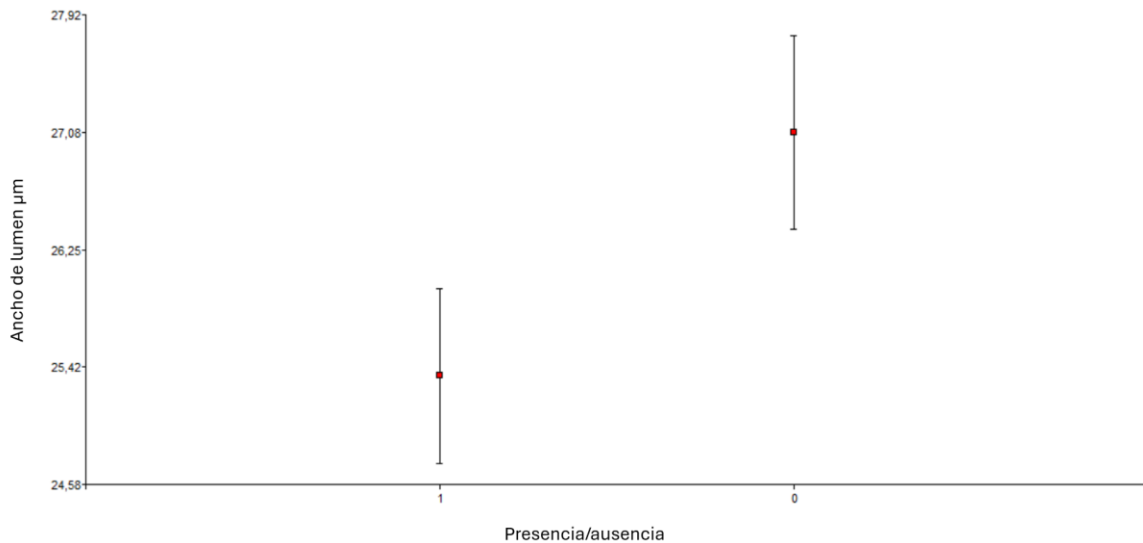
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 CLASIFICACIÓN VISUAL

Para corroborar la clasificación visual asignada, se estudió la relación de diferentes características anatómicas de las células presentes en la MC. En la figura 25 se observa que, el ancho del lumen es menor en presencia de MC y significativamente mayor en ausencia de esta. Este resultado era esperable, dado que, las células de la MC presentan paredes más gruesas y por tanto menor tamaño de lumen.

Figura 25

Relación entre el ancho del lumen y la presencia/ausencia de MC

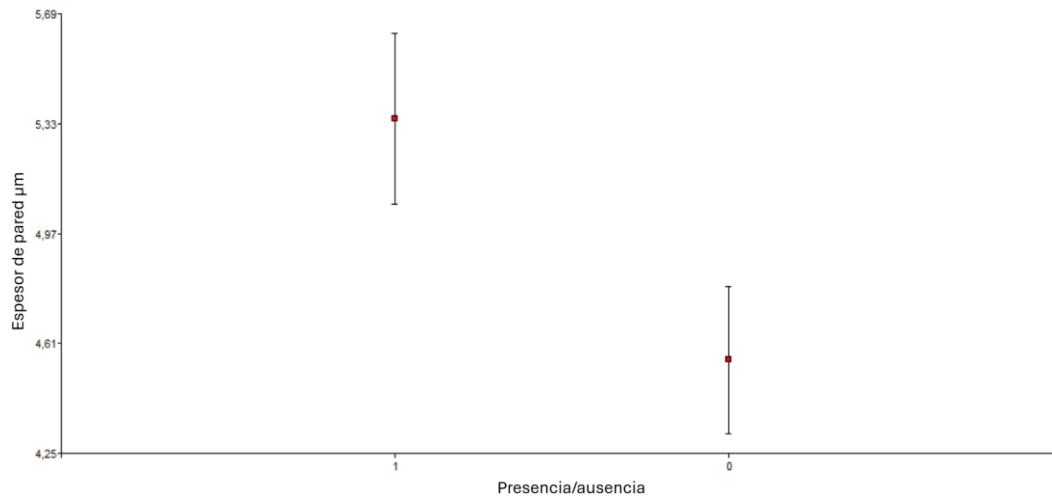


Nota. 0: Ausencia de MC. 1: Presencia de MC.

En el mismo sentido, al estudiar la relación entre el espesor de la pared celular y la presencia de MC, se observa que, en la medida que exista presencia de MC la pared celular es más ancha (ver figura 26).

Figura 26

Relación entre el espesor de la pared celular y la presencia/ausencia de MC

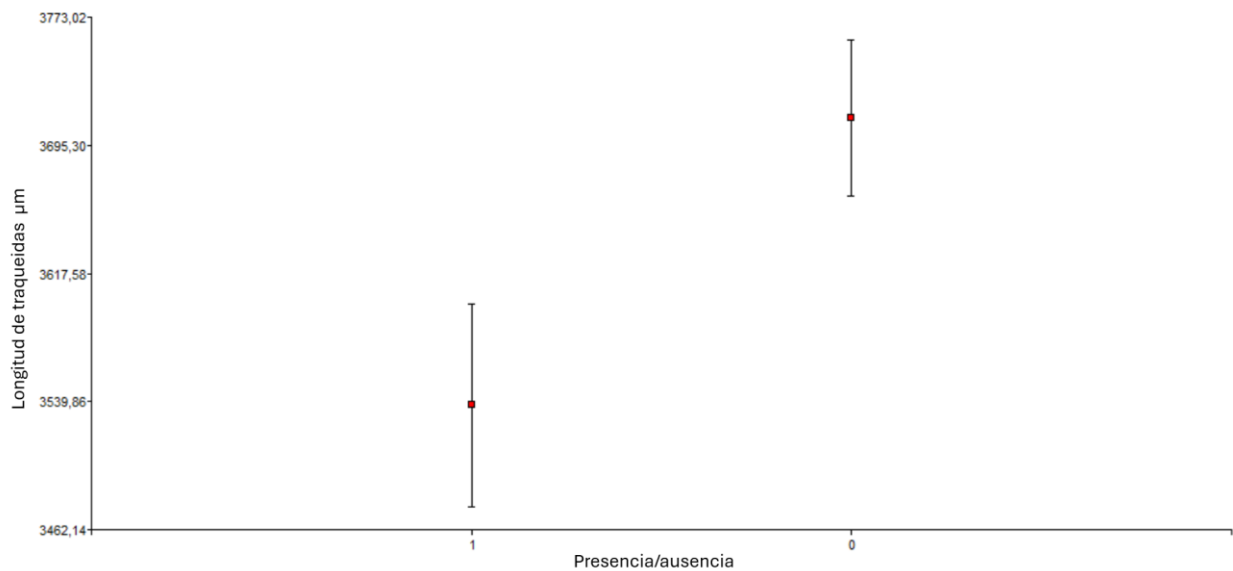


Nota. 0: Ausencia de MC. 1: Presencia de MC.

Finalmente, al estudiar la longitud de las traqueidas, se observa que, en presencia de MC la longitud de las traqueidas es menor (ver figura 27).

Figura 27

Relación entre la longitud de traqueidas y la presencia/ausencia de MC



Nota. 0: Ausencia de MC. 1: Presencia de MC.

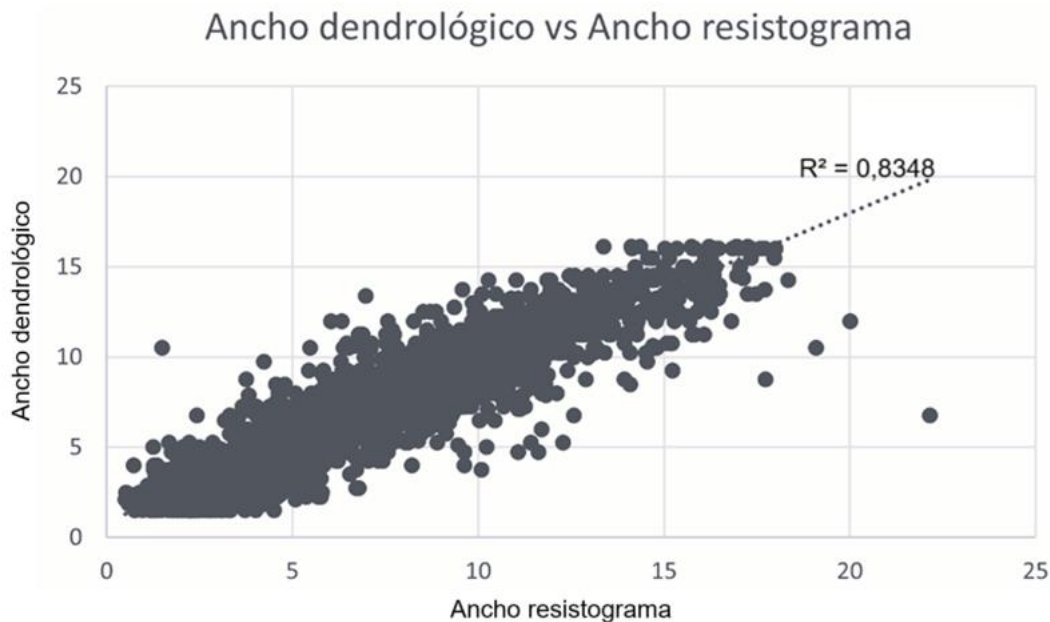
Los resultados presentados en la figura 25- 27 eran los esperados, dado que, la MC presenta traqueidas más cortas y estas tienen mayor proporción de pared celular (paredes engrosadas) y por tanto menor tamaño de lumen (Parham & Côté, 1971).

7.2 RESISTÓGRAFO

El primer resultado obtenido fue una regresión lineal entre el ancho de los anillos de crecimiento calculados por el resistógrafo y el medido manualmente en las rodajas (ancho dendrológico) la cual presentó un buen ajuste (ver figura 28). Por otro lado, al calcular el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) se obtuvo un valor alto y positivo (0,92), por lo que se acepta la primera hipótesis nula.

Figura 28

Correlación entre el ancho de los anillos de crecimiento y ancho en resistograma



Por lo tanto, se asume que el resistógrafo es un buen instrumento para estimar el ancho de los anillos de crecimiento en árboles, dado que su capacidad para medir la resistencia a la perforación de la madera permite identificar variaciones en la densidad, asociadas a los anillos anuales.

Lo anterior tiene su respaldo en investigaciones previas, Rinn et al. (1996) compararon los perfiles de resistencia de perforación obtenidos con el resistógrafo y los gráficos de densidad de rayos X de diferentes especies de madera, concluyendo que el resistógrafo es una

herramienta efectiva para la evaluación no destructiva del ancho y la calidad de los anillos de crecimiento.

Con relación a la segunda hipótesis, se obtuvo la tabla 4, en esta se resume las correlaciones (p-valor y rho) encontradas para los diferentes indicadores según la clasificación y presencia de MC en leño temprano, leño tardío y en la suma de ambos.

Tabla 4
Coefficiente de correlación de Spearman para cada indicador

Indicador	Clas TE	Clas TA	Clas suma	Pres TE	Pres TA	Pres suma
Fmáx	$\rho=0,1$	$\rho=0,19$	$\rho=0,2$	$\rho=0,09$	$\rho=0,19$	$\rho=0,20$
Esbeltez 1	$\rho= -0,28$	$\rho= -0,4$	$\rho= -0,43$	$\rho= -0,26$	$\rho= -0,38$	$\rho= -0,41$
Esbeltez 2	$\rho= -0,13$	$\rho= -0,18$	$\rho= -0,18$	$\rho= -0,14$	$\rho= -0,17$	$\rho= -0,17$
FF1	$\rho= -0,04$	$\rho= -0,06$	$\rho= -0,07$	$\rho= -0,05$	$\rho= -0,06$	$\rho= -0,08$
FF2	$\rho= -0,01$	$\rho= -0,02$	$\rho= -0,02$	$\rho= -1,6E-03$	$\rho= -2,8E-03$	$\rho= -3E-03$
Asimetría	$\rho= -0,13$	$\rho= -0,11$	$\rho= -0,14$	$\rho= -0,11$	$\rho= -0,10$	$\rho= -0,12$
PFA	$\rho=0,03$	$\rho=0,07$	$\rho=0,06$	$\rho=0,02$	$\rho=0,07$	$\rho=0,06$

Nota. PFA: Promedio feed amplitude. Clas TE: Clasificación leño temprano. Clas TA: Clasificación leño tardío. Clas suma: Clasificación suma (leño temprano+leño tardío). Pres TE: Presencia en leño temprano. Pres TA: Presencia en leño tardío. Pres suma: Presencia suma (leño temprano+leño tardío). Las correlaciones en negrita son significativas a p-valor <0,05.

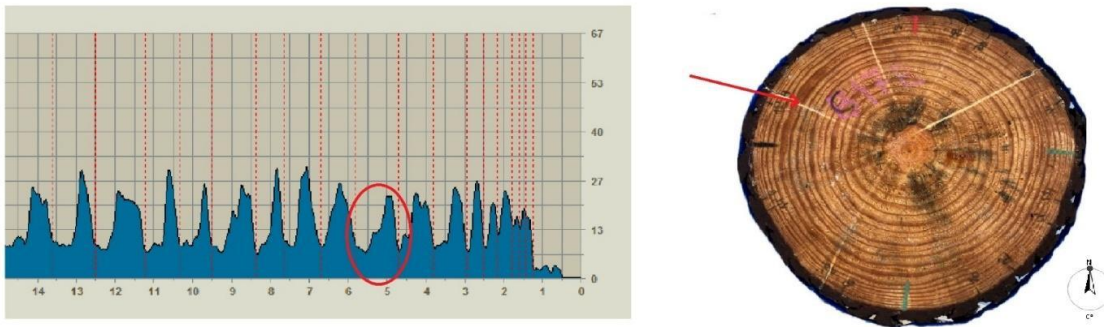
Lo que se observa, es que, en general las correlaciones son significativas y bajas a moderadas, excepto para el factor de forma 2 (FF2) el cual no es significativo. Por tanto, se acepta la segunda hipótesis planteada, ya que los indicadores calculados se correlacionan con la MC, a excepción del indicador FF2 que no estaría correlacionado con la misma.

El indicador que se destaca es la Esbeltez 1, donde se obtuvo correlaciones negativas tanto para la clasificación como para la presencia. Dentro de la clasificación la suma de leño temprano y tardío representa la correlación más alta (correlación moderada $\rho=-0,43$), esto quiere decir que, en la medida que este indicador (Esbeltez 1) sea menor tendremos mayor cantidad del anillo ocupado por MC, y a su vez, esta será de mayor intensidad, ya que la clasificación es una combinación de cantidad e intensidad.

En el caso de la presencia, tenemos mayor significancia del indicador Esbeltez 1 en el leño tardío (correlación baja - $\rho=-0,38$), donde, en la medida que disminuya la Esbeltez 1 la presencia de MC es mayor en ese anillo.

Figura 29

Forma del anillo de crecimiento con MC



Nota. Izquierda: Resistograma del sensor 4-12 correspondiente a rodaja C17. Derecha: Rodaja C17.

En la figura 29 se aprecia un fragmento del resistograma 4-12 de la rodaja C17, en este se marca (en rojo) el pico poco esbelto en el anillo número 9 (de derecha a izquierda) y esto está relacionado a la presencia de MC lo cual se puede constatar al verificar ese anillo en la rodaja.

Para la tercera hipótesis nula planteada, se tomó el dato de $F_{\text{máx}}$ (fuerza máxima) ya que este representa la fuerza (energía) que realiza el resistógrafo. Por tanto, a partir de los datos presentados en la tabla 4 se puede observar que la correlación de la $F_{\text{máx}}$ con la MC si bien es baja, es significativa.

De esta forma se acepta la tercera hipótesis nula, al tratarse de una correlación positiva, se observa que, en la medida que aumenta la $F_{\text{máx}}$ indica una mayor presencia, así como mayor combinación de cantidad e intensidad de MC.

7.3 TOMÓGRAFO SÓNICO , ULTRASONIDO Y DENSIDAD

Para las correlaciones entre los equipos no se utilizó directamente las velocidades, en su lugar se tomó la correlación entre los MOE dinámicos, para esto se utilizó la formula $MOEd= v^2 \times \rho$ donde;

- v^2 es la velocidad de la onda a través del material (m/s).

- ρ es la densidad del material (kg/m^3).

Utilizar MOEd es más apropiado porque ofrece una medida directa de la rigidez de la madera que incorpora tanto la velocidad de las ondas como la densidad del material. Esto permite una mejor comprensión de las propiedades mecánicas de la madera y facilita comparaciones más precisas entre estos equipos de evaluación.

Con los resultados presentados en la tabla 5, tal como se menciona en Arciniegas et al. (2014) queda demostrado que el tomógrafo sónico y el ultrasonido tienen una correlación moderada y positiva, en este caso del 58%, aceptando así la cuarta hipótesis nula. Por lo tanto, si las mediciones del tomógrafo sónico indican una mayor velocidad de propagación del sonido, las mediciones del ultrasonido también mostrarán un aumento similar.

Tabla 5

Coefficiente de correlación de Spearman entre equipos y con la densidad

	Resultados
MOEd tomógrafo y MOEd ultrasonido	p-valor= <0,0001 $\rho=0,58$
Densidad y Fmáx	p-valor= <0,0001 $\rho= 0,84$

Por otro lado, cuando se correlaciona la densidad con la Fmáx, se encuentra una correlación alta de 0,84; esto significa que, a medida que aumenta la densidad, también tiende a aumentar la Fmáx. Por lo tanto, al utilizar el resistógrafo la Fmáx es un buen indicador de presencia de MC, donde veremos que, en la medida que haya presencia de esta la densidad será mayor y esto se traduce en un aumento del indicador Fmáx.

A partir de la tabla 6, se puede observar que, si bien hay correlación entre el MOE dinámico del tomógrafo y del ultrasonido y de la densidad con la MC, estas correlaciones son bajas.

Tabla 6

Coefficiente de correlación de Spearman por equipo según presencia y clasificación de MC

	Clas TE	Clas TA	Clas suma	Pres TE	Pres TA	Pres suma
MOEd	$\rho= 0,02$	$\rho=0,06$	$\rho=0,06$	$\rho=0,02$	$\rho=0,08$	$\rho=0,08$
tomógrafo						
MOEd	$\rho= 0,11$	$\rho= 0,1$	$\rho= 0,11$	$\rho=0,12$	$\rho=0,11$	$\rho=0,12$
ultrasonido						
Densidad	$\rho= 0,17$	$\rho= 0,12$	$\rho= 0,15$	$\rho= 0,17$	$\rho= 0,12$	$\rho= 0,14$

Nota. Clas TE: Clasificación leño temprano. Clas TA: Clasificación leño tardío. Clas suma: Clasificación suma (leño temprano+leño tardío). Pres TE: Presencia en leño temprano. Pres TA: Presencia en leño tardío. Pres suma: Presencia suma (leño temprano+leño tardío). Las correlaciones en negrita son significativas a p-valor <0,05.

Lo que se observa en la tabla 6 es que, el MOE dinámico del tomógrafo presenta significancia solo en la presencia del leño tardío y en la suma de la presencia (leño temprano + leño tardío) con un ρ bajo (0,08). Mientras que, el MOE dinámico del ultrasonido presenta correlaciones bajas y positivas tanto en la presencia como con la clasificación de la MC, siendo valores similares para todas las variables. Esto indica que, a mayor velocidad de propagación de onda hay una mayor presencia, cantidad e intensidad de MC.

Saadat-Nia et al. (2011) explican que, en presencia de madera de compresión (MC), es esperable que la velocidad de propagación de las ondas sea menor que en la madera normal (MN). Esto se debe a las traqueidas más cortas y redondeadas que generan espacios intercelulares y fisuras, provocando la dispersión de las ondas. Sin embargo, las microfibrillas de la MC tienen un ángulo más plano (mayor AMF), lo que facilita la propagación de las ondas en dirección transversal. Por esta razón, la velocidad de propagación de las ondas en la MC es mayor en comparación con la MN.

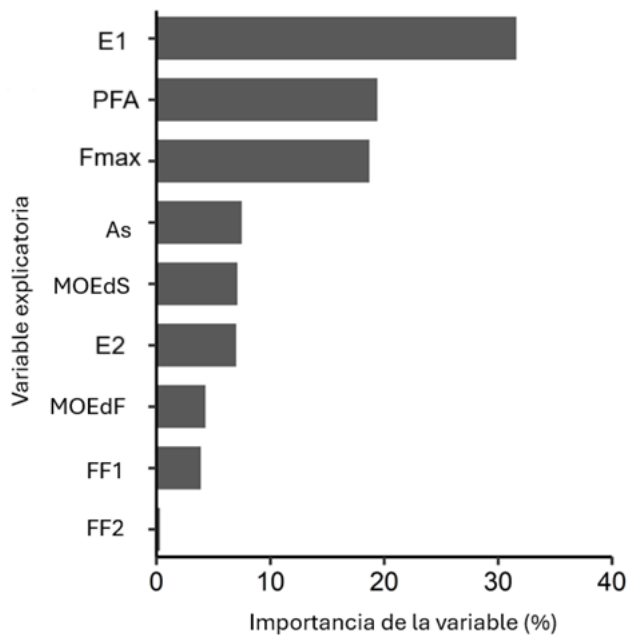
Por otro lado, la densidad, si bien presenta correlaciones bajas y en valores similares para el leño temprano, leño tardío y la suma de estos, se trata de correlaciones positivas, tanto para la presencia como para la clasificación de la MC. Por tanto, a mayor densidad es esperable que haya mayor presencia, cantidad e intensidad de MC. De esta forma, se acepta la quinta hipótesis planteada.

7.4 MODELO ÁRBOL DE DECISIÓN

En primer lugar, se buscó visualizar la importancia relativa de diferentes variables para predecir MC (ver figura 30).

Figura 30

Importancia relativa de las diferentes variables explicativas en la predicción de MC



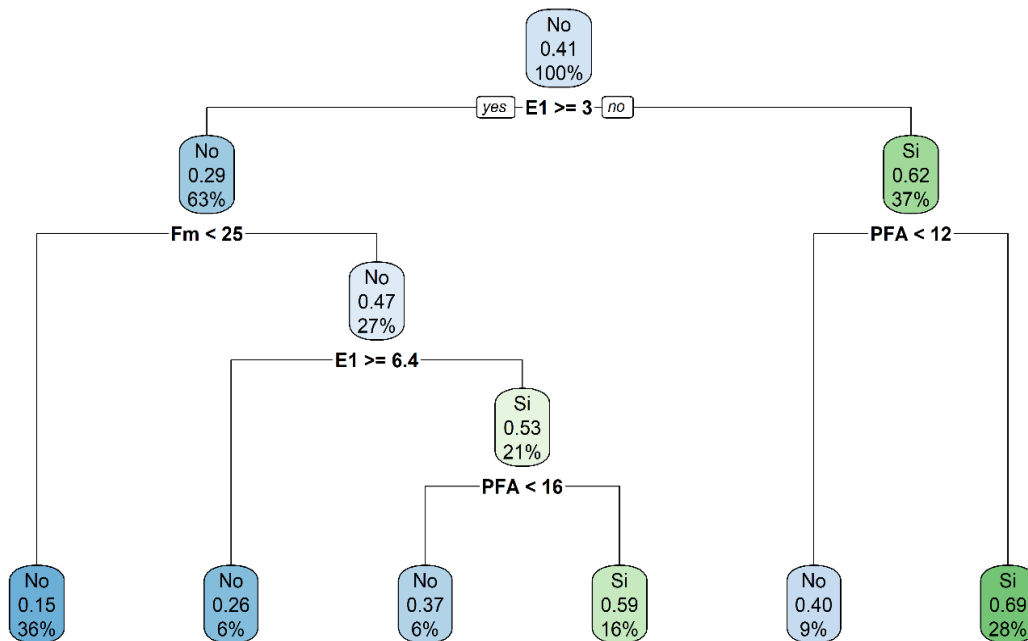
Nota. E1: Esbeltez x feed amplitud. PFA: Promedio feed amplitud. Fmáx: Fuerza máxima. As: Asimetría. MOEdS: Módulo de elasticidad dinámico Sylvatest. E2: Esbeltez 0,75 x feed amplitud. MOEdF: Módulo de elasticidad dinámico Fakopp (tomógrafo sónico). FF1: Factor de forma 0,75 x feed amplitud. FF2: Factor de forma 0,8/0.6 feed amplitud.

De la figura 30 se puede concluir que, en general, las variables relacionadas con el resistógrafo tienen mayor importancia relativa en la predicción de MC que aquellas relacionadas con el tomógrafo y ultrasonido. Dentro de estas tenemos que la Esbeltez 1, PFA (promedio feed amplitud) y Fm (fuerza máxima) presentan la mayor importancia, seguido por la asimetría. Por otro lado, el MOEd del ultrasonido, la esbeltez 2, junto con el MOED del tomógrafo sónico, el factor de forma 1 y 2 son quienes muestran la menor importancia relativa en la predicción de la MC.

Por tanto, para la construcción del árbol de decisión para predecir la presencia de MC, se utilizaron únicamente las tres variables de mayor importancia relativa, es decir, esbeltez 1, PFA y Fm (ver figura 31).

Figura 31

Modelo árbol de decisión que predice la presencia de madera de compresión



Nota. E1: Esbeltez x fuerza máxima (Fm). Fm: Fuerza máxima. PFA: Promedio feed amplitude.

A partir del modelo (ver figura 31) se puede observar que, cuando la esbeltez es mayor o igual a 3, hay un 29% de probabilidad de ausencia de MC en el 63% del conjunto de datos, mientras que, con una esbeltez inferior a 3 hay un 62% de presencia de MC en el 37% de ese conjunto de datos. Lo anterior demuestra que la presencia de picos pocos esbeltos, en formato de mesa, pueden indicar presencia de MC.

En el siguiente nodo se encuentra la Fm, donde los picos delgados y bajos tienen probabilidad de ausencia de MC. Por otro lado, los picos entre 3 y 6,4 de esbeltez con una Fm superior a 25 tienen un 53% de probabilidad de tener MC. Sumando a ese camino el PFA, hay un 59% de probabilidad de presencia de MC en el 16% de los datos. Eso quiere decir que cuando el pico no es tan esbelto, el indicador PFA aporta a la posible presencia de MC.

Por otro lado, cuando la esbeltez es menor a 3, hay un 62% de probabilidad de tener MC y, de estos, si el PFA es mayor a 12, hay un 69% de probabilidad de tener MC en el 28% de los datos.

Tabla 7

Resultados del desempeño del modelo

	Exactitud	Error tipo I	Error tipo II
Datos de entrenamiento	0,73	0,75	0,81
Datos de prueba	0,72	0,77	0,79

Se observa (tabla 7) que, si bien el modelo permite clasificar correctamente el 70% de los datos de prueba y presenta una precisión alta del 72%, existen consideraciones importantes respecto a los errores tipo I (falsos positivos) y tipo II (falsos negativos). La tasa de falsos positivos del 23% implica el rechazo innecesario de material. Sin embargo, el error de mayor relevancia en este contexto es el de los falsos negativos, que ocurre con una probabilidad del 21%. Este tipo de error es crítico porque podría permitir que material con MC ingrese al proceso industrial, afectando la línea de producción y la calidad del producto final. Aunque el modelo muestra una precisión aceptable, en su aplicabilidad debe ser considerada esta apreciación. Se debe seguir estudiando los indicadores mejorando con el fin de mejorar la confiabilidad y seguridad del modelo en su aplicabilidad a la selección de madera.

Por lo tanto, los árboles de decisión pueden ser útiles y prácticos para identificar la presencia de MC en árboles basándose en diversos indicadores a partir del uso de END; se debe considerar que, la probabilidad de obtener falsos negativos es considerable. Por esta razón estudios posteriores se deben centrar en mejorar esta cifra.

Se plantea reajustar el umbral de clasificación para aumentar la sensibilidad en la detección de MC, asegurando que este ajuste no incremente el número de falsos positivos. Además, con el mismo propósito, se sugiere incrementar la cantidad de datos recolectados, especialmente las muestras con presencia de MC, ya que, de las rodajas muestreadas, la mayor presencia de MC se detectó en las rodajas pertenecientes a la clase diamétrica C, sin embargo, tampoco eran cantidades muy significativas.

8. CONCLUSION

En el presente trabajo se evaluó la capacidad de tres tecnologías no destructivas (resistógrafo, tomógrafo sónico y ultrasonido) para estimar la presencia de MC, así como la densidad en árboles de *P. taeda*.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que, en primer lugar, el resistógrafo demostró ser una herramienta efectiva para estimar el ancho de los anillos de crecimiento, presentando una correlación alta entre las mediciones calculadas automáticamente por esta herramienta y las medidas manuales. Así mismo, los indicadores derivados de los resistogramas, en particular, la esbeltez (1), mostraron correlaciones significativas con la presencia de MC, demostrando así la capacidad de este instrumento para identificar variaciones asociadas a cambios en la densidad de la madera.

En ese sentido, se confirmó la hipótesis sobre el aumento de la densidad de la madera en presencia de MC, encontrando una correlación positiva y alta ($\rho = 0,84$) entre la densidad y la $F_{m\acute{a}x}$ medida por el resistógrafo; lo anterior sugiere que, en maderas con mayor densidad, es más probable encontrar MC, lo cual se refleja en mayores valores de resistencia a la perforación del resistógrafo.

En cuanto al tomógrafo sónico y ultrasonido, a partir de su rigidez dinámica (MOEd) se obtuvo una correlación moderada y positiva ($\rho=0,58$) lo que indica que ambos equipos proporcionan mediciones similares en términos de rigidez de la madera. Sin embargo, la correlación de estas medidas con la presencia de MC fue baja, reflejando que estos equipos por sí mismos no son buenos estimadores de MC.

Por otro lado, a partir del modelo árbol de decisión se buscó sintetizar la probabilidad de presencia/ausencia de MC a partir de los diferentes instrumentos, para esto se estudió la importancia relativa de todas las variables tomando las tres de mayor importancia (esbeltez, $f_{m\acute{a}x}$ y PFA) para modelarlo. A partir de este se puede concluir que el resistógrafo es la principal herramienta para la detección de MC. Sin embargo, el modelo presenta ciertas limitaciones, como la alta probabilidad de falsos negativos (21%) permitiendo la llegada de madera afectada a la línea de producción.

Es importante que estudios futuros continúen en esta línea para corregir el modelo y lograr disminuir el error tipo II, para esto se sugiere ajustar el umbral de clasificación para aumentar

la sensibilidad en la detección de MC, asegurando que este ajuste no incremente los falsos positivos, así como también aumentar la cantidad de datos recolectados, especialmente las muestras con presencia de MC, para que el modelo sea más sensible a su identificación.

Por tanto, los resultados obtenidos permiten concluir que el resistógrafo es la tecnología por excelencia para la evaluación de MC, así como también es una buena herramienta para la estimación de la densidad a partir de la $F_{m\acute{a}x}$.

Sin embargo, es conveniente utilizar las técnicas en conjunto, dado que, el resistógrafo proporciona información sobre la resistencia mecánica interna de la madera a partir de la resistencia al avance de la aguja, pero es necesario saber dónde realizar la medición con el resistógrafo; por esta razón es fundamental la complementariedad con el tomógrafo sónico para obtener un análisis más completo. A partir de la combinación de estas tecnologías se obtienen datos de resistencia mecánica, rigidez e integridad estructural interna de la madera las cuales se pueden correlacionar con la presencia de MC.

Como reflexión final, dado que, la MC representa un impacto negativo en la industria, así como también en su posterior uso, resulta fundamental seguir estudiando la aplicación de diferentes combinaciones de END y ajustando modelos estadísticos que puedan predecir eficientemente y para la evaluación de los árboles en pie con el fin de evitar la llegada de madera con presencia de MC a la industria. Para esto, se sugiere realizar nuevos muestreos sobre muestras con mayor presencia de MC.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A., & Lanfranco, D. (1988). Aspectos biológicos y sintomatológicos de *Sirex Noctilio* Fabricius (Hymenoptera-Siricidae): Una revisión. *Bosque*, 9(2), 87-91.
<https://doi.org/10.4206/bosque.1988.v9n2-04>
- Angulo-Ruiz, W., Fasabi, H., Rengifo-Pérez, C., & Valdivia, L. (2021). Técnica no destructiva basada en tomografía acústica para la identificación de defectos internos en árboles. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 65-71.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172021000100065&script=sci_abstract
- Arciniegas, A., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2014). Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees*, 28(6), 1559-1567.
<https://doi.org/10.1007/s00468-014-1062-6>
- Barnett, J., Gril, J., & Saranpää, P. (2014). Introduction. En B. Gardiner, J. Barnett, P. Saranpää, & J. Gril (Eds.), *The Biology of Reaction Wood* (pp. 1-11). Springer.
<https://hal.science/hal-01452015/document>
- Basterrechea, M. (2016). *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]. Archivo digital UPM.
https://oa.upm.es/44444/1/PFC_MAR_AINHOA_BASTERRECHEA_AREVALO.pdf
- Bocage, E., Boragno, L., & Enrique, A. (2000). *Madera juvenil en Pinus taeda, cultivado en Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/25559/1/BocageBidartElena.pdf>
- Calaza, P. (2007). *Revisión bibliográfica y análisis comparativo de métodos de evaluación de riesgo de arbolado urbano. Caso particular, La Coruña* [Disertación doctoral, Universidade de Santiago de Compostela]. Dialnet.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=107963>

- Cattaneo, M., & Methol, R. (2004). *Desarrollo de una raza local de Pinus taeda: Avances en investigación*. INIA.
<https://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807150103.pdf>
- Cisternas, A. (1994). Conversión de densidades de la madera. *Ciencia e Investigación Forestal*, 8(2), 301-315.
<https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/10864>
- Degraff, J., & Agard, S. (1984). Defining geologic Hazards for natural resources management using tree-ring analysis. *Environmental Geology and Water Sciences* 6(3), 147-155 <https://doi.org/10.1007/BF02509908>
- Díaz, L., Domínguez, G., Fuentes, R., Hernández, F., Montero, J., Ortega, J., Reyes, N., & Silva, P. (2019). *Manual de prácticas de laboratorio "helechos y gimnospermas"*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
http://bios.biologia.umich.mx/assets/files/manual_pteridofitas_y_gimnospermas_2024b.pdf
- Di Marco, E. (2014). *Procedimiento requerido en plantaciones: Pinus taeda L., familia Pinaceae*. MAGYP. <https://forestoindustria.magyp.gob.ar/archivos/procedimiento-requerido-en-plantaciones/pinus-taeda-l-familia-pinaceae.pdf>
- Dirección General Forestal. (2023). *Superficie Forestal de bosques plantados del Uruguay*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-01/Superficie%20Plantado%20Informe%202022.pdf>
- Donaldson, L. (2008). Microfibril angle: Measurement, variation and relationship: A review. *IWA Journal*, 29(4), 345-386
https://www.researchgate.net/publication/228767936_Microfibril_Angle_Measurement_Variation_and_Relationships_-_A_Review
- Fakopp. (2015). *ArborSonic 3D: Manual del usuario*.
https://Fakopp.com/docs/products/arborsonic/ArborSonic3D_ES.pdf

- Frank, P., Ramos, M., Sosa, M., & Piter, J. (2019, 18-20 de noviembre). *Influencia del anillo de crecimiento en las propiedades físico-mecánicas del pino resinoso argentino* [Contribución]. IV Congreso Latinoamericano de Estructuras de Maderas, Montevideo. https://www.researchgate.net/publication/338409673_INFLUENCIA_DEL_ANILLO_DE_CRECIMIENTO_EN_LAS_PROPIEDADES_FISICO-MECANICAS_DEL_PINO_RESINOSO_ARGENTINO_GROWTH_RING_INFLUENCE_ON_PHYSICAL_AND_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_ARGENTINEAN_RESINOUS_PINE
- Fromm, J. (2013). *Cellular Aspects of Wood Formation*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-36491-4>
- Gilbert, G., Ballesteros, J., Barrios-Rodríguez, C., Bonadies, E., Cedeño-Sánchez, M., Fossatti-Caballero, N., Trejos-Rodríguez, M., Pérez-Suñiga, J., Holub-Young, K., Henn, L., Thompson, J., García-López, C., Romo, A., Johnston, D., Barrick, P., Jordan, F., Hershovich, S., Russo, N., Sánchez, J., ... Hubbell, S. (2016) Use of sonic tomography to detect and quantify wood decay in living trees. *Applications in Plant Sciences*, 4(12), Artículo e1600060. <https://doi.org/10.3732/apps.1600060>
- Giménez, A., Moglia, J., Hernández, P., & Gerez, P. (2005). *Anatomía de madera*. Universidad Nacional de Santiago del Estero. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>
- Gomes, L., & Saracho, M. (2023). *Evaluación del efecto de regímenes de poda sobre el crecimiento y calidad de madera en Pinus taeda* [Trabajo Final de Grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/43761/1/GomesNavarroLeonardo.pdf>
- Google Earth. (2023). [Curticeiras, Rivera, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 5 de agosto de 2024, de https://earth.google.com/web/search/31%c2%b001%2711.37%22S+55%c2%b031%2755.81%22W/@-31.02048879,-55.53093008,194.45998594a,5517.96561874d,35y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCdbgUPY1Z0HAETSR7NbtZ0HAGZKRhwkFM0zAIR10471JNEzAQgIIAToDCgEwQgIIAEoNCP_____wEQAA

- Grabher, G., Weber, E., Pereyra, O., & Zaderenko, C. (2015). Determinación de la correlación entre mediciones del módulo de elasticidad "MOE" y módulo de rotura "MOR" en vigas laminadas, por Ultrasonido y máquina universal de ensayos. *Yvyrareta: Revista Forestal País de Árboles*, 22, 51-57.
http://www.yvyrareta.com.ar/images/descargas/N22/Articulo_Grabher_2015.pdf
- Hurrell, J., & Bazzano, D. (2007). *Pinos ornamentales y forestales*. LOLA.
- Íñiguez, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural* [Disertación doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital UPM. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.415>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Springer.
<https://static1.squarespace.com/static/5ff2adb3e3fe4fe33db902812/t/6009dd9fa7bc363aa822d2c7/1611259312432/ISLR+Seventh+Printing.pdf>
- Ley N° 13.723: [Primera Ley Forestal]. (1968). IMPO.
<https://www.impo.com.uy/bases/leyes-originales/13723-1968>
- Ley N° 15.939: *Ley Forestal: Fondo Forestal: Recursos Naturales*. (1987). IMPO.
<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
- Little, E. (1971). *Atlas of the United States trees: Vol. 3. Conifers and important hardwoods*. USDA Forest Service.
<https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/5005>
- Malan, F., & Kassier, W. (2002). Abnormal compression wood in *Pinus taeda*: A review of current knowledge and proposed future strategy. *Southern African Forestry Journal*, 194(1), 43-51. <https://doi.org/10.1080/20702620.2002.10434590>
- Marí, A., Torres, L., Oller, E., & Barris, C. (2021). Performance-based slenderness limits for deformations and reinforcement stresses control in reinforced concrete beams. *Hormigón y Acero*, 72(293), 31-37. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2112>

- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2).
<https://revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/1531/1326>
- Megraw, R. (1985). *Wood quality factors in loblolly pine: The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle*. TAPPI Press.
<https://search.worldcat.org/es/title/12330543?oclcNum=12330543>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2018, 1 de marzo). *Estrategia Nacional de Bosque Nativo*. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/estrategia_nacional_de_bosque_nativo.pdf
- Paiz, A. (2020). *¿Está incidiendo el cambio climático en las tasas de crecimiento de las plantaciones de Pinus taeda y Pinus elliottii en Uruguay?* [Trabajo Final de Grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/29060/1/TF%20-%20IF%202021%20Paiz%2c%20Aylen.pdf>
- Parham, A., & Côté, W. (1971). Distribution of Lignin in Normal and Compression Wood of Pinus taeda L. *Wood Science and Technology*, 5, 49-62.
<https://doi.org/10.1007/BF00363120>
- Pereyra, O., & Gelid, M. (2002). Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de Pinus taeda para plantaciones de Misiones y Norte de Corrientes. *Revista Floresta*, 33(1), 3-19. <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/2308/1928>
- Peterson, T. (1967). *Variation in radial growth patterns and specific gravity of red pine (Pinus resinosa Ait.)* [Disertación doctoral, University of Wisconsin]. University of Wisconsin-Madison Libraries.
<https://search.library.wisc.edu/catalog/999810748202121>

- Plada, F., & Stockle, G. (2011). *Relación entre el ángulo microfibrilar, módulo de elasticidad y módulo de ruptura en P. taeda cultivado en Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/9712/1/3656pla0.pdf>
- Quinlan, R. (1986). Induction of Decision Trees. *Machine Learning*, 1(1), 81-106.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00116251>
- Rinn, F., Schweingruber, F.-H., & Schär, E. (1996). Resistograph and X-Ray density charts of wood: Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, 50(4), 303-311.
<https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303>
- Rokach, L., & Maimon, O. (2008). *Data mining with decision trees: Theory and applications* (2nd ed.). World Scientific.
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5742232/mod_resource/content/1/Data%20Mining%20with%20Decision%20Trees%20Theory%20and%20Applications%20%282nd%20ed.%29%20%5BRokach%20%20Maimon%202014-10-23%5D.pdf
- Rosell, V. (2006). *Aportaciones a la mejora del cálculo del factor de forma mediante métodos proyectivos* [Disertación doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet. <https://www.dsic.upv.es/docs/bib-dig/tesis/etd-11092005-145237/TesisdefinitivaRosellRoig.pdf?form=MG0AV3>
- Saadat-Nia, M., Brancheriau, L., Gallet, P., Enayati, A., Pourtahmasi, K., & Honarvar, F. (2011). Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood. *BioResources*, 6(2), 1172-1185.
<https://doi.org/10.15376/biores.6.2.1172-1185>
- Sequera, C. (2017). *Particularidades de la aplicación de las técnicas no destructivas en la estimación de propiedades mecánicas en piezas de madera de gran longitud procedentes de estructuras existentes* [Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital UPM.
https://oa.upm.es/51760/1/TFG_CARLOS_OSUNA_SEQUERA.pdf

- Soust, P. (2012). A 25 años de la aprobación de la ley 15.939 (Ley Forestal). En *Anuario OPYPA* (pp. 167-172) MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2012>
- Trugilho, P. F., Da Silva, D. A., Frazão, F. J. L., & Matos, J. L. M. (1990). Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. *Acta Amazonica*, 20, 307-317. <https://doi.org/10.1590/1809-43921990201319>
- Van Der Sijde, H., Shaw, M., & Van Wyk, G. (1985). Reaction Wood in *Pinus taeda*: A Preliminary Report. *South African Forestry Journal*, 133(1), 27-32. <https://doi.org/10.1080/00382167.1985.9629570>