



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS EN ÁRBOLES EN PIE DE *Pinus montezumae* Lamb., UTILIZANDO MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

XUXAN ALYN ROSAS RAMOS

Bajo la supervisión de:

MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**

Chapingo, Estado de México, junio de 2024

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS
EN ÁRBOLES EN PIE DE *Pinus montezumae* Lamb., UTILIZANDO MÉTODOS
NO DESTRUCTIVOS

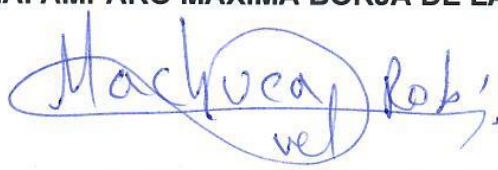
Tesis realizada por **XUXAN ALYN ROSAS RAMOS** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR



DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA



ASESOR

M.C ROBERTO MACHUCA VELASCO

ASESOR



DR. ALEJANDRO CORONA AMBRIZ

ASESOR



DRA. LILIANA CUAPIO HERNÁNDEZ

ÍNDICE

ÍNDICE	ii
DEDICATORIAS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
DATOS BIOGRÁFICOS	viii
RESUMEN GENERAL	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Problema de investigación	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo general	4
1.5.2 Objetivos particulares	4
1.6 Preguntas de investigación	5
1.7 Hipótesis	5
1.8 Contenido capitular del documento de titulación	6
1.9 Estructura capitular del documento de titulación	6
1.10 Literatura citada	7
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Marco conceptual	9
2.1.1 Características morfológicas de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	9
2.1.2 Distribución e importancia de <i>Pinus montezumae</i> Lamb., en los bosques de la Ciudad de México	10
2.1.3 Propiedades físico-mecánicas y características anatómicas de la madera	11
2.1.4 Evaluación no destructiva	15
2.1.5 Metodologías no destructivas en la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera	16
2.2 Marco de referencia	21
2.2.1 Estudios internacionales sobre la evaluación no destructiva	21

2.2.2 Evaluación no destructiva en México.....	24
2.2.3 Literatura citada	27
CAPÍTULO 3. EVALUATION OF WOOD QUALITY OF <i>PINUS MONTEZUMAE</i> LAMB. IN A DISTURBED FOREST USING NON-DESTRUCTIVE ACOUSTIC METHODS ...	41
CAPÍTULO 4. VARIACIÓN RADIAL DE LA MORFOLOGÍA DE TRAQUEIDAS Y DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA DE <i>PINUS MONTEZUMAE</i> LAMB.	59
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....	84
Anexos	85

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 3

Tab. 1: Categories of wood quality for structural use according to Gaceta oficial de la Ciudad de México (2017).....	46
Tab. 2: Descriptive statistics of green wood.	47
Tab. 3: Ultrasound velocity and longitudinal modulus of elasticity at 12% MC.....	47
Tab. 4: Comparison of sites.	49

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 4

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los árboles y morfología de traqueidas de <i>Pinus montezumae</i>	68
Tabla 2. Modelos de regresión segmentada para las características morfológicas de traqueidas en función de la densidad básica de <i>P. montezumae</i>	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contenido y estructura de la tesis	6
Figura 2. <i>Pinus montezumae</i> en Milpa Alta, Ciudad de México.	11

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Fig. 1: a) Location of the study area in Milpa Alta, Mexico City, b) measurement of ultrasonic time-of-flight in the cross-sectional and longitudinal sections of the trees.....	44
Fig. 2: Tests of normality, equality of variances, and comparative analysis of longitudinal modulus of elasticity.....	49
Fig. 3: Categories of wood quality for structural use of <i>P. montezumae</i>	50
Fig. 4: Wood quality for structural use of <i>P. montezumae</i> by sampling site for the two longitudinal sections.....	51

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 4

Figura 1. Obtención de núcleos de crecimiento en arboles de <i>Pinus montezumae</i>	65
Figura 2. División de los núcleos de crecimiento para la obtención de submuestras	65
Figura 3. Medición de la morfología de traqueidas, A) diámetro y diámetro de lumen 40x, B) longitud 10x	67
Figura 4. Variación radial de medula a corteza de la a) densidad básica, b) longitud de traqueidas, c) diámetro, d) diámetro de lumen y e) grosor de pared celular de <i>P. montezumae</i>	74
Figura 5. Relación entre las características morfológicas de traqueidas en función de la densidad básica de la madera de <i>P. montezumae</i> : a) longitud, b) diámetro, c) diámetro de lumen y c) grosor de pared celular	76

DEDICATORIAS

A Dios por bendecirme con una buena salud, habilidades y sobre todo la voluntad de superación y por permitirme seguir cosechando frutos en esta vida.

A mi esposo Erwin por su amor, comprensión, apoyo incondicional y por alentarme siempre a continuar con mi formación académica.

A mis padres Estela y Vicente por los grandes principios y valores que me inculcaron y los consejos que me ofrecieron.

A mi hermana Sandy por ser un pilar de apoyo incondicional y a mi pequeña sobrina Susan Ainara por ahora ser uno de los principales motivos para querer ser el mejor ejemplo para ella.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado para continuar con mi formación académica y la realización de mi investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo mi alma máter por abrirme sus puertas y brindarme la mejor formación profesional.

A la División de Ciencias Forestales por permitirme el uso de sus instalaciones y el apoyo de su personal académico y administrativo.

A mi directora de tesis la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa por su amistad, su enseñanza, experiencia, disposición y apoyo incondicional durante la ejecución de esta investigación.

Al M.C Roberto Machuca Velasco por la riqueza de conocimiento que me brindó, su disposición y consejos durante esta etapa de formación.

Dr. Alejandro Corona Ambriz por sus aportaciones en el área estadística y a los conocimientos impartidos en las asignaturas.

A la Dra. Liliana Cuapio Hernández por su amistad, entusiasmo y consejos que me facilitaron en gran medida la realización de esta investigación.

A la Sra. Adriana y Sra. Sandra, por su ayuda en los trámites administrativos y procedimientos de laboratorio.

A la Comunidad de Santa Ana Tlacotenco por permitirme llevar a cabo mi investigación en su predio y al Sr. Jacinto Victoria Reyes por su ayuda en el trabajo de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Xuxan Alyn Rosas Ramos

Fecha de nacimiento: 26 de noviembre de 1995

Lugar de nacimiento: Martínez de la Torre, Veracruz, México.

CURP: RORX951126MVZSMX04

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cedula profesional: 12289239

Desarrollo académico

Bachillerato: 2011-2014 Telebachillerato Colipa, Colipa, Veracruz.

Licenciatura: 2015-2019 Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Texcoco, Estado de México.

RESUMEN GENERAL

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS EN ÁRBOLES EN PIE DE *Pinus montezumae* Lamb., UTILIZANDO MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS¹

La valoración de la calidad de la madera en arbolado mediante métodos no destructivos ofrece la oportunidad de determinar el potencial productivo final de la madera proveniente de bosques afectados por incendios forestales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el módulo de elasticidad dinámico, calidad de madera para uso estructural, variación radial de la morfometría de traqueidas y densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus montezumae* Lamb., de un bosque natural afectado por incendios forestales en Milpa Alta, Ciudad de México, México. El módulo de elasticidad dinámico se determinó con un método acústico mediante la medición del tiempo de vuelo del ultrasonido para la sección transversal a 1.30 m de altura y dos secciones longitudinales de 2 m de largo, el tamaño de muestra fueron 70 árboles seleccionados al azar. Para estimar la densidad básica de la madera y morfometría de las traqueidas se extrajeron 42 núcleos de crecimiento a 1.30 m de altura (DAP), la medición de las variables se realizó cada cinco anillos de crecimiento. Los resultados indican diferencias estadísticas significativas para el módulo de elasticidad de las dos secciones longitudinales, los patrones de variación radial de la densidad básica, longitud de traqueidas, ancho total y grosor de pared celular mostraron una tendencia creciente de medula a corteza. También, las relaciones lineales de la longitud de traqueidas y el grosor de la pared celular en función de la densidad básica fueron positivas. De esta manera se concluye que, la calidad de la madera del arbolado de *P. montezumae* afectado por incendios forestales disminuye en la zona longitudinal más cercana al suelo, la sección media del fuste presenta potencial para uso estructural. Además, para esta especie, la densidad básica de la madera funciona como buen predictor de la longitud y el grosor de la pared celular de las traqueidas.

Palabras clave: fakopp, biometría de traqueidas, onda acústica, densidad básica, ultrasonidos.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Xuxan Alyn Rosas Ramos

Director de Tesis: Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

ABSTRACT

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS IN STANDING TREES OF *Pinus montezumae* Lamb. USING NON-DESTRUCTIVE METHODS¹

Assessment of wood quality in standing trees using non-destructive methods provides the opportunity to determine the final productive potential of wood from forests affected by wildfires. The aim of this study was to evaluate the dynamic modulus of elasticity, wood quality for structural use, radial variation of tracheid morphometry, and wood basic density in standing *Pinus montezumae* Lamb. trees from a natural forest affected by wildfires in Milpa Alta, Mexico City, Mexico. The dynamic modulus of elasticity was determined using an acoustic method by measuring ultrasound time-of-flight for the cross section at 1.30 m stem height and two longitudinal sections of 2 m length, with a sample size of 70 randomly selected trees. Wood basic density and tracheid morphometry were estimated using 42 increment cores extracted at 1.30 m stem height (DBH), with measurements taken every five growth rings. Results indicate statistically significant differences in modulus of elasticity between the two longitudinal sections, while radial variation patterns of wood basic density, tracheid length, total width, and cell wall thickness showed an increasing trend from pith to bark. Additionally, linear relationships of tracheid length and cell wall thickness with wood basic density were positive. It is concluded that the wood quality of wildfire-affected *P. montezumae* trees decreases in the lower longitudinal zone, which is closest to the ground, while the middle stem section shows potential for structural use. Moreover, for this species, wood basic density serves as a good predictor of tracheid length and cell wall thickness.

Keywords: fakopp, tracheid biometric, acoustic wave, basic density, ultrasounds.

¹Master's Thesis in Forest Sciences, Chapingo Autonomous University

Author: Xuxan Alyn Rosas Ramos

Thesis Advisor: Dr. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

Los estudios sobre la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera generalmente son llevados a cabo por medio de la aplicación de técnicas destructivas convencionales a través de ensayos estáticos, los cuales, además de requerir del derribo de árboles demandan también la destrucción total o parcial de las piezas (Correa et al., 2017). En consecuencia, las evaluaciones no destructivas se han vuelto cada vez más relevantes y significativas en los últimos años, debido al surgimiento de técnicas y tecnologías no invasivas que eliminan la necesidad de disponer de individuos para su estudio.

La evaluación no destructiva se define como la ciencia de identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza o material sin alterar dichas propiedades y su capacidad de uso final (Ross, 2015). Estas evaluaciones se basan en ensayos no destructivos -Non destructive testing (NDT, por sus siglas en inglés) para brindar información sobre las propiedades, el desempeño o la condición de los materiales (Ross & Pellerin, 1994).

Son diversas las técnicas que se encuentran dentro de los ensayos no destructivos, las principales son las pruebas acústicas o de ultrasonido (Ross, 2015). Estas pruebas, según Soto et al. (2012) se basan en la propagación de ondas de tensión que viajan a través de una porción del fuste de un árbol o a lo largo de una troza.

Entre las investigaciones basadas en la utilización de métodos no destructivos de ultrasonidos aplicados a la evaluación de la madera destacan autores como Auty & Achim (2008), quienes evaluaron algunas propiedades mecánicas de la madera (módulo de elasticidad y módulo de ruptura) aplicado a árboles en pie de *Pinus sylvestris* L. mediante pruebas acústicas. De manera similar, Soto et al. (2012) midieron el tiempo de vuelo de la onda acústica en árboles en pie y trozas de *Pinus radiata* D. Don para la determinación del módulo de elasticidad dinámico.

Por su parte, Baradit et al. (2013), evaluaron algunas propiedades físico-mecánicas en maderas de algunas latifoliadas y coníferas por medio de ultrasonido. De igual modo, Sotomayor-Castellanos (2014) aborda una amplia gama de estudios sobre la caracterización mecánica de la madera de especies mexicanas mediante la utilización de métodos no destructivos, entre los que destacan la utilización de métodos acústicos.

Dentro de los estudios más recientes destacan los realizados por Omonte & Valenzuela-Hurtado (2020) sobre las relaciones entre la velocidad de la onda acústica con la densidad, diámetro normal y esbeltez en árboles y trozas de *Eucalyptus nitens* Maiden a diferentes densidades de plantación inicial. Arriaga et al. (2022) abordan la utilización de equipos de ultrasonido para la determinación de los módulos de elasticidad y ruptura en madera de *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco. Por último, Acuña et al. (2023) mediante el empleo de vibraciones transversales en voladizo y ultrasonidos evaluaron la predicción del módulo de elasticidad de flexión global en diversas especies forestales europeas.

1.2 Justificación

La investigación científica actualmente en la Alcaldía de Milpa Alta se ha focalizado a estudiar aspectos relacionados con la agricultura, son numerosos los estudios sobre el cultivo de nopal verdura abordado por autores como Apodaca-Pérez et al. (2016), Osorio-Córdoba et al. (2011) y Palomares-Pérez et al. (2015); además del ámbito socio-cultural de los pueblos originarios de Milpa Alta, debatido por Carmona & Tetreault (2021), Larroa & Rodas (2016) y Rodarte (2018).

Los estudios en el ámbito forestal hasta el momento son pocos y se han enfocado a analizar temas superficiales relacionados con los bosques, algunos autores como De León-González et al. (2015) y Rodríguez & López (2006) generan un primer acercamiento con sus investigaciones al abordar aspectos del medio biofísico, pero sin adentrarse a evaluar alguna característica de la masa arbórea como objeto de estudio.

Aunado a lo anterior, son prácticamente inexistentes las investigaciones enfocadas a un tema muy específico del arbolado en este caso la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas de la madera, así mismo, el régimen actual de políticas públicas en materia forestal en la Ciudad de México no permite la evaluación de estas propiedades utilizando métodos destructivos convencionales, es por ello que la implementación de técnicas de evaluación no destructiva utilizadas en esta investigación representa un área de oportunidad para generar información útil y relevante para beneficio de la comunidad, asimismo, los resultados contribuirán y propiciarán el surgimiento de futuras investigaciones además de servir en la generación de políticas públicas adecuadas para el manejo forestal sustentable de estas zonas.

Finalmente, es importante mencionar que, con esta investigación se propone una metodología alternativa, práctica y viable para evaluar las condiciones maderables de los recursos forestales con una visión más conservacionista en zonas bajo algún régimen de protección donde no es posible o se encuentra limitada la evaluación convencional.

1.3 Planteamiento del problema

Es fundamental generar información para el conocimiento de la madera de las especies arbóreas presentes en los bosques de la Ciudad de México, entre las que destaca *Pinus montezumae* Lamb., por su importancia, distribución y predominancia; motivo por el cual, mediante su estudio se pretende crear un primer acercamiento y, a su vez, funja como referencia y punto de partida para posteriores análisis que amplíen el estado de conocimiento de la especie, así como la utilización de la información para la adecuación e implementación de prácticas de manejo forestal comunitario específicos para estas zonas.

1.4 Problema de investigación

La principal interrogativa de investigación es ¿Cuál es el estado actual y cuál es el comportamiento de las principales propiedades físico-mecánicas y

características anatómicas de la madera en pie de *Pinus montezumae* en la Alcaldía con mayor superficie forestal de la Ciudad de México?

Milpa Alta es una de las demarcaciones territoriales que posee una alta distribución de bosques naturales con especies arbóreas de gran importancia ecológica por lo cual resulta necesario evaluar el conjunto de variables indicadoras de la calidad de la madera a través del módulo de elasticidad dinámico, así como la caracterización radial de la anatomía de traqueidas y la generación de modelos de predicción a través de la densidad básica de esta especie.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades físico-mecánicas y características anatómicas de la madera en pie de *Pinus montezumae* Lamb., mediante la utilización de técnicas no destructivas en Milpa Alta, Ciudad de México, a fin de conocer la calidad de la madera para uso estructural, así como también obtener patrones de variación radial de las características morfológicas de traqueidas y su relación con la densidad básica de la madera.

1.5.2 Objetivos particulares

- Determinar el módulo de elasticidad dinámico en estado verde y al 12% de humedad de la madera mediante equipo de ultrasonido para comprobar si existen diferencias estadísticas significativas en dos secciones longitudinales del arbolado (0-2 m y 2-4 m)
- Clasificar la calidad de madera estructural para las dos secciones longitudinales a través del módulo de elasticidad dinámico al 12% de humedad para conocer los usos potenciales de la madera de esta especie en la construcción.

- Estimar la densidad básica de la madera en pie mediante métodos no destructivos para conocer su patrón de variación radial en los árboles.
- Medir la longitud, diámetro total, diámetro de lumen y espesor de la pared celular de las traqueidas para conocer su relación con la densidad básica de la madera y su variabilidad en el eje radial.

1.6 Preguntas de investigación

Las preguntas que surgen a partir del problema de investigación son las siguientes:

¿Existe variación del Módulo de elasticidad dinámico en dos secciones longitudinales del árbol?

¿Cuáles son las calidades de madera estructural de *P. montezumae* presentes en la zona de estudio? ¿Para qué otros usos pudiera emplearse la madera de esta especie?

¿Cuál es el patrón de variación radial de la densidad básica, la longitud de traqueidas, diámetro total, diámetro de lumen y grosor de pared celular? y ¿están correlacionadas estas variables morfológicas con la densidad básica de la madera?

1.7 Hipótesis

Existe diferencia de medias del módulo de elasticidad dinámico para las dos secciones longitudinales del árbol.

Existe variación en la densidad básica de la madera, longitud de traqueidas, diámetro, diámetro de lumen y grosor de pared celular en el corte radial, además de una alta correlación entre las variables morfológicas con la densidad básica.

1.8 Contenido capitular del documento de titulación

El documento de titulación incluye el siguiente contenido: una portada, hoja de aprobación del comité asesor, tabla de contenido, lista de cuadros, lista de figuras, dedicatoria, agradecimientos, datos biográficos del autor, resumen general y abstract. Posteriormente, se desglosa el **capítulo uno** que corresponde a la *Introducción general* donde se describe la importancia del problema investigado, algunos antecedentes, la justificación, objetivos e hipótesis del estudio. En el **capítulo dos**, se aborda la *Revisión de literatura* sobre el estado de conocimiento del problema de estudio. El **capítulo tres y cuatro** presenta los resultados de la investigación en formato de *Artículos científicos* y finalmente se presentan las conclusiones generales de la investigación.

1.9 Estructura capitular del documento de titulación

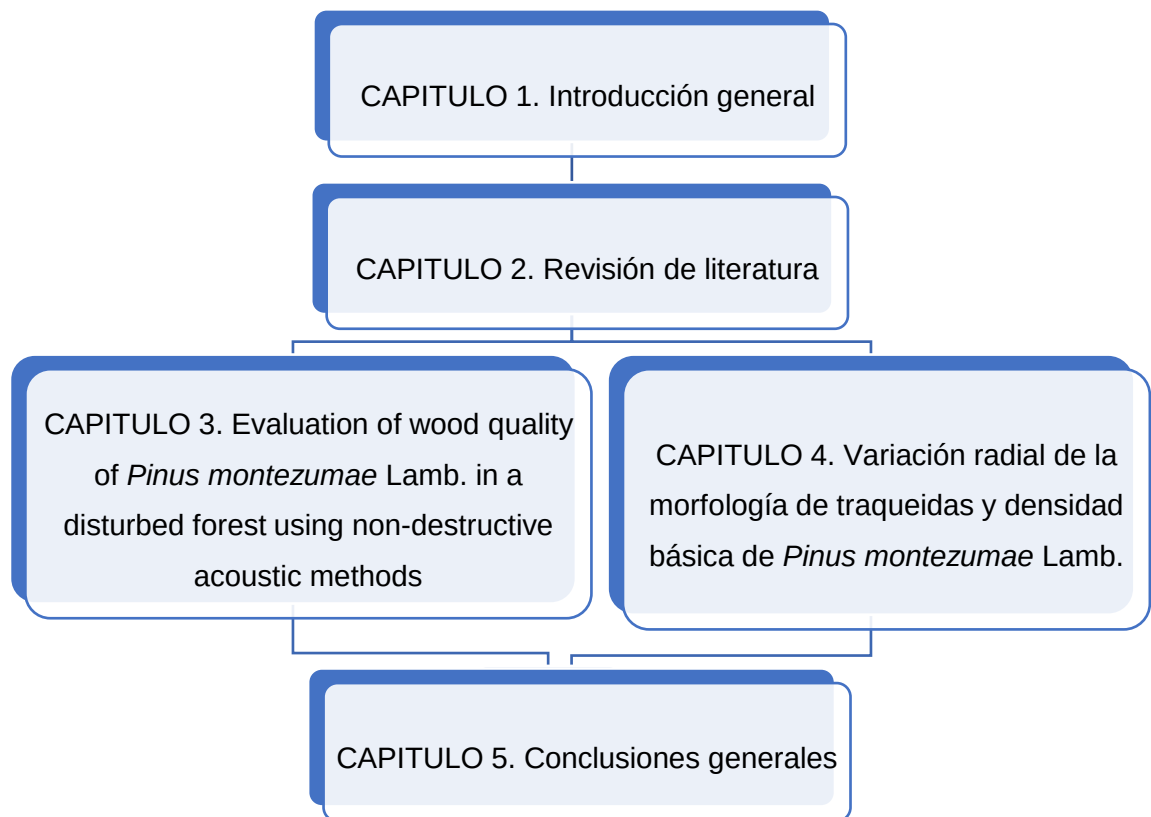


Figura 1. Contenido y estructura de la tesis

1.10 Literatura citada

- Acuña, L., Martínez, R., Spavento, E., Casado, M., Álvarez-Martínez, J., O’Ceallaigh, C., Harte, A. M., & Balmori, J. A. (2023). Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. *Construction and Building Materials*, 371(December 2022), 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130750>
- Apodaca-Pérez, J. M., Martínez-Miranda, M. de la L., Robles-Burgueño, M. del R., & Rodríguez Félix, A. (2016). Polifenoloxidasas, fenoles totales y oscurecimiento de nopal verdura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 531–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.306>
- Arriaga, F., Osuna-Sequera, C., Bobadilla, I., & Esteban, M. (2022). Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. *Construction and Building Materials*, 322(January), 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>
- Auty, D., & Achim, A. (2008). The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry*, 81(4), 475–487. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn015>
- Baradit, E., Niemz, P., & Fernández-Pérez, A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(2), 235–244. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2013005000019>
- Correa, M. V., Veloso, G. D., & Rosato, V. G. (2017). La madera como elemento estructural. In *Bioalteración, Protección y Conservación de Maderas* (1st ed., p. 96). Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).
- Carmona, M. J. R., & Tetreault, D. (2021). Pueblos originarios, formas de comunalidad y resistencia en Milpa Alta. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 66(241), 155–180. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22201/fcpys.2448492xe.2020.241.70796>
- De León-González, F., Fuentes-Ponce, M., Bautista-Cruz, M., Leyva-Pablo, T., Castillo-Juárez, H., Rodríguez-Sánchez, L. M., & Miranda-García, G. (2015). Medición de emisiones de CO₂ del suelo en bosque de pino-encino, y en maíz y nopal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. In P. F. Paz, G. J. Wong, & A. R. Torres (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015* (pp. 695–701). Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del CambioGlobal y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

- Larroa Torres, R. M., & Rodas Sánchez, L. (2016). Gobernanza y territorialidad campesina: los nopaleros de Milpa Alta. In G. Torres Salcido (Ed.), *Territorios en movimiento: sistemas agroalimentarios localizados, innovación y gobernanza* (pp. 205–277). Bonilla Artigas Editores.
- Omote, M., & Valenzuela-Hurtado, L. (2020). Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22(4), 559–568. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000414>
- Osorio-Córdoba, J., Pelayo-Zaldívar, C., Verde-Calvo, J. R., Ponce-Valadez, M., Díaz de León-Sánchez, F., Bosquez-Molina, E., & Rodríguez-Huezo, E. (2011). Conservación de nopal verdura “Milpa Alta” (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 93–104.
- Palomares-Pérez, M., Rodríguez-Vélez, B., & Ayala-Zermeño, M. Á. (2015). Nematodos asociados al nopal *Opuntia ficus-indica* L. (Miller) en Milpa Alta, Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(11), 2205–2209. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.799>
- Rodarte, W. M. M. (2018). *Los pueblos de Milpa Alta. Reconstitución sociocultural. religión comunitaria y ciclo festivo* (I. N. de A. e Historia (ed.); 1st ed.).
- Rodríguez, G. M. D. L., & López, B. J. (2006). Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 60, 46–61.
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (2nd ed.). General Technical Report FPL-GTR-238. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2000.tb01345.x>
- Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (1994). Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. In *General Technical Report FPL-GTR-70*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Soto, L., Valenzuela, L., & Lasserre, J. P. (2012). Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de pino radiata de 28 años, en la zona de renales, Chile. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 14(2), 209–224. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200008>
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2014). Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos (J. R. Sotomayor Castellanos (ed.); 1st ed.). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Características morfológicas de *Pinus montezumae* Lamb.

Pinus montezumae Lamb., pertenece a la clase Pinopsida, orden de las Pinales, familia Pinaceae y genero *Pinus* (Departamento de Botánica del Instituto de Biología (IBUNAM), 2019), conocido comúnmente como pino montezuma, pino y ocote (Lira González, 2020).

Es un árbol de 20 a 35 m de altura, monopódico con fuste que va de los 50 a 80 cm de diámetro. Las ramas son largas y muy horizontales, formando una copa pequeña y redondeada (Lira González, 2020), distribuyéndose en la tercera parte superior del árbol, aunque en sitios con baja densidad arbórea la copa es marcadamente amplia desde el segundo tercio del fuste (Herrera-Hernández & Escobar-Alonso, 2021).

La corteza es gruesa, escamosa, rompiéndose en escamas o placas irregulares, divididas por surcos someros o profundos, color café-oscuro, a grisácea (Estrada Castillón et al., 2014). Las acículas son rectas de 20-35 cm de longitud, el tipo de vaina es persistente con 5 acículas por vaina (Lira González, 2020), conos femeninos solitarios o en verticilos de 3-6, corto pedunculados, el pedúnculo 1-2 cm largo, con forma ovoides a cilíndricos, simétricos o ligeramente curvados en la base; escamas 80-150, raras veces hasta 250, con forma de cuña, abriéndose gradualmente, lignificadas, rígidas y apófisis levantadas especialmente en las escamas basales (Estrada Castillón et al., 2014). La semilla es de color café-claro de 5-7 mm de longitud y ala articulada (Lira González, 2020).

Se distribuye en climas templados en un rango altitudinal de 1,150-3,350 msnm (Lira González, 2020), con un régimen de precipitación anual que van de los 800 a 1200 mm y temperaturas medias de 22°C en el mes más cálido y -5°C en el mes más frío (Rodríguez Franco, 1997).

2.1.2 Distribución e importancia de *Pinus montezumae* Lamb., en los bosques de la Ciudad de México

México cuenta con una superficie de bosques de 34,846,606 hectáreas, lo que representa un 25.1% de la superficie total del territorio, estos se encuentran distribuidos en asociaciones de coníferas, coníferas-latifoliadas, latifoliadas y bosque mesófilo (Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2020).

Específicamente para la Ciudad de México la CONAFOR (2020) reporta que 40,978.8 hectáreas están cubiertas por ecosistemas de bosques, esto representa un 27.4% de su superficie total. En estas áreas boscosas las coníferas representan la formación forestal con mayor presencia y distribución (Perry, 1991), centrándose principalmente en el área administrativa denominada Suelo de Conservación de la Ciudad de México al sur y sur-poniente, específicamente en las alcaldías Tlalpan, Milpa Alta, La Magdalena Contreras, Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón.

Por su parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) & Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) (2021) señalan que, en los bosques de coníferas de la Ciudad de México las principales especies que integran estos ecosistemas son *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus lehmannii* Schltdl. & Cham., *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus rudis* Endl. y *Pinus teocote* Cham. & Schltdl. De estas especies, una de las que tiene mayor presencia y distribución sobre todo en el centro del país a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal es *P. Montezumae* (Perry, 1991; Herrera-Hernández & Escobar-Alonso, 2021).

Pinus montezumae es una especie maderable de gran importancia económica en nuestro país, su madera se emplea para aserrío, triplay, ebanistería y construcción, también apreciada para la resinación (Lira González, 2020). Para la Ciudad de México, la importancia de la especie se centra principalmente en su papel ecológico debido a la prohibición de su aprovechamiento por el decreto de “Veda total indefinida de recuperación y de servicio para todos los bosques del

Estado de México y del Distrito Federal”, en el año de 1947 y que continua vigente hasta el día de hoy (Diario Oficial de la Federación, 1947). Por tal razón, la importancia de los bosques radica principalmente en la generación de servicios ecosistémicos como la producción de agua, disminución en niveles de contaminación, reservorio de biodiversidad, regulación del clima, retención de agua y suelo, recreación, turismo alternativo y cultural (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016).



Figura 2. *Pinus montezumae* en Milpa Alta, Ciudad de México.

2.1.3 Propiedades físico-mecánicas y características anatómicas de la madera

Densidad básica de la madera

Fabisiak & Fabisiak (2021) refieren que las propiedades de la madera se encuentran determinadas por tres elementos principales: la estructura microscópica (forma de las células y sus dimensiones), la estructura submicroscópica (la estructuración de las capas y la distribución de los compuestos en la pared celular) y por la densidad de la madera (relación masa-volumen).

La densidad es una propiedad física que expresa la relación entre el peso y el volumen de la madera (Vignote & Martínez, 2006), además Zobel (2004) menciona cuanto mayor sea esta relación más densa será la madera.

Tanto el peso como el volumen de la madera están afectados por el porcentaje de humedad, por lo cual, al referirse a la densidad se debe siempre indicar el contenido de humedad, esta puede ser al 0% de humedad (estado anhidra), al 12% (estado normal o equilibrio) u otro contenido de humedad de la madera (Vignote & Martínez, 2006). Por lo tanto, la madera al ser un material higroscópico, su densidad dependerá y variará con el contenido de humedad (Blankenhorn, 2001).

La densidad básica es la propiedad más útil de la densidad de la madera, el termino “básico” enfatiza que tanto los parametros medidos, el peso seco y el volumen tienen valores constantes y reproducibles (Walker, 2006).

Walker (2006) establece mediante la siguiente formula la determinación de la densidad básica de la madera.

$$Db = \frac{Po}{Vv}$$

Donde:

Db: densidad básica (g/cm³)

Po: peso anhidro (g)

Vv: volumen verde (cm³)

La densidad es la propiedad más importante debido a que tiene el efecto más relevante sobre cualquier otra propiedad en la calidad de la madera (Zobel & Jett, 1995). Para Blankenhorn (2001) la densidad posee una estrecha relación con las propiedades mecánicas de la madera, a medida que se incrementa la densidad, la resistencia de la madera también aumenta. Otros autores como Shelly (2001)

coinciden que las maderas de menor densidad presentan propiedades de resistencia y rigidez inferiores, además, la densidad es un buen predictor de estas dos propiedades mecánicas.

Módulo de elasticidad dinámico

La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco-elástico, ante la aplicación de una carga inferior al límite elástico, esta se deformará, y recuperará su forma cuando la carga a la que está sometida cesa (Vignote & Martínez, 2006). A esta relación entre el esfuerzo aplicado y la deformidad producida se le conoce como Modulo de elasticidad (Prada & Martínez, 1998).

El módulo de elasticidad (MOE) también conocido como rigidez, es una de las propiedades mecánicas más importantes y es el indicador mayormente utilizado sobre la capacidad que presenta la madera para resistir la flexión y soportar cargas (Amishev & Murphy, 2008).

En la madera, se pueden determinar dos tipos de módulos de elasticidad (MOE), uno estático (MOEe) y otro dinámico (MOEd). El módulo dinámico es una magnitud intensiva que representa la cantidad de energía elástica que puede almacenar un volumen de madera (Sotomayor & Villaseñor, 2016).

Según Soto et al. (2012) para la evaluación del Módulo de Elasticidad Dinámico MOEd se usan dispositivos que facilitan el viaje de ondas acústicas a través del elemento de madera y registran el tiempo o la velocidad de tránsito de estas ondas, que en conjunto con la densidad de la madera permiten obtener el MOEd.

Por su parte, Schimleck et al. (2019) establece que, al medir la velocidad de onda acústica (AV) es posible predecir el módulo de elasticidad dinámico a través de la siguiente formula:

$$MOE_d = \rho AV^2$$

Donde:

MOE_d : Módulo de elasticidad dinámico (N/m^2),

ρ : Densidad de la madera (kg/m^3)

AV : Velocidad del ultrasonido (m/s)

Longitud de traqueidas

Las coníferas a diferencia de las latifoliadas presentan una construcción celular más simple y con una especialización celular menos marcada, estas se encuentran conformadas por dos tipos de células: traqueidas y células parenquimáticas (CONAFOR & Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), 2011).

En las coníferas el 90% de las células son de tipo traqueida, con funciones principales de conducción y sostén, generalmente orientadas en sentido longitudinal del árbol (Vignote & Martínez, 2006). Estas células tienen forma de tubo, alargadas, estrechas y acabadas en punta cuya longitud varía de 2 a 5 mm en la madera madura, sin embargo, algunas especies pueden tener traqueidas más largas (Walker, 2006). Además, de acuerdo con CONAFOR & UMSNH, (2011), estas células en la madera temprana se caracterizan por poseer lúmenes amplios y paredes delgadas mientras que en la madera tardía presentan lúmenes estrechos y paredes gruesas, conectándose entre sí por medio de perforaciones en la pared celular llamadas puntuaciones permitiendo con ello la conducción y flujo de líquidos.

Por otro lado, la longitud de las traqueidas en maderas blandas varía tanto dentro de los anillos de crecimiento como a lo largo del fuste. En *Pinus radiata* la longitud de la traqueida y el grosor de la pared celular aumentan gradualmente desde la medula hacia la corteza, siendo la longitud de la traqueida en los primeros anillos de crecimiento típicamente la mitad de la que se encuentra en los 10 anillos cercanos a la corteza (Walker, 2006).

Defectos internos en árboles

Los defectos o daños internos en los árboles se deben principalmente a alteraciones de origen biótico (plagas y enfermedades), las cuales pueden provocar anomalías de gran importancia en los árboles e inclusive a nivel ecosistema (Vignote & Martínez, 2006).

Dentro de estos daños, las pudriciones son uno de los problemas más comunes en árboles en pie, ocasionados por la proliferación de hongos a través de heridas en el fuste causadas por caída de árboles y ramas colindantes, viento, rayos; o cuando el árbol está debilitado por diversos agentes de perturbación (Vignote & Martínez, 2006).

Por otro lado, el ataque de plagas ocasiona también daños importantes de tipo mecánico o fisiológico en los árboles, como huecos, deformaciones, disminución en el crecimiento, debilitamiento o incluso la muerte de los árboles (Leautaud Valenzuela & López García, 2017).

Los defectos y daños internos según Vignote & Martínez (2006) suponen la pérdida de características físicas como la densidad y sobre todo la pérdida de características mecánicas de resistencia repercutiendo considerablemente en estas propiedades entre las que se destaca el módulo de elasticidad.

Estos defectos o discontinuidades en árboles pueden identificarse mediante ensayos no destructivos de pruebas ultrasónicas (Bucur, 2006).

2.1.4 Evaluación no destructiva

La evaluación no destructiva es la ciencia de identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza o material sin alterar esas mismas propiedades y su capacidad de uso final. Se basan en la aplicación de técnicas o pruebas que proporcionen información precisa, rápida y fácil sobre las propiedades, rendimiento o estado del material en cuestión (Ross, 2015).

Dentro de la evaluación no destructiva, son varios los métodos empleados para el estudio de las propiedades y características tecnológicas de la madera, uno de los más utilizados es la clasificación visual a través de la observación de los defectos naturales, los daños y deterioros de los individuos, productos y estructuras maderables. Además de la clasificación visual, están otros métodos de tipo instrumentales los cuales se encuentran incluidos dentro de las llamadas pruebas no destructivas -Nondestructive testing (NDT) y se caracterizan por no dejar huellas permanentes en los objetos o individuos analizados o en su caso ocasionar un bajo impacto generalmente pequeños agujeros (López et al., 2023).

Los NDT engloban una serie de pruebas físicas, entre las que destacan las técnicas de evaluación eléctricas, vibratorias y propagación de onda acústica (Ross, 2015). Entre las herramientas comúnmente utilizadas para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la madera en pie y aserrada se encuentran los métodos de tipo acústicos (ultrasonidos) utilizados principalmente para la estimación y predicción del módulo de elasticidad y la detección de defectos internos (Schimleck et al., 2019).

2.1.5 Metodologías no destructivas en la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera

Existe una serie de herramientas comúnmente utilizadas en las pruebas o ensayos no destructivos entre los cuales están el resistógrafo, penetrómetro (pilodyn), rigidímetro, espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR), tomografía computarizada (TC) e instrumentos basados en la transmisión de rayos-X (SilviScan) y ultrasonidos (Fakopp y Sylvatest) (Schimleck et al., 2019).

Resistógrafo

Esta prueba se basa en el empleo de un microtaladro mecánico semidestructivo el cual mide la resistencia de la madera a la perforación, con ayuda de un gráfico se muestra el perfil de resistencia basado en trayectorias cruzadas (De Jesus et al., 2023). Este instrumento de acuerdo con Schimleck et al. (2019) impulsa una aguja de 3 mm de diámetro a través del fuste del árbol a una velocidad de avance

(cm/min) y rotación constante (rpm), midiendo la resistencia que produce la madera al giro de la aguja generando un trazo o resistograma de variación radial o perfil de resistencia cada 0.1 mm.

El resistógrafo permite la detección de cambios en la densidad relativa de la madera en la trayectoria de perforación, así como la utilidad para diagnosticar el estado interno y detectar defectos tanto en árboles en pie como en estructuras de madera. Asimismo, se destaca que, a través del resistograma se revela la variación de la densidad inducida por la alternancia de la madera temprana y tardía, presencia de nudos, cavidades y diversos estados de deterioro (Fundova et al., 2018; İçel & Güler, 2016).

Generalmente la madera sana tiene una alta resistencia al microtaladro porque es más densa, de textura dura y difícil de penetrar, mientras que, la madera deteriorada se caracteriza por ser más suave y oponer una menor resistencia a la perforación (Karlinasari et al., 2017).

Uno de los principales inconvenientes sobre la utilización del resistógrafo es la tendencia creciente de los valores, causada por la fricción acumulada de la aguja por lo que es indispensable eliminarla a través de ajustes para no generar sesgo en las estimaciones de la densidad (Fundova et al., 2018).

Penetrómetro Pilodyn

El pilodyn es una herramienta de tipo portátil que se utiliza para la estimación indirecta de la densidad de la madera en árboles en pie (Schimleck et al., 2019), mide la profundidad de penetración de un pasador de 2, 2.5 y 3 mm de diámetro accionado por un resorte que se dispara en la madera con una fuerza determinada y conocida (Fundova et al., 2018).

Para el uso de este instrumento en árboles en pie se requiere necesariamente de la eliminación de una porción o sección de corteza previo a la medición, además, la profundidad de penetración del pasador o alfiler está inversamente correlacionada con la densidad de la madera del árbol (Gao et al., 2017; Schimleck et al., 2019).

Una de las principales desventajas de la utilización de este instrumento es la limitada profundidad de penetración generalmente de 2 a 3 cm, por lo tanto no permite conocer el comportamiento en el resto del perfil radial de los árboles (Fundova et al., 2018).

Rigidímetro

El rigidímetro fue diseñado para evaluar el Módulo de elasticidad directamente en árboles en pie, se encuentra conformado por dos unidades independientes, la primera unidad es un mecanismo de flexión del tronco mientras que la segunda mide la deflexión resultante (Pâques & Rozenberg, 2009).

El principio básico de este instrumento se basa en su fijación al fuste del árbol para aplicar una presión generada por una bomba hidráulica que permiten doblar el tronco dentro de la región elástica de la curva tensión-deformación para posteriormente medir la deflexión media con una precisión de hasta 10 μm (Schimleck et al., 2019). Esta técnica se caracteriza por su fácil aplicación directamente en campo causando escaso daño en los individuos a nivel de corteza. Para ello, se recomienda destinar un área lo suficientemente grande entre los soportes de este equipo que permita disminuir la presión en esos puntos y con ello disminuir los daños superficiales en los árboles (Launay et al., 2002).

Espectroscopia del Infrarrojo Cercano (NIR)

Esta técnica utiliza espectros medidos en la región NIR del espectro electromagnético (1200 a 2500 nm). Estos consisten en bandas combinadas de vibraciones de estiramiento fundamentales de los grupos funcionales O-H, N-H y C-H observados en la región del infrarrojo medio. Los componentes de la madera (celulosa, extractivos, hemicelulosa y lignina) poseen estos grupos funcionales por esta razón cualquier cambio en las propiedades de la madera se puede detectar a través de esta técnica (Schimleck et al., 2019).

El principio fundamental de esta tecnología radica en la absorción de determinadas longitudes de onda por determinados compuestos, cada molécula

orgánica de la madera tiene un espectro específico, análogamente comparado con una huella digital. El empleo de la espectroscopia NIR en el ámbito forestal se ha enfocado básicamente en la evaluación de la calidad y rendimiento de la madera para pulpa sobre todo en plantaciones de eucalipto (Schimleck et al., 2000).

Los espectros NIR predicen las propiedades físico-mecánicas de la madera, se han empleado para evaluar la densidad, ángulo microfibrilar, longitud de traqueidas, módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE). En este sentido, el espectro NIR se relaciona con las propiedades de la madera a través de escasos milímetros de profundidad en las muestras. Una de las ventajas que ofrece su utilización es la mínima cantidad de madera requerida de árboles en pie o piezas de madera aserrada (Acuña & Murphy, 2007).

Tomografía computarizada (TC)

Esta tecnología se basa en la combinación de elementos físicos, matemáticos e informáticos, la cual se conforma de un escáner que contiene un tubo de rayos X que genera un haz de fotones que inciden sobre un objeto, al atravesarlo sufren diversas interacciones mediante fenómenos de absorción, en este proceso la radiación no absorbida es captada por los detectores transformándola en señales eléctricas para finalmente traducirla en la generación de imágenes digitales cuya utilización permite el estudio de materiales u objetos cuya densidad sea similar a la del cuerpo humano como es el caso de la madera (Fraguas, 2022).

La tomografía computarizada TC permite conocer las variaciones de la densidad de un material, las áreas con una densidad más alta se reflejan en la imagen con tonos más claros, mientras que, las áreas con una densidad más baja aparecen en tonos más oscuros, es precisamente esta escala de grises lo que posibilita la detección de defectos internos tales como nudos, grietas y la medula en árboles en pie (Aguilera et al., 2002).

SilviScan

Esta técnica es un sistema enfocado principalmente al análisis de pequeñas muestras de madera, generalmente núcleos de crecimiento, cuyos componentes principales son: escáner óptico de células, densitómetro de rayos X y difractómetro de rayos X (Schimleck et al., 2019).

Esta tecnología utiliza mediciones de transmisión de rayos X junto con imágenes ópticas para la caracterización dimensional longitudinales y radiales de las traqueidas o fibras, pared celular, el ángulo de las microfibrillas, la densidad de la madera de núcleos especialmente preparados y el módulo de elasticidad (Downes et al., 2022; Vahey et al., 2006).

Métodos acústicos

Los métodos acústicos agrupan diferentes técnicas basadas en la propagación de ondas acústicas, se dividen dependiendo de su frecuencia en infrasonido, sonido y ultrasonido (Muzzioli, 1953). Este último, comprende frecuencias sobre el rango del umbral de la audición humana (20kHz) (Karsulovic et al., 2008).

En la evaluación de la madera, los equipos de ultrasonido se basan en la propagación de ondas de esfuerzo u ondas de estrés que viajan a través de una porción del fuste de un árbol o a lo largo de una troza (Soto et al., 2012). Estas ondas son producidas por impactos mecánicos o transductores piezoeléctricos, las cuales tienen frecuencias generalmente de 20 kHz y superiores (Ross, 2015).

La velocidad de onda en un material sólido depende tanto de sus propiedades elásticas como de su densidad. Además, cuantos más defectos tenga una pieza, más tiempo tardarán las ondas en atravesar la madera y llegar al otro lado, por tanto, la velocidad será menor en comparación con otra pieza con menos defectos o singularidades (Rosa de Oliveira & Sales, 2006; Hermoso Prieto (2001).

Dispositivos como Fakopp Microsecond Timer y Sylvatest se basan en la medición del tiempo de propagación o tránsito de la onda de ultrasonido (tiempo de vuelo)

entre dos transductores (emisor y receptor), cuya aplicación principal es la evaluación de la calidad de la madera en pie y aserrada a través de la determinación del módulo de elasticidad, lo que permite también el conocimiento del estado de salud de los árboles (Fakopp Enterprise Bt, 2022).

2.2 Marco de referencia

2.2.1 Estudios internacionales sobre la evaluación no destructiva

En una plantación de *Pinus radiata* D.Don de 28 años, en la Región de Biobío, Chile, se estudió el efecto de la densidad de plantación inicial sobre la densidad básica y el módulo de elasticidad dinámico en árboles en pie y trozas. El módulo de elasticidad fue determinado mediante la medición del tiempo de vuelo de la onda acústica para cuatro tratamientos de densidad inicial (2500, 1667, 833 y 625 árboles/ha). Los resultados mostraron que la densidad de la madera aumentó con la disminución de la densidad de plantación inicial, encontrando diferencias significativas entre los tratamientos más densos 2500 y 1667 árboles/ha (0.82 y 0.83 kg/m³) con respecto al menos denso 625 árboles/ha (0.91 kg/m³). Por otra parte, las mediciones del módulo de elasticidad dinámico revelaron que el tratamiento menos denso (625 árboles/ha) mostró el valor más alto de MOEd (15.1 GPa), contrario a los tratamientos de mayor densidad cuyos valores oscilaron entre 11.7 y 10.7 GPa (Soto et al., 2012),

También se evaluaron algunas propiedades físico-mecánicas de maderas nativas chilenas por medio de ultrasonido y las compararon con ensayos mecánicos tradicionales de flexión. Las especies estudiadas fueron algunas latifoliadas y dos coníferas *Fitzroya cupressoides* (Molina) I.M. Johnst. y *Podocarpus nubigenus* Lindl., se midió la velocidad de propagación de ultrasonido usando una frecuencia de 52 kHz en la dirección longitudinal del árbol. Se encontró que los valores de los módulos de elasticidad obtenidos por medio de ultrasonido fueron para el caso de las coníferas, entre un 25 a un 28% más altos que los obtenidos por ensayos estáticos, la especie *Podocarpus nubigenus* mostró valores de 13043 MPa de MOE con ultrasonido y 10460 MPa de MOE estático, mientras que, para

Podocarpus nubigenus obtuvieron 7910 MPa y 6169 MPa de MOE con ultrasonido y estático respectivamente. Además, observaron diferencias significativas en la velocidad de propagación de ultrasonido entre las dos coníferas, *Fitzroya cupressoides* mostró los valores más bajos (4410 m/s), en cambio *Podocarpus nubigenus* presentó una velocidad media de 4780 m/s (Baradit et al., 2013).

En este mismo sentido, se compararon diferentes métodos de estimación de la densidad de la madera mediante el uso del pilodyn con tarugos como método no destructivo y el método destructivo por colecta de secciones del fuste en clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell., en la región de Orinoquía, Colombia. Para la determinación de la densidad, estimaron el peso en verde mediante el punto máximo de saturación en agua, el volumen verde por el método de desplazamiento de agua y peso seco en estufa. Los resultados mostraron que la densidad por rodaja fue en promedio de 579.5 kg/m³, un poco más alto que el obtenido por tarugos (530.2 kg/m³), las diferencias de densidad para el tarugo fueron un 10% menor a la obtenida a través de rodajas. La relación entre la penetración del pilodyn y la densidad medida tanto en rodaja como en tarugo fue inversa, concluyendo a mayor penetración menor densidad (Giraldo Charria et al., 2014),

En *Pinus patula* Schiede & Deppe ex Schltdl., y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke de Perú se caracterizaron las propiedades físico-mecánicas mediante un generador de ultrasonido, osciloscopio y transductores de 1 MHz de frecuencia. Para este estudio se midió la velocidad de la onda longitudinal y transversal en muestras de madera cuyos resultados mostraron que, para *Pinus patula* la velocidad longitudinal fue mayor (4578 m/s) que la velocidad radial (2022 m/s) y la velocidad transversal (1257 m/s). *Cedrelinga cateniformis* mostró la misma tendencia, la velocidad longitudinal fue mayor (4495 m/s), respecto a la velocidad radial de 1860 m/s y la velocidad transversal de 1231 m/s, concluyendo que existe una relación típica de velocidad longitudinal > velocidad radial > velocidad transversal (Yoza et al. (2015).

En Suecia, Fundova et al. (2018) probaron dos métodos para la evaluación no destructiva de la densidad de la madera de árboles en pie de *Pinus sylvestris* L.

Se midió la profundidad de penetración de un pasador de acero pilodyn comparado con la resistencia a la microperforación con resistógrafo. La densidad de la madera de esta especie osciló entre 365 y 566 kg/m³ con una media de 448 kg/m³. Asimismo, la densidad de la madera temprana fue de 332.9 kg/m³, la madera de transición tuvo un valor medio de 507.2 kg/m³ y la madera tardía una media de 751.4 kg/m³. La eliminación de la corteza conduce a estimaciones más precisas, por lo que las mediciones con corteza pueden resultar en una subestimación de la densidad de la madera.

En tanto, en *Eucalyptus nitens* Maiden de una plantación de 18 años en la Región de Biobío, Chile, se estudió la relación entre la velocidad de la onda acústica con algunas propiedades de la madera en árboles en pie y trozas. La velocidad de la onda acústica fue medida mediante el instrumento portátil Fakopp Microsecond Timer, los resultados mostraron que, para árboles en pie la velocidad en la exposición sur del fuste (4146 m/s) fue mayor a la obtenida en la exposición norte (3789 m/s). Por su parte, para las trozas se encontró que la velocidad a la altura fija de 2 m, se tuvo una velocidad promedio de 3271 m/s, significativamente menor a la de las trozas muestreadas al 33% de la altura comercial (3635 m/s), mientras que al 66 % y al 100% de la altura comercial los valores fueron de 3760 m/s y 3591 m/s respectivamente. Con respecto a la relación entre las variables, no se encontraron correlaciones significativas entre la velocidad de la onda acústica con el contenido de humedad verde, densidad verde y densidad básica de la madera (Omonte & Valenzuela-Hurtado, 2020).

En cambio, en bloques de madera de *Cedrela Odorata* L. del Perú se estudió el comportamiento de propagación de las ondas de ultrasonido en las direcciones longitudinal y radial mediante la utilización de Fakopp Microsecond Timer de 23 kHz, los resultados mostraron que la dispersión de ondas en el plano radial longitudinal (RL) fueron mayores que en el plano tangencial longitudinal (TL), debido a que en el plano TL la propagación de ondas en las capas de madera es más uniforme (Yoza Yoza et al., 2021).

2.2.2 Evaluación no destructiva en México

En México, la aplicación de la evaluación no destructiva aplicado al análisis de las características tecnológicas de la madera es un campo poco estudiado, las investigaciones se basan en mediciones sobre piezas de madera aserrada dejando de lado su aplicación al estudio de la madera en pie.

En *Pinus douglasiana* Martínez se correlacionó los módulos de elasticidad con ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática. Mediante una comparación de medias al 95% de confiabilidad no se hallaron diferencias significativas entre el módulo de elasticidad con ondas de esfuerzo (15.37 GPa) y módulo de elasticidad con flexión estática (15.56 GPa), de igual forma, no se encontraron diferencias significativas entre las medias de los módulos de elasticidad de vibraciones transversales (15.75 GPa) y flexión estática (15.56 GPa). Además, el módulo de elasticidad por ultrasonido fue significativamente mayor (24.17 GPa) (Sotomayor Castellanos, 2014).

Para la misma especie se investigó también la variación de la densidad, velocidad de ultrasonido y módulo de elasticidad respecto al contenido de humedad. Se encontró que la densidad de la madera al 0% de humedad fue de 495 kg/m³, al 12% de 521 kg/m³ y al 32% de 567 kg/m³. La variación de la velocidad de ultrasonido en función de los contenidos de humedad de la madera mencionados fue de 6,983 m/s, 6,487 m/s y 5,706 m/s y el módulo de elasticidad por ultrasonido fue 24.17 GPa, 21.96 GPa y 18.51 GPa respectivamente (Sotomayor Castellanos, 2015).

En vigas de madera de *Pinus* spp se midió la velocidad de ondas de esfuerzo y de ultrasonido a diferentes contenidos de humedad y su utilización en la determinación de los módulos de elasticidad. A un contenido de humedad del 20% en la dirección longitudinal la velocidad de ultrasonido fue de 4,326 m/s con un módulo de elasticidad de 12,089 MPa, mientras que, la velocidad por ondas de esfuerzo fue de 4,516 m/s con un módulo de elasticidad de 13,181 MPa. A un 12% de contenido de humedad, la velocidad por ultrasonido en dirección longitudinal

fue de 4,544 m/s con un módulo de elasticidad de 12,905 MPa, mientras que por ondas de esfuerzo fue de 4,744 m/s y 14,071 MPa respectivamente. El módulo de elasticidad en dirección longitudinal fue 11.16 veces mayor con respecto a la dirección transversal. También se encontró un alto coeficiente de determinación ($R^2=0.91$) entre el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo en función del módulo de elasticidad por ultrasonido, ambos en la dirección longitudinal, concluyendo que la técnica de ultrasonido es un buen predictor del módulo de elasticidad (Sotomayor & Ramírez, 2015).

También, se estudiaron 25 especies de maderas mexicanas mediante pruebas de vibraciones transversales, donde se determinó que la densidad de la madera es un buen predictor del módulo de elasticidad dinámico, además, el factor de calidad mostró que a mayor densidad el factor de calidad se incrementa. En cambio, el índice material no presentó correlación con la densidad de la madera (Sotomayor, 2019).

Por otro lado, en madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus* Lindl., se comparó la densidad, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de ultrasonido. Se encontró que la densidad de la madera sólida mostró un valor medio de 479 kg/m³ mientras que, para madera laminada la media fue de 514 kg/m³. La velocidad de ultrasonido en madera sólida en la dirección radial, tangencial y longitudinal fue de 2300, 1652 y 4270 m/s respectivamente, en cambio los módulos de elasticidad en las mismas direcciones fueron 2569, 1331 y 8947 MN/m². La correlación de la velocidad en función de la densidad para la madera sólida mostró una amplia dispersión con una tendencia positiva y un coeficiente de determinación débil de 0.45, el coeficiente de determinación de 0.60 se obtuvo para la correlación entre el módulo dinámico longitudinal con la densidad (Macedo & Sotomayor, 2021).

En otro sentido, se evaluó el tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas mediante ultrasonido a través de la velocidad de onda y módulo dinámico. Se encontró que el promedio de la velocidad de onda antes del densificado fue de 4334 m/s, después del tratamiento de densificado fue de 4690

m/s, con un incremento del 8%. Además, los módulos dinámicos aumentan en función de la densidad de la madera cuyo incremento fue de 58.6 % (Sotomayor et al., 2021).

Así también, en 149 especies mexicanas de importancia industrial se estimó y comparó el módulo de elasticidad obtenido a través de métodos no destructivos de ultrasonido y un modelo de regresión. Se encontró una subestimación del módulo de elasticidad por ultrasonido en la mayoría de las especies con un valor medio de $100546.295 \text{ kg cm}^{-2}$, en contraste, con el modelo de regresión se obtuvo una media de $132304.007 \text{ kg cm}^{-2}$ (Torres Ceballos, 2020).

Bajo el mismo esquema, en vigas estructurales de *Vitex gaumeri* Greenm y *Matayba oppositifolia* (A.Rich) Britton se estimó y comparó el módulo de elasticidad con métodos estático, vibraciones longitudinales y ultrasonido. El análisis comparativo no mostró diferencias estadísticas significativas entre los métodos de vibraciones y ultrasonidos, pero si con el método estático, así mismo, los valores medios del módulo de elasticidad obtenidos con los métodos estático, vibraciones y ultrasonido para *Matayba oppositifolia* fueron 13058, 17322 y 18171 MPa respectivamente y para *Vitex gaumeri* 9582, 12575 y 12898 MPa (Uc Sosa, 2022).

2.2.3 Literatura citada

- Acuna, M. A., & Murphy, G. E. (2007). Uso de espectroscopia infrarroja y análisis multivariado para predecir la densidad de la madera de pino oregón. *Bosque*, 28(3), 187–197. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002007000300002>
- Aguilera, C., Ramos, M., & Salinas, D. (2002). Visualización interna de nudos en rollizos de madera de *Pinus radiata* D. DON utilizando rayos-x. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 4(2), 193–200. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2002000200010>
- Amishev, D., & Murphy, G. E. (2008). In-forest assessment of veneer grade Douglas-fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness. *Forest Products Journal*, 58(11), 42–47.
- Baradit, E., Niemz, P., & Fernández-Pérez, A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(2), 235–244. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2013005000019>
- Blankenhorn, P. R. (2001). Wood: sawn materials. In K. H. Jürgen Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, & S. Mahajan (Eds.), *Encyclopedia of materials: science and technology* (2nd ed., pp. 9722–9732). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01765-4>
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood* (T. E. Timell & R. Wimmer (eds.); 2nd ed.). Springer Series in Wood Science.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). *Principales indicadores forestales (Ciclo 2015-2020)*. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), & Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). (2011). *Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera*. <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Consideraciones-tecnologicas-de-la-madera.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, (CONABIO), & Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2021). *La biodiversidad en la Ciudad de México* (p. 14). CONABIO/SEDEMA. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/region/eeb/files/CDMX_resumen.pdf
- De Jesus, D. S., da Silva Oliveira, J. T., & do Nascimento, A. M. (2023). Relationship Between Wood Density and Anatomy With Drilling Resistance By Non-Destructive Evaluation Method. *Floresta*, 53(3), 371–376. <https://doi.org/10.5380/rf.v53i3.84759>
- Departamento de Botánica del Instituto de Biología (IBUNAM). (2019). *Pinus montezumae* Lamb., ejemplar de: Herbario Nacional de México (MEXU).

- Diario Oficial de la Federación. (1947). *Decreto de veda total indefinida de recuperación y de servicio para todos los bosques del Estado de México y del Distrito Federal*. DOF.
https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=209968&pagina=2&seccion=0
- Downes, G. M., Harrington, J. J., Drew, D. M., Lausberg, M., Muyambo, P., Watt, D., & Lee, D. J. (2022). A Comparison of Radial Wood Property Variation on *Pinus radiata* between an IML PD-400 'Resi' Instrument and Increment Cores Analysed by SilviScan. *Forests*, 13(5), 7–11.
<https://doi.org/10.3390/f13050751>
- Estrada Castellón, A. E., Villarreal Quintanilla, J. Á., Salinas Rodríguez, M. M., Cantú Ayala, C. M., González Rodríguez, H., & Jiménez Pérez, J. (2014). *Coníferas de Nuevo León, México* (1st ed.). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Fabisiak, E., & Fabisiak, B. (2021). Relationship of Tracheid Length Annual Ring Width and Wood Density in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Trees from Different Social Classes of Tree Position in the Stand. *BioResources*, 16(4), 7492–7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>
- Fakopp Enterprise Bt. (2022). *Fakopp Microsecond Timer. User's Guide* (p. 15). www.fakopp.com
- Fraguas, C. R. (2022). Avances de la Tomografía Computarizada aplicada al estudio de escultura de madera policromada. *MoleQla: Revista de Ciencias de La Universidad Pablo de Olavide*, 44, 4–6.
- Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2018). Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PLoS ONE*, 13(9), 1–16.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- Gao, S., Wang, X., Wiemann, M. C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., & Wang, L. (2017). A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 74(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- Giraldo Charria, D. L., Nieto Rodríguez, V. M., Sarmiento, M., & Borralho, N. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Ecalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181–192.
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a04>
- Hermoso Prieto, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. [Universidad Politécnica de Madrid]. In *Archivo digital UPM*. <http://oa.upm.es/644/>

- Herrera-Hernández, R., & Escobar-Alonso, S. (2021). *Pinus montezumae* Lambert. (Pinaceae). In Rodríguez-Trejo, D.A (Coord). *Semillas de especies forestales* (1st ed., pp. 261–265). División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.camafu.org.mx/semillas-de-especies-forestales/>
- İçel, B., & Güler, G. (2016). Nondestructive determination of spruce lumber wood density using drilling resistance (Resistograph) method. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40(6), 900–907. <https://doi.org/10.3906/tar-1606-76>
- Karlinasari, L., Danu, M. I., Nandika, D., & Turjaman, M. (2017). Drilling resistance method to evaluate density and hardness properties of resinous wood of agarwood (*Aquilaria malaccensis*). *Wood Research*, 62(5), 683–690.
- Karsulovic, J. T., Bozo, A., Araya, J., Vargas, Y., Gaete, V., & Tejer, B. (2008). Aplicación de ondas sónicas y ultrasónicas como medio de control del ataque de termitas subterráneas *Reticulitermes flavipes* (Kollar) en madera de pino radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 10(2), 99–111. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2008000200003>
- Launay, J., Ivkovich, M., Pâques, L., Bastien, C., Higelin, P., & Rozenberg, P. (2002). Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using Rigidimeter. *Annals of Forest Science*, 59(5–6), 465–469. <https://doi.org/10.1051/forest:2002030>
- Leautaud Valenzuela, P., & López García, J. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1–12. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.50249>
- Lira González, D. E. (2020). Guía básica de pinos mexicanos. In *Bozkia*.
- López, G., Vallelado-Cordobés, P., Gómez-Royuela, J. L., & Basterra, L. A. (2023). Diagnosis and assessment of a historic timber structure in La Casa del Corregidor, using non-destructive techniques. *Case Studies in Construction Materials*, 19(e02311), 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02311>
- Macedo Alquicira, I., & SotomayorCastellanos, J. R. (2021). Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*. *Madera y Bosques*, 27(3), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Muzzioli, L. (1953). *Principales Características y Propiedades Fundamentales de los Ultrasonidos*. Federación de Estudiantes de Concepción.
- Omote, M., & Valenzuela-Hurtado, L. (2020). Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22(4), 559–568. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000414>

- Pâques, L. E., & Rozenberg, P. (2009). Ranking larch genotypes with the Rigidimeter: Relationships between modulus of elasticity of standing trees and of sawn timber. *Annals of Forest Science*, 66(4), 414–414. <https://doi.org/10.1051/forest/2009011>
- Perry, J. P. (1991). *The Pines of Mexico and Central America* (1st edit). Timber Press.
- Prada Pérez de Azpeitia, F., & Martínez Pons, J. A. (1998). *Diccionario Oxford Complutense de Física* (1st ed.). Editorial Complutense, S.A.
- Rodriguez Franco, C. (1997). La Silvicultura de *Pinus montezumae* en la region central de Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 22(81), 91–115. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/978>
- Rosa de Oliveira, F. G., & Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18), 2443–2446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (2nd ed.). General Technical Report FPL-GTR-238. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-238>
- Schimleck, L., Dahlen, J., Apiolaza, L. A., Downes, G., Emms, G., Evans, R., Moore, J., Pâques, L., Van den Bulcke, J., & Wang, X. (2019). Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- Schimleck, L., Raymond, C. A., Beadle, C. L., Downes, G. M., Kube, P. D., & French, J. (2000). Applications of NIR spectroscopy to forest research. *Appita Journal*, 53(6), 458–464.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2016). *Suelo de Conservación* (1st ed.). SEDEMA. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf
- Shelly, J. R. (2001). Wood: Materials for Furniture. In K. H. Jürgen Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, & S. Mahajan (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (2nd ed., pp. 9658–9662). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01750-2>
- Soto, L., Valenzuela, L., & Lasserre, J. P. (2012). Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de pino radiata de 28 años, en la zona de renales, Chile. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 14(2), 209–224. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200008>
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2014). *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos* (J. R. Sotomayor Castellanos (ed.); 1st ed.).

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Sotomayor-Castellanos, J. R., Adachi, K., Lida, R., & Hayashi, T. (2021). Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas. *Ingeniería Mecánica*, 24(1), 55–62.
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2014). Modulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y modulo de ruptura de la madera de *Pinus douglasiana*. Vibraciones transversales, flexión estática, ultrasonido y ondas de esfuerzo. In *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos* (1st ed., pp. 38–51). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015). Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de *Pinus douglasiana*, en relación a su contenido de humedad. *RECYT*, 17(23), 25–30. <http://www.scielo.org.ar/pdf/recyt/n23/n23a04.pdf>
- Sotomayor Castellanos, J. R., & Villaseñor Aguilar, J. M. (2016). Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 20–28. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v13i33.2574>
- Sotomayor, J. (2019). Módulo de elasticidad dinámico, factor de calidad e índice material de 25 maderas. Determinación por vibraciones transversales. *Revista Chilena de Ingeniería*, 27(2), 280–287.
- Sotomayor, J., & Ramírez, M. (2015). Velocidad de onda y módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo de vigas de madera de *Pinus* spp. mexicana. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(1), 69–79. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732015000100006>
- Torres Ceballos, D. L. (2020). Estimación y clasificación de las propiedades mecánicas de 149 especies mexicanas de importancia industrial con métodos no destructivos [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/5c735d02-6543-4230-b4ac-81cfc14d9ddb>
- Uc Sosa, C. I. (2022). Módulo de elasticidad con métodos no destructivos en vigas estructurales de *Vitex gaumeri* Greenm y *Matayba oppositifolia* (A. Rich) Britton [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/096af2e3-4b0c-4b59-b340-3f419fff5c2e>
- Vahey, D. W., Zhu, J. Y., & Scott, C. T. (2006). *Comparison of SilviScan and optical imaging measurements of tracheid dimensions and wood density*. Proceedings of 2006 Progress in Paper Physics, 2006 October 1-5, Oxford, OH. Oxford, OH : Miami University, 2006: pages 73-76.
- Vignote Peña, S., & Martínez Rojas, I. (2006). *Tecnología de la madera* (3rd ed.). Ediciones Mundi-Prensa.

<https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>

- Walker, J. C. F. (2006). Wood Quality: in context. Density. In *Primary Wood Processing. Principles and Practice* (2nd ed., pp. 128–141). Springer.
- Yoza, L., Baradit, E., & Acevedo, M. (2015). Caracterización de las propiedades físico mecánicas de especies, pino (*Pinus patula*) y tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) provenientes del Perú utilizando técnicas no destructivas. *Anales Científicos*, 76(1), 12–16. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i1.758>
- Yoza Yoza, L., Baradit Allende, E., Tang Cruz, O., Monteiro de Matos, J. L., Pereira da Rocha, M., & Venson, I. (2021). Characterization of transverse cylindrical cavities in wooden blocks of the species *Cedrela odorata* using non-destructive ultrasound tests. *Floresta*, 51(4), 848–854. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.73446>
- Zobel. (2004). Tree breeding, practices | Biological Improvement of Wood Properties. In J. Burley (Ed.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (pp. 1458–1466). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00038-7>
- Zobel, B. J., & Jett, J. B. (1995). The Importance of Wood Density (Specific Gravity) and Its Component Parts. In T. E. Timell (Ed.), *Genetics of Wood Production* (1st ed., pp. 78–97). Springer Series in Wood Science. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5>

CAPÍTULO 3. EVALUATION OF WOOD QUALITY OF *PINUS MONTEZUMAE* LAMB. IN A DISTURBED FOREST USING NON-DESTRUCTIVE ACOUSTIC METHODS*

XUXAN ALYN ROSAS

-RAMOS, MA. AMPARO MÁXIMA BORJA-DE LA ROSA, ROBERTO MACHUCA-VELASCO, ALEJANDRO CORONA-AMBRIZ, LILIANA CUAPIO-HERNÁNDEZ
CHAPINGO AUTONOMOUS UNIVERSITY
MEXICO

LUIS ACUÑA-RELLO

UNIVERSITY OF VALLADOLID
SPAIN

(RECEIVED APRIL 2024)

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the modulus of elasticity and wood quality for structural use in standing trees of *Pinus montezumae* Lamb. in a natural forest affected by fires. An acoustic method was used, measuring the ultrasonic flight time for one cross-sectional and two longitudinal sections in 70 trees. Significant differences were found between the two longitudinal moduli of elasticity, and the *P. montezumae* trees in the study area show potential for structural use according to the modulus of elasticity. It is concluded that for sustainable management, wood of medium quality would be obtained in the same proportion for the first two sections of the tree stems, while high-quality logs would be obtained in the second longitudinal section (2–4 m).

KEYWORDS: Wood density, Fakopp, modulus of elasticity, time-of-flight, ultrasound, mechanical properties.

INTRODUCTION

The quality of wood is a characteristic generally shaped by a series of attributes that may depend on the intended specific and final use (Chávez-Valencia et al. 2010). Quality is closely related to both external (morphological) and internal properties of the timber, among which density and modulus of elasticity are the most important indicators of the potential of wood for structural purposes (Arriaga et al. 2022). Wood quality is generally

assessed using traditional techniques to analyze its physical and mechanical properties, most of which involve total or partial destruction of the materials under study (Chavesta et al. 2019). Depending on the damage these methods or techniques inflict on the materials, they are categorized as non-destructive testing (NDT); semi-destructive testing (SDT) or destructive testing (DT) (López et al. 2023). The application of NDT in the analysis of wood properties originates from the growing need to address practical problems while preserving the integrity of the specimens (Bucur 2005) and allowing the study of physical and mechanical characteristics of both standing trees and other wood products without compromising their structure or final use capacity (Uzcategui et al. 2023). This approach proves useful and beneficial, particularly for the forestry industry (Yang et al. 2002).

Acoustic or ultrasound testing is one of the most used NDT for assessing standing timber, primarily for determining the modulus of elasticity (MOE) (Schimleck et al. 2019). Also known as wood stiffness, MOE is one of the most important mechanical properties and is the primary indicator used to assess a wood's ability to resist bending and support loads (Amishev and Murphy 2008, Peña and Rojas 2006). In wood, two types of moduli of elasticity (MOE) can be determined, static (MOE_e) and dynamic (MOE_d). The latter is estimated through the transit velocity of ultrasound waves (ultrasonic time-of-flight) along with wood density (Soto et al. 2012) and represents the amount of elastic energy a volume of wood can store (Sotomayor-Castellanos and Villaseñor-Aguilar, 2016).

Some studies based on the transmission of acoustic waves to determine Young's modulus and the modulus of rupture have been conducted on certain Chilean native woods, including broadleaf species such as *Laureliopsis philippiana* (Looser) Schodde, *Aextoxicon punctatum* Ruiz & Pav., *Laurelia sempervirens* (Ruiz & Pav.) Tul., *Nothofagus pumilio* Krasser, and conifer species such as *Fitzroya cupressoides* (Molina) I. M. Johnst. and *Podocarpus nubigenus* Lindl. (Baradit et al. 2013). Additionally, evaluations of the shear modulus in *Pinus patula* Schltdl. & Cham. and *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke from Peru have been conducted using ultrasound methods (Yoza et al. 2015). The dynamic modulus of elasticity has also been determined in logs of *Eucalyptus nitens* Maiden in Chile (Omote and Valenzuela-Hurtado 2020) and for *Cedrelinga cateniformis* plantations in Peru (Ramos-León and Cuellar-Bautista 2018).

In Mexico, research focusing on the mechanical characterization of wood using non-destructive ultrasound methods has been prominent, particularly in certain conifer species such as *Pinus* L. (Sotomayor and Ramírez 2015), *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Macedo-Alquicira and Sotomayor-Castellanos 2021), *Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus pringlei* Shaw, and *Pinus michoacana* Martínez (Sotomayor-Castellanos and Ramírez-Pérez 2014), as well as in broadleaf species such as *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King in Hook., *Tabebuia donnellsmithii* Rose, *Fraxinus uhdei* Lingelsh., *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* (Martinez) A.E. Murray, and *Guazuma ulmifolia* Lam. (Sotomayor-Castellanos et al. 2021). Specifically for Mexico City, there have been few studies focused on analyzing forestry-related topics. Some authors, such as Rodríguez-Gamiño and López-Blanco (2006) and De León-González et al. (2015) have provided initial insights through their

research by addressing aspects of the biophysical environment of these forests. However, they have not delved into evaluating any physical, mechanical, or technological characteristics of wood as a subject of study. Additionally, the current regime of public policies regarding forestry in Mexico City, established through an indefinite forest ban since 1947 (Secretaría de Agricultura y Ganadería 1947), has limited timber evaluation through the application of conventional destructive methods.

This is due to its use in sawmilling, plywood, carpentry, and construction, as well as its value for resin tapping (Chávez-Valencia et al. 2010). Additionally, it contributes to understanding whether disturbance factors such as forest fires have effects on the physical and mechanical properties of wood (Rios-Camey et al. 2020). The objective of the study was to evaluate the dynamic modulus of elasticity and wood quality for structural use using an acoustic NDT on *Pinus montezumae* trees from a temperate forest affected by forest fires located in Milpa Alta, Mexico City.

MATERIAL AND METHODS

Study area

The study area is located in the Temetlatitla area of the Santa Ana Tlacotenco Communal Lands, Milpa Alta, Mexico City, Mexico. Geographically, it is situated between the coordinates 19°06' 51.57" N and 98°59' 06.59" W (Fig. 1-a), covering a total area of 35.27 ha. The terrain is mountainous, with elevations ranging from 3271 to 3348 m. The climate is temperate sub-humid with summer rains, an average annual temperature of 14.4°C, and an annual precipitation of 878.9 mm. The predominant vegetation consists of *Pinus* forests and mixed *Pinus-Alnus* forests (Rodríguez-Gamiño and López-Blanco 2006).

This region is characterized by a high incidence of forest fires during the dry season (January–May). Just during the period 2011–2020, an average of 3184 forest fires per year were recorded in Mexico City and neighboring states (State of Mexico, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo, and Querétaro) (Rodríguez-Trejo et al. 2022). According to Rodríguez-Gamiño and López-Blanco (2006) these fires are typically initiated by residents of nearby communities with the aim of promoting the renewal of pastures for sheep grazing.

Determination of sample size

The study area was divided into 141 sites (sampling units) with an area of 0.25 ha each. Once the units and the sampling framework were defined, simple random sampling was conducted, with the sample size (n) determined based on the ultrasonic time-of-flight. The sample size was obtained using the following Lohr (2021):

$$n = \frac{NS^2}{(N-1)\frac{B^2}{4} + S^2} \quad (1)$$

where n : sample size, N : population size, S^2 : sampling variance and B : error precision.

The population (N) was estimated based on the tree density of the study area (52 trees/ha), resulting in a population size estimate of 1820 trees. Subsequently, based on information from a preliminary sample of 20 trees, the sampling variance of the ultrasonic time-of-flight was estimated (6937.12). Additionally, an error precision of $B = 20$ ms (microseconds) was set. This resulted in a sample size (n) of 66.86 trees; however, 70 trees were sampled, which were distributed among 14 randomly selected sites in the study area.

Ultrasonic time-of-flight measurement

The ultrasonic time-of-flight was measured using the Fakopp Microsecond Timer® portable instrument for five randomly selected trees at each sampling site, with an average age of 74 years. Data collection took place from March to June 2023. Time-of-flight measurements were taken along both the transverse and longitudinal axes of the trees (Fig. 1-b). For the transverse axis measurement, sensors were placed opposite each other at a height of 1.3 m, with three repetitions taken using the Fakopp device. Time-of-flight along the longitudinal axis was measured in two height sections: the first from 20 cm above the tree base to 2 m, and the second from 2 m to 4 m high. On this axis, the sensors were placed alternately, repeating the measurement with the device three times. Additionally, the following dendrometric variables were measured: diameter at breast height, total height, and height of the first branch.

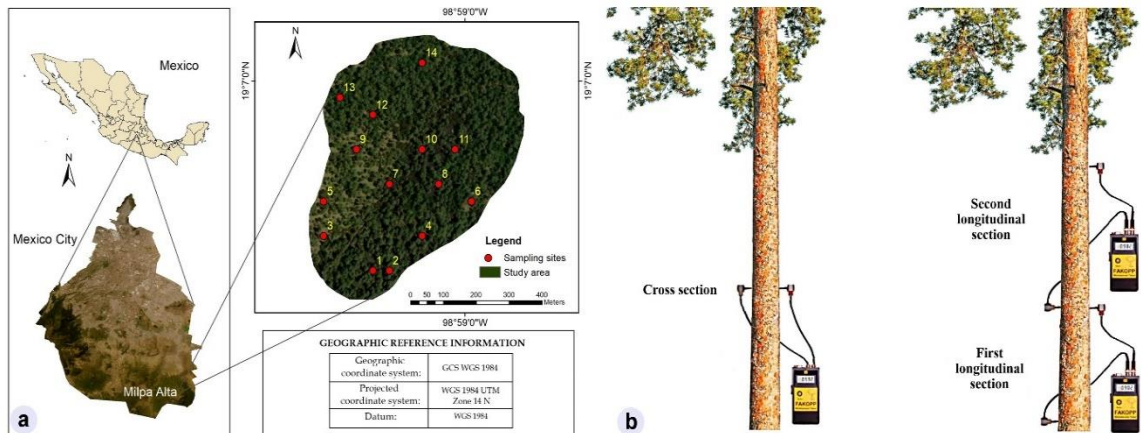


Fig. 1: a) Location of the study area in Milpa Alta, Mexico City, b) measurement of ultrasonic time-of-flight in the cross-sectional and longitudinal sections of the trees.

Sampling for wood density measurement

To obtain the wood density, increment cores were extracted using a 12-inch Pressler borer (Haglöf®) with an internal diameter of 12 mm from three out of the five previously selected trees at each of the sampling sites (14), resulting in a total of 42 samples.

The increment cores were sectioned every five growth rings and dried to constant weight in an oven (Mettler® model UN110) at a temperature of $103 \pm 1^\circ\text{C}$. The segmented increment cores were weighed using an analytical balance with a precision of 0.01 g. The

anhydrous volume was calculated using the water displacement method (Archimedes' Principle) (Valencia-Manzo and Vargas-Hernández 1997). Finally, the anhydrous density (ρ_0) was obtained as the ratio of the anhydrous weight to the anhydrous volume. With the anhydrous density, the wood density at 12% moisture content (MC) was determined using the following Kollmann (1959):

$$\rho_{12} = \rho_0 \frac{1+0.12}{1+(0.84*\rho_0*0.12)} \quad (2)$$

where: ρ_{12} - wood density at 12% moisture content (kg m^{-3}) and ρ_0 - anhydrous density (kg m^{-3}).

Dynamic modulus of elasticity of green wood

Dynamic modulus of elasticity for the cross-sectional and longitudinal sections of the trees was calculated using the following Ettelaie et al. (2019):

$$E_{us} = \rho_{12} V_{us}^2 \quad (3)$$

where: E_{us} - dynamic modulus of elasticity (N m^{-2}), ρ_{12} - wood density at 12% MC (kg m^{-3}) and V_{us} - ultrasonic velocity (m s^{-1}).

The ultrasonic velocity (V_{us}) was calculated based on the distance between the sensors of the Fakopp device (m) and the ultrasonic time-of-flight (s).

Dynamic modulus of elasticity transformation at 12% MC

The density at 12% MC was estimated for the longitudinal section from 2–4 m using data from a study on *Pinus sylvestris* L., regarding the variation of wood density with tree height (Gutiérrez-Oliva et al. 1997). Based on that research, a decrease of 4.3% in longitudinal density for the section from 2–4 m compared to the density from 0–2 m was determined. This was because density determination was only performed for the longitudinal section from 0–2 m using the increment cores collected at 1.30 m.

The modulus of elasticity at 12% MC was determined by transforming ultrasound velocities of green wood using the graph of ultrasound velocity versus moisture content for *Pinus douglasiana* Martínez wood (Sotomayor-Castellanos 2015), the linear regression model predicting ultrasonic wave velocity with Fakopp using measurements taken with Sylvatest, and the average velocity recorded by this device for the longitudinal section of three pine species (*P. sylvestris* L., *P. pinaster* Aiton, and *P. radiata* D. Don) (Acuña et al. 2007). With this data, a theoretical graphical model was generated for the ultrasound velocity of *P. montezumae*, following the same trend as Sotomayor-Castellanos (2015) from 0% wood moisture to the maximum moisture obtained from the Kollmann formula

(1959). This resulted in an increase of 1718 m s^{-1} in ultrasound velocity from green wood to 12% wood MC.

Statistical analysis

The statistical analysis was conducted using the R software (R Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing). Descriptive statistics were obtained for the variables height, diameter at breast height, density at 12% MC, ultrasound velocity, and modulus of elasticity of green wood and at 12% MC.

The Kolmogorov-Smirnov test was applied to the data of the longitudinal modulus of elasticity at 12% moisture content to check for normality. It showed evidence of a non-normal distribution for both the first longitudinal section ($p\text{-value}=0.03<0.05$) and the second longitudinal section ($p\text{-value} = 3.899\text{e}^{-06}<0.05$). Additionally, to check for homoscedasticity, Levene's test was applied, which provided evidence of the absence of heteroscedasticity ($p\text{-value} = 0.276 > 0.05$). To compare the modulus of elasticity among the sampling sites in the two longitudinal sections, the non-parametric Kruskal-Wallis test with Bonferroni correction was used due to the non-normal distribution, with a significance level (α) of 0.05.

Wood quality for structural use was classified for the two longitudinal sections. Three categories (Tab. 1) were established based on the modulus of elasticity at 12% MC, according to the specified values for the average modulus of elasticity for softwood species in the Complementary Technical Standards for the Design and Construction of Wood Structures (Gaceta oficial de la Ciudad de México 2017).

Tab. 1: Categories of wood quality for structural use according to Gaceta oficial de la Ciudad de México (2017).

Wood quality category	Dynamic modulus of elasticity (MPa)
Unsuitable for structural use	Less than 6000
Structural B	6000 to 8000
Structural A	Greater than 8000

RESULTS AND DISCUSSION

The *Pinus montezumae* trees in the study area have an average height of 28.5 m and average diameter of 67.9 cm. Tab. 2 presents the descriptive statistics for the variables total height, height of the first branch, and diameter at breast height, as well as the ultrasound tests on green wood (ultrasound velocity and dynamic modulus of elasticity) for the cross-section and the two longitudinal sections. Tab. 3 shows the descriptive statistics for the ultrasound velocity and dynamic modulus of elasticity at 12% MC for the two longitudinal sections.

Tab. 2: Descriptive statistics of green wood.

	H (m)	HR (m)	D (cm)	ρ_{12} (kg m ⁻³)	V _{us} T (m s ⁻¹)	V _{us} L1 (m s ⁻¹)	V _{us} L2 (m s ⁻¹)	E _{us} T (MPa)	E _{us} L1 (MPa)	E _{us} L2 (MPa)
n	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Min.	21.1	6.0	44.1	506.0	1251.0	683.9	965.4	912.7	285.1	518.1
Max.	36.0	24.0	91.6	628.0	1894.0	2010.7	3036.4	2092.9	2523.4	5084.2
μ	28.5	15.1	67.9	571.7	1581.6	1533.8	1847.8	1442.9	1402.3	1960.2
σ	2.9	4.2	10.4	32.6	144.7	320.6	445.7	279.5	519.9	961.4
CV	10.2	28.0	15.4	5.7	9.1	20.9	24.1	19.3	37.0	49.0

Note: H: height, HR: height of the first branch, D: diameter at breast height, ρ_{12} : density at 12% MC, V_{us}T: transverse ultrasound velocity, V_{us}L1: longitudinal ultrasound velocity from 0–2 m, V_{us}L2: longitudinal ultrasound velocity from 2–4 m, E_{us}T: transversal modulus of elasticity, E_{us}L1: longitudinal modulus of elasticity from 0–2 m, E_{us}L2: longitudinal modulus of elasticity from 2–4 m, MPa: megapascals, μ : arithmetic mean, σ : standard deviation, CV: coefficient of variation (%).

Tab. 3: Ultrasound velocity and longitudinal modulus of elasticity at 12% MC.

	V _{us} T_12 (m s ⁻¹)	V _{us} L1_12 (m s ⁻¹)	V _{us} L2_12 (m s ⁻¹)	E _{us} T_12 (MPa)	E _{us} L1_12 (MPa)	E _{us} L2_12 (MPa)
n	70	70	70	70	70	70
Min.	2969.1	2402.4	2683.8	4886.3	3517.4	3843.6
Max.	3612.3	4285.8	4754.8	7614.2	11019.1	12467.4
μ	3300.0	3262.1	3566.3	6240.1	6149.1	7039.1
σ	144.7	341.2	445.7	667.6	1317.3	1740.4
CV	4.3	10.5	12.5	10.7	21.4	24.7

Note: V_{us}T_12: transverse ultrasound velocity, V_{us}L1_12: longitudinal ultrasound velocity from 0–2 m, V_{us}L2_12: longitudinal ultrasound velocity from 2–4 m, E_{us}T_12: transversal modulus of elasticity, E_{us}L1_12: longitudinal modulus of elasticity from 0–2 m, E_{us}L2_12: longitudinal modulus of elasticity from 2–4 m, MPa: megapascals, μ : arithmetic mean, σ : standard deviation, CV: coefficient of variation (%).

Ultrasound velocity and dynamic modulus of elasticity

For *P. montezumae*, longitudinal ultrasound velocity was obtained over the tree stems (green wood), measuring 1533.8 m s⁻¹ for the first section (0–2 m) and 1847.8 m s⁻¹ for the second section (2–4 m). These values are similar to those reported by Dickson et al. (2003) for *Eucalyptus dunnii* Maiden trees of two age classes (9 and 25 years), which showed ultrasound velocities of 1837 and 1612 m s⁻¹, respectively. Additionally, an increase in ultrasound velocity from green wood to wood with 12% MC was observed, resulting in average values of 3262.1 and 3566.3 m s⁻¹ for the first longitudinal section (0–2 m) and second longitudinal section (2–4 m), resp. These increases in ultrasound velocity with decreasing wood moisture content align with those reported by Dickson et al. (2003), who found values of 3884 and 3901 m s⁻¹ for *Eucalyptus dunnii* logs in the 9 and 25-year age classes, respectively. Slightly higher values of the modulus of elasticity at 12% MC (4926 m s⁻¹) were reported by Osuna-Sequera et al. (2021) in beams of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco, and by Arriaga et al. (2022) for beams of *P. nigra* subsp. *salzmannii* (4644 m s⁻¹). Regarding this behavior, Ahmed et al. (2020) suggests that the

wave velocity and modulus of elasticity are strongly influenced by the moisture content of the wood. In this regard, Sotomayor-Castellanos (2015) similarly found that ultrasound velocity increases as the moisture content decreases in *Pinus douglasiana*.

It was also found that the longitudinal dynamic modulus of elasticity at 12% MC for *P. montezumae* ranged from 3517 to 11019 MPa for the first section and from 3843 to 12467 MPa for the second section, similar to the range obtained for *Pinus elliottii* Engelm., 2520 to 11300 MPa with a mean of 6350 MPa (Yang et al. 2017). This is analogous to the values obtained for *P. montezumae*, with means of 6149 and 7039 MPa for the first and second longitudinal sections, respectively.

The average value of the longitudinal modulus of elasticity at 12% MC was 6149 MPa for the first section and 7039 MPa for the second section, both of which are relatively lower than those obtained by Lei et al. (2005) for pieces of *Picea mariana* Britton, Sterns & Poggenb. wood which were 9314 MPa, and by Vega-Cueto et al. (2019) for pieces of *P. pinaster* and *P. radiata* wood classified as ME-2 according to the UNE 56544 (2011), which were 9330 MPa and 8990 MPa, respectively. Additionally, these values differ from the mean of 11420 MPa for pieces of *P. nigra* subsp. *salzmannii* wood (Arriaga et al. 2022).

The lower modulus of elasticity in the first longitudinal section of *P. montezumae* trees can be explained by the longitudinal gradient of this property. In this regard, Waghorn et al. (2007) found that for *Pinus radiata*, the modulus of elasticity increased with the height of the tree from a value of 5100 MPa at the base of the stem to a maximum of 6700 MPa at 5 m. The decrease found in the modulus of elasticity of the first section can also be attributed to the effects of fire. Therefore, it would be important to compare the modulus of elasticity for trees in standing sites affected and unaffected by forest fires in this study area. Some authors, such as Sotomayor-Castellanos and Gallegos-León (2019), found a decreasing trend in the modulus of elasticity with increased exposure to fire in laminated wood of *Pinus pseudostrobus* Lindl. Similarly, Sotomayor-Castellanos (2022) observed a trend towards reduction in apparent density and dynamic modulus of wood with exposure to fire in *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Andira inermis* (W. Wright) Kunth ex DC., *Juglans pyriformis* Liebm., species of *Quercus*, and *Cordia elaeagnoides* A. DC. In contrast, other authors such as Bortoletto and Moreschi (2003), found no significant differences in the reduction of MOE at four different combustion levels on *Pinus taeda* L. trees after a forest fire. Similarly, Marttila et al. (2024) found that fire damage had no significant effects on the modulus of elasticity of burned and unburned *Pinus sylvestris* trees.

Comparative analysis of the longitudinal modulus of elasticity between sampling sites

Statistically significant differences were found for the modulus of elasticity at 12% MC in both longitudinal sections ($p\text{-value}=0.001236<0.05$) (Fig. 3) and between sampling sites for the first longitudinal section of 0–2 m ($p\text{-value}=0.001503<0.05$) and the second longitudinal section of 2–4 m ($p\text{-value}=0.01798<0.05$) (Tab. 4). In this regard, Waghorn et al. (2007) state that initial stand density significantly influences the MOE in *P. radiata*, increasing from 5100 MPa for an initial density of 275 trees ha^{-1} to 7000 MPa at initial

densities of 2551 trees ha⁻¹. Additionally, Gil-Moreno et al. (2023) also found that cambial age affects dynamic MOE for *Pinus sylvestris*, with values increasing with age, ranging from 10100 MPa (cambial age ≤30) to 11500 MPa (cambial age >50).

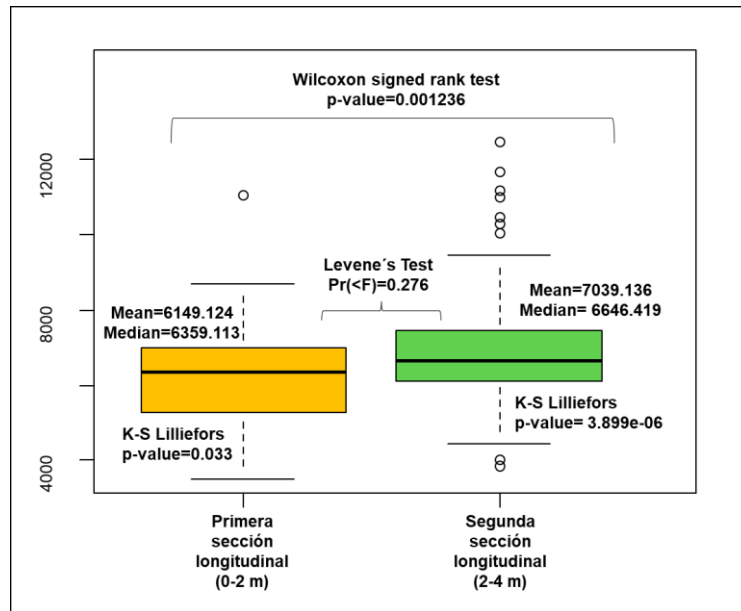


Fig. 2: Tests of normality, equality of variances, and comparative analysis of longitudinal modulus of elasticity.

Tab. 4: Comparison of sites.

Longitudinal modulus of elasticity (0–2 m).			Longitudinal modulus of elasticity (2–4 m).		
Sampling site	Mean	Group	Sampling site	Mean	Group
12	7666.216	a	5	9696.580	a
2	7617.344	a	9	8187.820	a
9	6881.312	a	12	7487.319	a
3	6854.530	a	14	7634.910	a
14	6638.324	a	11	7420.000	a
4	6413.293	a	8	6810.285	a
7	5975.890	a	2	6738.768	a
8	5647.917	a	13	6549.288	a
5	6090.770	a	3	6645.259	a
1	5637.146	a	10	7140.585	a
10	5719.278	ab	1	6414.679	a
13	5478.509	ab	7	6272.329	a
11	4687.694	ab	4	6107.788	b
6	4779.514	ab	6	5442.293	b

Classification of wood for structural use

The modulus of elasticity is a property that largely determines the applicability of wood in structural components (Ahmed et al. 2020). Suirezs and Berger (2009) suggest that wood with higher modulus of elasticity values is most suitable for structural use in construction, and these values vary depending on the moisture content of the wood. According to the

results obtained, as seen in Fig. 4, it was found that for the first longitudinal section (0–2 m), 37% of the trees exhibited wood quality unsuitable for structural use. In contrast, for the second longitudinal section (2–4 m), the amount of wood deemed unsuitable for this purpose decreased to 23%. Additionally, medium quality (Structural B) was observed in equal proportions for both longitudinal sections (57% of the trees). The highest quality (Structural A) was more prevalent (20%) for the second longitudinal section (2–4 m), whereas it was only 6% for the first longitudinal section (0–2 m).

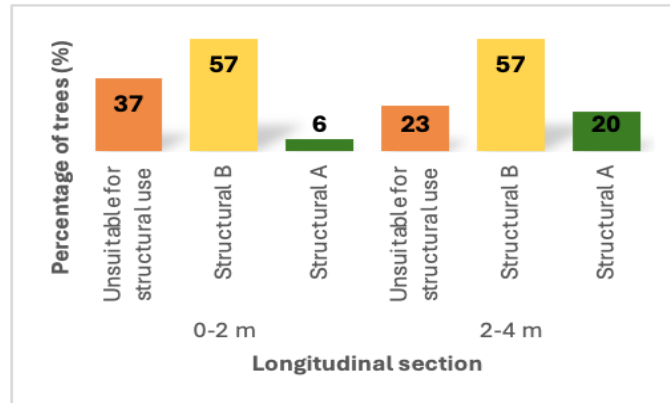


Fig. 3: Categories of wood quality for structural use of *P. montezumae*.

Regarding the classification of wood quality for structural use in both longitudinal sections of the 70 sampled trees (Fig. 5), it was found that 9 trees exhibited unsuitable quality in both longitudinal sections, while approximately one-third of the tree population (24 trees) showed medium quality (structural B) in both sections, and no individual exhibited high quality (structural A) in both sections.

Based on the results of the modulus of elasticity and the classification of wood quality for structural use of *P. montezumae*, the wood analyzed falls within group SD6 for both longitudinal sections based on the AS/NZS 2878 (2000). Classification of wood into strength groups (AS/NZS 2878: 2000), achieving visual grades of F5 and F7 for the first and second longitudinal sections, respectively (AS 2858: 2008). This classification differs from that presented by Dickson et al. (2003) in a similar study for *Eucalyptus dunnii* Maiden, as they found higher values for the MOE, classifying the wood in group SD4 with visual grades F22, F17, F14, and F11, surpassing the thresholds for structural applications. Additionally, specifically for the modulus of elasticity obtained for the second longitudinal section (7039.136 MPa), it may also be equivalent to the strength class C14 according to UNE-EN 338 (2016).

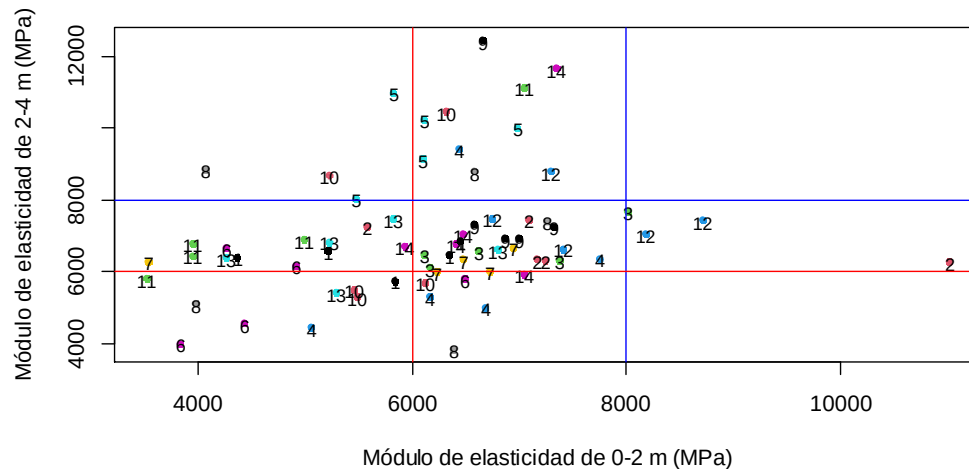


Fig. 4: Wood quality for structural use of *P. montezumae* by sampling site for the two longitudinal sections.

It is important to note that despite obtaining a notable proportion of wood unsuitable for structural use in *P. montezumae*, mainly in the first longitudinal section (0–2 m), the wood of this species can be used for other purposes not related to building structures. Specifically, it can be utilized in the manufacturing of carpentry elements such as moldings, doors, windows, frames, furniture, veneer, plywood, non-structural boards, or for flooring (Chávez-Valencia et al. 2010).

CONCLUSIONS

This research examined the potential of *P. montezumae* in the production of wood for structural use. The results indicate that in the forests of the Community of Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta, this species can mostly produce medium-quality wood for structural use in both longitudinal sections analyzed. Additionally, this quality is mostly acceptable in the second log, as the modulus of elasticity, as well as the quality and quantity of wood for structural use, were superior for the second longitudinal section (2–4 m) compared to the first longitudinal section (0–2 m). However, this does not limit the use of wood unsuitable for structural use for other purposes, such as in the manufacturing of carpentry elements, woodworking, and packaging.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, grant number 23034-C-91. The authors gratefully acknowledge the community of Santa Ana Tlacotenco for the authorization and support provided in data collection.

REFERENCES

1. Acuña, L., Díez, R., Martín, L., Casado, M., Basterra, A., Ramón, G., & Relea, E. (2007, Jul 4-6). *La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural*.
2. Ahmed, S. A., Adamopoulos, S. & Poggi, F. (2020): Resonance and time-of-flight methods for evaluating the modulus of elasticity of particleboards at different humid conditions. In: *Wood Research* 65 (3), 365–380 pp.
3. Amishev, D. & Murphy, G. E. (2008): In-forest assessment of veneer grade Douglas-fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness. In: *Forest Products Journal* 58 (11), 42–47 pp.
4. Arriaga, F., Osuna-Sequera, C., Bobadilla, I. & Esteban, M. (2022): Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. In: *Construction and Building Materials* 322 (January), 126512 pp.
5. AS/NZS 2878 (2000): Timber-classification into strength groups.
6. AS 2858 (2008): Timber. Softwood. Visually stress-graded for structural purposes.
7. Baradit, E., Niemz, P. & Fernández-Pérez, A. (2013): Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. In: Ciencia y Tecnología* 15 (2), 235–244 pp.
8. Bortoletto, J. & Moreschi, J. C. (2003): Physical-mechanical properties and chemical composition of *Pinus taeda* mature wood following a forest fire. In: *Bioresource Technology* 87 (3), 231–238 pp.
9. Bucur, V. (2005): Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. In: *Ultrasonics* 43 (4), 237–239 pp.
10. Chavesta, M., Montenegro, R., Tomazello-Filho, M., Carnerio, M. & Nisgoski, S. (2019): Physical properties of *Guazuma crinita* by conventional methods and near infrared spectroscopy. In: *Maderas: Ciencia y Tecnología* 21 (4), 521–530 pp.
11. Chávez-Valencia, L. E., Hernández-Barriga, C., & Ruiz-Jaime, C. L. (2010): Determinación de la calidad de la madera de construcción. In: *Acta Universitaria* 20 (2), 5-13 pp.
12. De León-González, F., Fuentes-Ponce, M., Bautista-Cruz, M., Leyva-Pablo, T., Castillo-Juárez, H., Rodríguez-Sánchez, L. M. & Miranda-García, G. (2015). Medición de emisiones de CO₂ del suelo en bosque de pino-encino, y en maíz y nopal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. In P. F. Paz, G. J. Wong & A. R. Torres (Eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015* (695–701 pp).
13. Dickson, R. L., Raymond, C. A., Joe, W. & Wilkinson, C. A. (2003): Segregation of *Eucalyptus dunnii* logs using acoustics. In: *Forest Ecology and Management* 179 (1–3), 243–251 pp.

14. Ettelaie, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H.Z. & Ebrahimi, G. (2019): Prediction of modulus of elasticity of poplar wood using ultrasonic technique by applying empirical correction factors. In: Measurement 135, 392–399 pp.
15. Gaceta oficial de la Ciudad de México (Official Gazette of Mexico City). (2017, dec 15). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera.
16. Gil-Moreno, D., Manso, R., O’ceallaigh C. & Harte, A. M. (2023): The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland. In: Forestry: International Journal of Forest Research 97 (1), 133–146 pp.
17. Gutiérrez-Oliva, A., Baonza-Merino, M. & Fernández-Golfín Seco, J. I. (1997, Jun 01). *Variaciones en la densidad de la madera de pino silvestre de los sistemas central e ibérico*
18. Kollmann, F. F. P., 1959: Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera: Madrid, 675 pp.
19. Lei, Y. C., Zhang, S. Y. & Jiang, Z. (2005): Models for predicting lumber bending MOR and MOE based on tree and stand characteristics in black spruce. In: Wood Science and Technology 39, 37–47 pp.
20. Lohr, S. L. (2021). Sampling: Design and Analysis. Chapman and Hall/CRC.
21. López, G., Vallelado-Cordobés, P., Gómez-Royuela, J. L. & Basterra, L.A. (2023): Diagnosis and assessment of a historic timber structure in La Casa del Corregidor, using non-destructive techniques. In: Case Studies in Construction Materials 19(e02311), 13 pp.
22. Macedo-Alquicira, I. & Sotomayor-Castellanos, J. R. (2021): Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*. In: Madera y Bosques 27 (3), 1–14 pp.
23. Marttila, J., Möttönen, V., Haapala, A., Ylimäki, P., Kilpeläinen, P. & Verkasalo, E. (2024): Wood material properties of forest fire-damaged norway spruce and Scots pine for mechanical wood processing in Finland. In: Applied Sciences 14 (1), 238 pp.
24. Omonte, M. & Valenzuela-Hurtado, L. (2020): Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. In: Maderas: Ciencia y Tecnología 22(4), 559–568 pp.
25. Osuna-Sequera, C., Llana, D. F., Hermoso, E. & Arriaga, F. (2021): Acoustic wave velocity in long pieces of Salzmann pine for in-situ structural assessment. In: Construction and Building Materials 269, 121256 pp.
26. Ramos-León, H. M. & Cuellar-Bautista, J. E. (2018): Módulo de elasticidad de *Cedrelinga cateniformis* D. de plantaciones empleando técnicas no destructivas. In: Revista Forestal Venezolana, 62, 59–68 pp.
27. Rios-Camey, J. M., Aguirre-Ferrer, Á., López-López, B. & Calleja-Peláez, B. (2020): Variación de densidad de la madera en *Pinus teocote* Schl. et Cham., de áreas post-incendio, Acatepec, Guerrero. In: Foro de Estudios Sobre Guerrero 7 (1), 691–701 pp.

28. Rodríguez-Trejo, D. A., Ponce-Calderón, L. P., Tchikoué, H., Martínez-Domínguez, R., Martínez-Muñoz, P. & Pulido-Luna, J. A. (2022): Hacia el manejo integral del fuego en la megalópolis mexicana: un diagnóstico. In: *Tropical Forest Issues* 6, 89–96 pp.
29. Rodríguez-Gamiño, M. L. & López-Blanco, J. (2006): Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. In: *Investigaciones Geográficas* 60, 46–61 pp.
30. Schimleck, L., Dahlen, J., Apiolaza, L. A., Downes, G., Emms, G., Evans, R., Moore, J., Pâques, L., Van Den Bulcke, J. & Wang, X. (2019): Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. In: *Forests* 10 (9), 728 pp.
31. Secretaria de Agricultura y Ganadería (Ministry of Agriculture and Livestock) (1947, Mar 29). *Decreto por el cual se declara veda total indefinida de recuperación y de servicio para todos los bosques del Estado de México y del Distrito Federal*.
32. Soto, L., Valenzuela, L. & Lasserre, J. P. (2012): Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de pino radiata de 28 años, en la zona de renales, Chile. In: *Maderas: Ciencia y Tecnología* 14 (2), 209–224 pp.
33. Sotomayor-Castellanos, J. R. (2015): Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de *Pinus douglasiana*, en relación a su contenido de humedad. In: *Revista de Ciencia y Tecnología* 17 (23), 25–30 pp.
34. Sotomayor-Castellanos, J. R. (2022): Disminución de la densidad aparente y del módulo dinámico longitudinal de cinco maderas angiospermas después de su exposición al fuego. In: *Prisma Tecnológico* 13 (1), 69–76 pp.
35. Sotomayor-Castellanos, J.R., Adachi, K., Iida, R. & Hayashi, T. (2021): Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas. In: *Ingeniería Mecánica* 24 (1), 55–62 pp.
36. Sotomayor-Castellanos, J.R. & Gallegos-León, G. (2019): Disminución de la resistencia mecánica de madera laminada ocasionada por su exposición al fuego. In: *Revista Forestal del Perú*, 34 (1), 66–82 pp.
37. Sotomayor-Castellanos, J.R. & Villaseñor-Aguilar, J.M. (2016): Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L. In: *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 13 (33), 20–28 pp.
38. Sotomayor-Castellanos, J.R. & Ramírez-Pérez, M. (2014): Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. In: *Acta Universitaria* 24(5), 3–12 pp.
39. Sotomayor, J. & Ramírez, M. (2015): Velocidad de onda y módulo de elasticidad por ultrasonido y ondas de tensión de *Pinus spp.* vigas de madera mexicana. In: *Revista Ingeniería de Construcción* 30 (1), 69–79 pp.

40. Suirezs, T.M. & Berger, G., 2009: Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Editorial Universitaria de Misiones: Argentina, ISBN 978-950-579-154-5. 58 pp.
41. Uzcategui, M.G.C., França, F.J.N., Seale, R.D., Senalik, C.A. & Ross, R.J. (2023): Nondestructive evaluation of 2 by 10 southern pine lumber. In: Forest Products Journal 73 (3), 186–193 pp.
42. UNE-EN 338, 2016: Structural timber. Strength classes.
43. Valencia-Manzo, S. & Vargas-Hernández, J. (1997): Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. In: Madera y Bosques 3 (1), 81–87 pp.
44. Vega-Cueto, A., González-Sánchez, L., Rodríguez-Lazcano, S. & Hevia-Cabal, A. (2019, Sep 24-27). *Prediction of the sawing yield of Pinus pinaster and Pinus radiata structural timber from thinning operations through non-destructive techniques*.
45. Vignote-Peña, S. & Martínez-Rojas I., 2006: Tecnología de la madera. Ediciones Mundi-Prensa: Madrid, 678 pp.
46. Waghorn, M. J., Mason, E. G. & Watt, M. S. (2007): Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. In: Forest Ecology and Management 252 (1–3), 67–72 pp.
47. Yang, X., Ishimaru, Y., Iida, I. & Urakami, H. (2002): Application of modal analysis by transfer function to nondestructive testing of wood I: determination of localized defects in wood by the shape of the flexural vibration wave. In: Journal of Wood Science 48, 283–288 pp.
48. Yang, Z., Jiang, Z., Hse, C.Y. & Liu, R. (2017): Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. In: International Biodeterioration and Biodegradation 117, 123–127 pp.
49. Yoza, L., Baradit, E. & Acevedo, M. (2015): Caracterización de las propiedades físico mecánicas de especies, pino (*Pinus patula*) y tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) provenientes del Perú utilizando técnicas no destructivas. In: Anales Científicos 76 (1), 12–16 pp.

XUXAN ALYN ROSAS-RAMOS, MA. AMPARO MÁXIMA BORJA-DE LA ROSA *,
ROBERTO MACHUCA-VELASCO, ALEJANDRO CORONA-AMBRIZ,
LILIANA CUAPIO-HERNÁNDEZ
CHAPINGO AUTONOMOUS UNIVERSITY
DIVISION OF FORESTRY SCIENCES
LABORATORY OF WOOD ANATOMY AND TECHNOLOGY
TEXCOCO, MÉXICO
*Corresponding author: mborjad@chapingo.mx

LUIS ACUÑA-RELLÓ
UNIVERSITY OF VALLADOLID
E.T.S. OF AGRICULTURAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF AGRICULTURAL AND FORESTRY ENGINEERING
WOOD LABORATORY
PALENCIA, SPAIN

CAPÍTULO 4. VARIACIÓN RADIAL DE LA MORFOLOGÍA DE TRAQUEIDAS Y DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA DE *PINUS MONTEZUMAE* LAMB. **

**Radial variation in tracheid morphology and basic density of *Pinus montezumae*
Lamb wood**

Xuxan Alyn Rosas Ramos¹

<https://orcid.org/0000-0002-1015-5415>

Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa^{1*}

<https://orcid.org/0000-0002-6127-0501>

Roberto Machuca Velasco¹

<https://orcid.org/0000-0001-9840-7439>

Alejandro Corona Ambriz¹

<https://orcid.org/0000-0003-0005-7480>

Liliana Cuapio Hernández¹

<https://orcid.org/0000-0003-0952-8525>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación radial de la longitud, diámetro total, diámetro del lumen, espesor de pared celular y la densidad básica de la madera de *Pinus montezumae* Lamb., y comprobar si existe correlación entre estas variables morfológicas en función de la densidad. Se seleccionaron al azar 42 árboles localizados en un bosque natural de la Comunidad de Santa Ana Tlacotenco, Alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México, México. De cada árbol se extrajo un núcleo de crecimiento a 1.30 m de altura. Se estimó la densidad básica y la medición de las variables morfológicas de las traqueidas. Se obtuvieron patrones de variación radial con tendencia creciente de medula a corteza para la

densidad básica, longitud, diámetro y grosor de pared celular de traqueidas; mientras que, la variable diámetro de lumen presentó un comportamiento radial irregular. Se encontraron también correlaciones positivas altas de la longitud de traqueidas ($R^2=0.95$), diámetro ($R^2=0.90$) y el grosor de la pared celular ($R^2=0.95$) en función de la densidad básica, en contraste, la variable diámetro de lumen mostró relación moderada con esta propiedad física de la madera. Se concluye que, para *Pinus montezumae* en esta zona de estudio la densidad básica de la madera funciona como buen predictor de la longitud y el grosor de la pared celular de las traqueidas.

Palabras clave: biometría de traqueidas, anatomía de la madera, diámetro de traqueidas, grosor de pared celular, longitud de traqueidas.

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México.

*Autor de correspondencia: mborjad@chapingo.mx

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the radial variation in length, total diameter, lumen diameter, cell wall thickness, and basic density of *Pinus montezumae* Lamb. wood, and to determine if there is a correlation between these morphological variables and density. Forty-two trees were randomly selected from a natural forest in the Community of Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta, Mexico City, Mexico. An increment core was extracted from each tree at 1.30 m height. Basic density was estimated, and morphological variables

of the tracheids were measured. Radial variation patterns were observed, with increasing trends from pith to bark for basic density, tracheid length, total width, and cell wall thickness. The lumen width showed irregular radial behavior. High positive correlations were also found for tracheid length ($R^2=0.95$), diameter ($R^2=0.90$), and cell wall thickness ($R^2=0.95$) in relation to basic density. In contrast, the lumen diameter variable showed a moderate relationship with this physical property of the wood. It is concluded that, for *Pinus montezumae* in this study area, basic wood density serves as a good predictor of tracheid length and cell wall thickness.

Keywords: tracheid biometry, wood anatomy, tracheid diameter, cell wall thickness, tracheid length.

INTRODUCCIÓN

México posee una gran diversidad de coníferas, de las seis familias reconocidas a nivel mundial, cuatro están presentes en la República Mexicana, distribuidas en distintos tipos de vegetación, además, dentro de este grupo el género *Pinus* es uno de los más diversos (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). En el centro del país la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) & Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) (2021) señala que, *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham., *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus rudis* Endl. y *Pinus teocote* Cham. & Schltdl., son las principales especies de coníferas presentes en los bosques templados, de las cuales *Pinus montezumae* es una de las especies maderables de gran importancia ecológica y económica (Perry, 1991), ya que su madera se emplea para aserrío, triplay, ebanistería y construcción, también apreciada

para la extracción de resina (Lira, 2020), además la especie presenta una alta supervivencia en campo en acciones de reforestación y restauración de zonas degradadas (Flores et al., 2019).

La madera en las especies de coníferas se caracteriza por estar conformada en su mayoría por traqueidas, constituyendo el 90% del volumen xilemático total (Garcia et al., 2003), estas células de conducción varían dentro y entre individuos así como entre especies (Marja-Sisko, 1995). En la madera de gimnospermas (blandas) generalmente presentan una longitud promedio de 1000 y 6000 μm (Garcia et al., 2003) con un diámetro total de aproximadamente un centésimo de la longitud (Marja-Sisko, 1995). Las características morfológicas de estos elementos anatómicos son apreciadas sobre todo para la industria de la pulpa y papel, dado que sus dimensiones especialmente la longitud y el diámetro le confieren diversas propiedades principalmente de resistencia a los productos finales. Otra característica dimensional de las traqueidas importante en la industria papelera es la longitud, esta afecta la formación de las láminas y su uniformidad e indica que, cuanto más cortas sean estas células, más estrecha y uniforme será la formación de la lámina, aunque se disminuye también la resistencia al desgarro (Casey, 1980).

En la madera de las coníferas en específico de las especies de importancia económica, otra de las características fundamentales a considerar además de las anatómicas es la densidad, esta propiedad física es de utilidad principalmente en la industria de la construcción al ser un parámetro de la resistencia y emplearse como elemento de juicio en la selección o clasificación de la madera (Kollmann, 1959). Es importante señalar la estrecha relación que mantiene la densidad con la morfología de las traqueidas, Panshin y De Zeeuw (1980) señalan que las traqueidas con paredes celulares gruesas y lúmenes pequeños generan un

menor espacio de aire en la madera por lo tanto la densidad tiende a ser alta, mientras que paredes delgadas y lúmenes anchos dan origen a madera con baja densidad.

El estudio de las características morfológicas de las traqueidas así como de las propiedades físicas de la madera desempeñan un papel muy importante debido a que son indicadores de la calidad y aptitud que posee la madera para diferentes usos en la industria y procesamiento tecnológico (Winck et al., 2019), (Vignote y Martínez, 2006). Algunos estudios basados en la caracterización morfológica de traqueidas han generado modelos de predicción de la longitud y diámetro de traqueidas para *Pinus sylvestris* L. en Finlandia (Mäkinen y Hynynen, 2012). También Jankowski et al. (2021) evaluaron la variabilidad axial de la estructura anatómica, entre las características analizadas fue el diámetro de traqueidas de *Pinus sylvestris* provenientes de orígenes contrastantes del norte de Europa. En Argentina se ha estudiado el efecto de la poda en las características morfológicas de las traqueidas en *Pinus taeda* L. (Winck et al., 2019) y la variación radial del ángulo microfibrilar, diámetro y diámetro de lumen de las traqueidas de un pino híbrido de rápido crecimiento (Winck et al., 2022). En México, De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo (2016) cuantificaron la longitud, diámetro de lumen y grosor de traqueidas de madera temprana y tardía de las especies *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus cooperi* CEBlanco, *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus herrerae* Martínez, *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. y *Pinus teocote* Cham. & Schltdl. En *Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus devoniana* Lindl., y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., también se ha medido la longitud de traqueidas (Escoto García et al., 2017). En la madera de *Pinus pseudostrobus* var. *Apulcensis* (Lindl.) Shaw Saucedo-Ibarra et al. (2022) evaluaron el efecto del ángulo microfibrilar de las traqueidas.

En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar la variación radial de la densidad básica y las características morfológicas de traqueidas (longitud, diámetro total, diámetro del lumen, espesor de pared celular), además analizar la relación entre estas variables dimensionales en función de densidad básica de *Pinus montezumae* de un bosque templado en Milpa Alta, Ciudad de México, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio esta situada en el paraje “Temetatlitla” de los Bienes Comunales de Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta, Ciudad de México, México. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 19°06' 51.57" N y 98°59' 06.59" W con una superficie total de 35.27 hectareas. La topografía del terreno es montañosa, la altitud oscila entre 3271 a 3348 m, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 14.4° C y precipitación anual de 878.9 mm. El tipo de vegetación dominante es bosque natural de *Pinus* y bosque mixto de *Pinus-Alnus* (Rodríguez y López, 2006).

Muestreo

Se establecieron al azar 14 sitios de muestreo con una superficie de 0.25 ha cada uno. Dentro de cada sitio se seleccionaron de forma aleatoria tres árboles sanos con características dasométricas de altura y diámetro representativas. Posteriormente, para cada árbol seleccionado se realizó la extracción de un núcleo de crecimiento a una altura de 1.30 m con taladro de Pressler (Haglöf®) de 12 pulgadas de longitud y 12 mm de diámetro interno (Figura 1). Así mismo, se realizó la medición de las siguientes variables

dasométricas: diámetro normal, altura total y altura de la primera rama. Se obtuvo un total de 42 núcleos de crecimiento, los cuales se almacenaron y transportaron en recipientes con agua destilada para su conservación.



Figura 1. Obtención de núcleos de crecimiento en árboles de *Pinus montezumae* L

En el Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, los núcleos de crecimiento (N) se dividieron transversalmente cada 5 anillos desde la médula hacia la corteza, estas secciones a su vez fueron divididas horizontalmente en dos submuestras (A y B), ver Figura 2. Las submuestras A se utilizaron para la determinación de la densidad básica, mientras que las submuestras B para la medición de las características morfológicas de traqueidas.

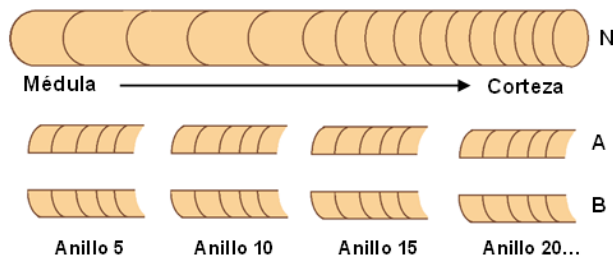


Figura 2. División de los núcleos de crecimiento para la obtención de submuestras

Estimación de la densidad básica

El volumen en estado verde de las submuestras (A) se calculó con el método de desplazamiento de agua (Principio de Arquímedes) (Valencia y Vargas, 1997), después estas submuestras se llevaron al estado anhidro en estufa (Memmert®) modelo UN110 a temperatura de $103\pm 1^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante para después pesarlas en una balanza digital con precisión 0.01 g. La densidad básica de la madera se obtuvo con la siguiente fórmula (Ecuación 1) (Valencia y Vargas, 1997):

$$Db = \frac{P_0}{V_v} \quad (1)$$

Donde: Db : Densidad básica (kg/m^3), P_0 : Peso anhidro (kg) y V_v : Volumen verde (m^3).

Determinación de la morfología de traqueidas

Se obtuvieron astillas de las submuestras (B) de madera, se colocaron en frascos con una mezcla de peróxido de hidrógeno al 30% y ácido acético glacial en partes iguales, estos frascos se introdujeron en estufa a 60°C durante 72 horas. Transcurrido ese tiempo, el material disociado se lavó con agua destilada cinco veces para retirar la mezcla. Después se tiñeron las traqueidas con colorante Pardo de Bismarck durante 30 minutos y se lavaron para retirar el colorante; a continuación, se colocaron en portaobjetos y fijaron con resina (Entellan®) dejando secar entre 24 y 36 horas.

El tamaño de muestra para las mediciones morfológicas se obtuvo a partir de información de una muestra preliminar de la longitud de treinta traqueidas, con estos valores se aplicó

la formula estipulada en la norma ASTM D 2915-17 (American Society for Testing and Materials, 2017) (Ecuación 2).

$$n = \left(\frac{t \cdot s}{E \cdot \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{t \cdot CV}{E} \right)^2 \quad (2)$$

Donde: n : Tamaño de muestra, s : Desviación estándar, $\bar{x}$: Valor de la media, E : Error relativo=45, t : Valor de t-Student con un $\alpha=0.05$ y CV : Coeficiente de variación.

Se midió la longitud, diámetro, diámetro de lumen y grosor de pared celular de 32 traqueidas para cada sección de cinco anillos de crecimiento en microfotografías tomadas con un microscopio equipado con cámara fotográfica (Leica® EZ4HD) y el software Leica Application Suite versión 3.3.0, se utilizaron los objetivos 10x para medir longitud y los diámetros de traqueida y lumen en 40x (Figura 3), el grosor de la pared celular se obtuvo por diferencia de los diámetros.

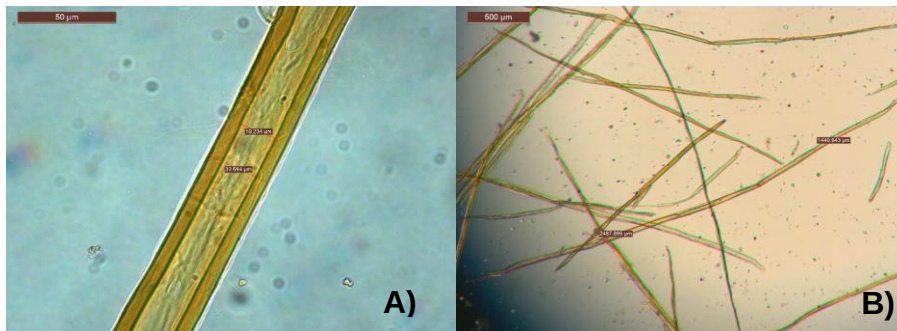


Figura 3. Medición de la morfología de traqueidas, A) diámetro y diámetro de lumen 40x, B) longitud 10x

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software R (R Core Team, 2023). Se obtuvieron las estadísticas descriptivas para las variables: altura total de árbol, altura de la primera rama,

diámetro normal, densidad básica, longitud de traqueidas, diámetro, diámetro de lumen y grosor de la pared celular. Se ajustaron modelos de regresión lineal segmentada (Ecuación 3), empleando la longitud de traqueidas (LT), diámetro (DT), diámetro de lumen (DL) y grosor de pared celular (GPCT) como variables respuesta y la densidad básica (Db) como variable explicativa.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 (x - k) + \varepsilon_i \quad (3)$$

Donde: k : Punto de quiebre, x =Densidad básica (kg/m^3).

Se estableció el punto de quiebre (k) de 470 kg/m^3 en la densidad básica para las correlaciones con las variables longitud de traqueidas (LT) y grosor de pared celular (GPCT) y 460 kg/m^3 con el diámetro (DT) y diámetro de lumen (DL).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El arbolado de *Pinus montezumae* en el área de estudio tiene una altura promedio de 28.8 m y un diámetro normal promedio de 67.9 cm. En la Tabla 1 se presentan las estadísticas descriptivas de las variables altura total (H), altura de la primera rama (HR), diámetro normal (D), densidad básica de la madera y morfología de traqueidas.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los árboles y morfología de traqueidas de *Pinus montezumae*

Parámetro	Árboles			Madera		Traqueidas		
	H (m)	HR (m)	D (cm)	Db (kg/m^3)	LT (μm)	DT (μm)	DL (μm)	GPCT (μm)
n	42	42	42	619	619	619	619	619
Mínimo	22.18	6.50	57.30	209.58	1743.49	41.74	20.87	10.17
Máximo	36.09	23.83	88.02	753.08	5956.67	63.45	45.45	23.54
μ	28.86	14.76	67.91	467.91	4265.92	51.43	33.22	18.20
σ	3.13	4.08	10.25	52.02	730.76	3.88	4.30	2.06
CV (%)	10.85	27.67	15.09	11.11	17.13	7.54	12.95	11.36

Nota: H: altura, HR: altura 1ra rama, D: diámetro normal, Db: densidad básica, LT, longitud de traqueidas, DT: diámetro de traqueidas, DL: diámetro de lumen, GPCT: grosor de pared celular de traqueidas, μ : media, σ : desviación estándar, CV: coeficiente de variación.

De acuerdo con la Tabla 1, la madera de *Pinus montezumae* tiene una densidad básica promedio de 467.91 kg/m^3 (0.467 g/cm^3), Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2012) reportan un valor similar de 0.47 g/cm^3 para el género *Pinus*, y para *Pinus greggii* Engelm una densidad relativa de 0.47 g/cm^3 (López y Valencia, 2001). Otros estudios en *P. montezumae* indican valores de densidad básica ligeramente inferiores, entre estos Sotomayor et al. (2003) reportan un valor de 420 kg/m^3 , Zamora-Campos et al. (2007) de 445 kg/m^3 , y Lima (2013) de 450 kg/m^3 . Los resultados de densidad básica de *P. montezumae* indican que para la zona de estudio la madera se encuentra en la categoría de clasificación de madera ligera (Vignote y Martínez, 2006) con una densidad de tipo media (Sotomayor, 2008).

La longitud promedio de las traqueidas de *P. montezumae* es de $4265.92 \mu\text{m}$, de acuerdo con la clasificación de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) se encuentra dentro de la categoría de longitud media (IAWA, 2004). Valores similares de longitud de traqueidas para especies del género *Pinus* se han obtenido por De la Paz-Pérez y Dávalos (2016) para *Pinus cooperi* ($4135 \mu\text{m}$), *Pinus herrerae* ($4372 \mu\text{m}$) y *Pinus leiophylla* ($4486 \mu\text{m}$), estas variaciones en la longitud de acuerdo con Escoto García et al. (2017) dependen tanto de la especie y las tasas de crecimiento, como de las condiciones climatológicas y topográficas en las que se desarrollen los individuos.

Se encontró que el diámetro promedio de las traqueidas de *P. montezumae* es de $51.43 \mu\text{m}$, similar al de $53.25 \mu\text{m}$ para *Pinus caribaea* Morelet, respecto al diámetro promedio de lumen se obtuvo un valor de $33.22 \mu\text{m}$ el cual coincide también con los valores de 34.86

μm para *Pinus caribaea* (Adenaiya y Ogunsanwo, 2016) y con las traqueidas de madera temprana de *Pinus arizonica* de 33 μm , *Pinus cooperi* con 32 μm , *Pinus leiophylla* con 33 μm y *Pinus teocote* de 33 μm (De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo, 2016). Por último, se encontró que el grosor de pared celular de las traqueidas de *P. montezumae* fue de 18.20 μm , valor superior al de madera tardía de *Pinus arizonica* (11 μm), *Pinus leiophylla* (11 μm), *Pinus teocote* (12 μm) y *Pinus herrerae* (13 μm) (De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo, 2016).

Los amplios rangos encontrados entre los valores mínimos y máximos para las características morfológicas de traqueidas se debieron principalmente a la presencia y no diferenciación para este estudio de madera temprana y tardía, así como de madera juvenil y madura, como sucede en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari (Márquez-Carrero et al., 2022) y *Pinus contorta* Douglas ex Loudon (Refort et al., 2024).

Variación radial de la densidad básica

De acuerdo con los valores medios obtenidos para la densidad básica en sentido radial de *P. montezumae* (Figura 4a) se encontró que la menor densidad básica (441.28 kg/m^3) se presentó en la submuestra más cercana a la medula (anillo 5) con tendencia creciente hasta un valor máximo de 493.98 kg/m^3 en el anillo 70, a partir de este punto se observó una disminución escasa y gradual desde el anillo 75 al 90. Este comportamiento coincide con el de *Pinus sylvestris* se encontró que la gravedad específica básica aumentó rápidamente desde la medula hasta el anillo 20-30 para estabilizarse y posteriormente decrecer después del anillo 70 (Auty et al., 2014), análogamente Fabisiak y Fabisiak (2021) encontraron para *Pinus sylvestris* el mismo patrón de disminución de la densidad en los anillos próximos a

la corteza indicando un efecto significativo de la edad cambial sobre la densidad de la madera. Así mismo, otros factores que han demostrado tener influencia en la variación radial de la densidad de la madera en los anillos próximos a la corteza son los componentes albura-duramen, se han encontrado valores altos de densidad en el duramen de *Pinus teocote* (Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2012), además, la zona correspondiente a la albura en las coníferas se caracteriza por ser más porosa y blanda, y presentar menor contenido de extractivos (Garcia et al., 2003), también para esta última relación se encontró que el contenido de extractivos en el duramen es mayor reflejándose en el incremento de la densidad, mientras que en la zona de la albura la cantidad de extractivos es menor lo cual conlleva en una disminución de la densidad de la madera (De Angelis et al., 2018).

Cabe destacar que, el patrón radial de la densidad básica de la madera para *Pinus montezumae* se mostró típico de algunas coníferas pero no de la mayoría, en *Pinus elliottii* Engelm los patrones de variación radial son diferentes con tendencias totalmente crecientes de medula a corteza (Palermo et al., 2013; Sackser et al., 2018).

Variación radial de la longitud de traqueidas

El valor más bajo para la longitud media de traqueidas se presenta para la submuestra más cercana a la medula (anillo 5) con un valor de 2879.37 μm , en contraste, el más alto se obtuvo para la submuestra más cercana a la corteza (anillo 90) con un valor de 5306.27 μm . Este comportamiento es similar al de *Pinus caribaea*, el cual posee el valor medio más bajo de longitud de traqueidas (3022 μm) en los anillos cercanos a la medula (1-5), mientras que 5590 μm están en los anillos más cercanos a la corteza (21-26) (Oluwadare et al., 2019).

La figura 4b muestra el patrón de variación radial de la longitud de las traqueidas obtenido para *Pinus montezumae* donde se observó un incremento de medula a corteza, similar al comportamiento encontrado para algunas coníferas como *Pinus ponderosa* P. Lawson & C. Lawson (Letourneau et al., 2014), *Pinus patula* Schltdl. & Cham., (Kamala y Missanjo, 2017), *Pinus taeda* (Winck et al., 2019) y *Pinus contorta* (Refort et al., 2024). Asimismo, se observó que esta tendencia de incremento en la longitud de traqueidas fue mayor en la zona de la medula hasta el anillo 20, después de este punto *P. montezumae* reflejó incrementos más pequeños en la longitud de traqueidas hacia la corteza. De acuerdo con estos resultados, se estimó a través del análisis grafico una edad de transición entre madera juvenil y madura para esta especie de 20 años, esta edad de transición de *P. montezumae* es semejante a la de *Pinus sylvestris* ubicada a los 21.77 años (Mutz et al., 2004) y a la de *Pinus elliottii* que es a los 23 años (Palermo et al., 2013). En coníferas la edad de transición entre leño juvenil y maduro se produce a partir de los 20 años (Letourneau et al. 2014; Palermo et al. 2013; Zanuncio et al. 2022).

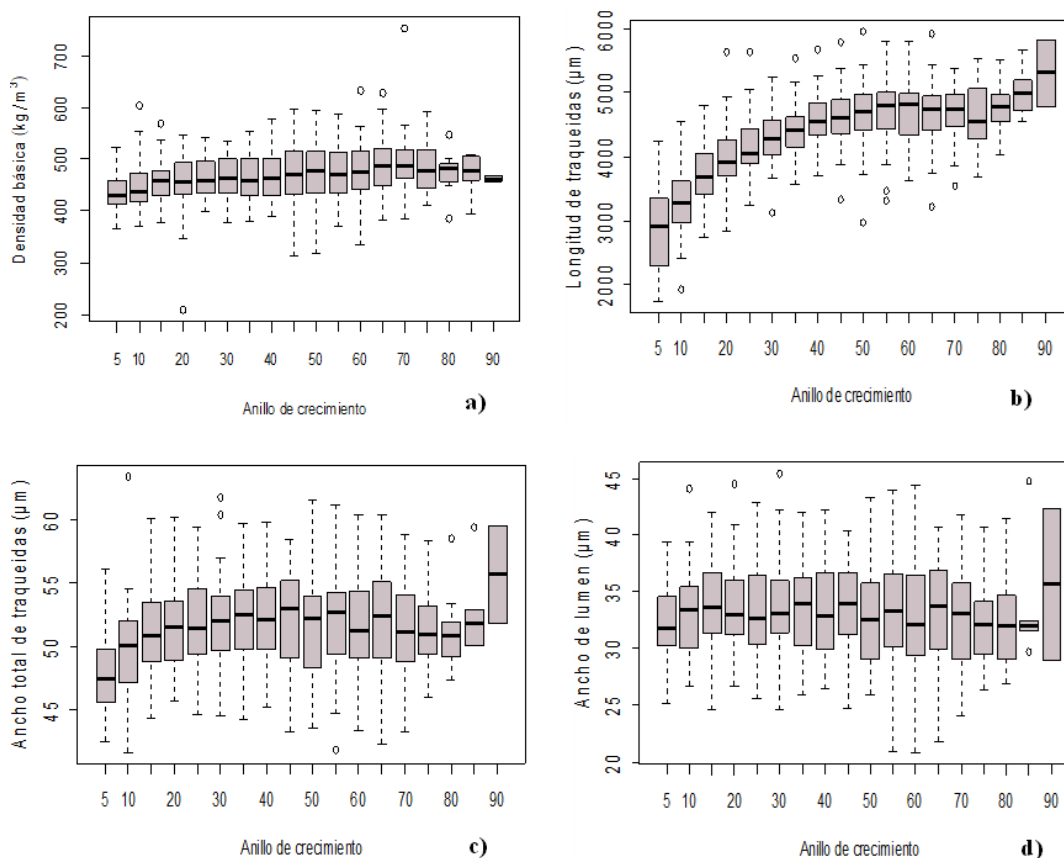
Variación radial del diámetro y diámetro de lumen

El comportamiento radial del diámetro de lumen presentó un patrón creciente desde la medula hacia la corteza (Figura 4c), el valor promedio más bajo (47.68 μm) se presentó para la sección más cercana a la medula (anillo 5), mientras que el valor promedio máximo (55.73 μm) fue en la sección más cercana a la corteza (anillo 90), coincide con el patrón creciente de medula a corteza en el diámetro de traqueidas en *Pinus sylvestris* (Mäkinen y Hynynen, 2012). En contraste, para la variable diámetro de lumen se obtuvo un patrón irregular sin alguna tendencia de medula a corteza (Figura 4d), de manera similar ocurre en

P. caribaea que no muestra un patrón consistente de variación radial para esta característica morfológica (Adenaiya y Ogunsanwo, 2016).

Variación radial del grosor de pared celular

Las traqueidas de *P. montezumae* con las paredes celulares más delgadas se presentan en la submuestra más cercana a la medula (anillo 5) cuyo valor es de 15.36 μm , en cambio, las paredes celulares más gruesas (20.07 μm) corresponden a la submuestra más cercana a la corteza (anillo 90). En *P. montezumae* se observó una tendencia creciente en el grosor de la pared celular desde la medula hacia la corteza (Figura 4e) similar a *Pinus contorta* (Refort et al., 2024), *Pinus taeda* (Winck et al., 2019) y *Pinus caribaea* (Álvarez et al., 2023).



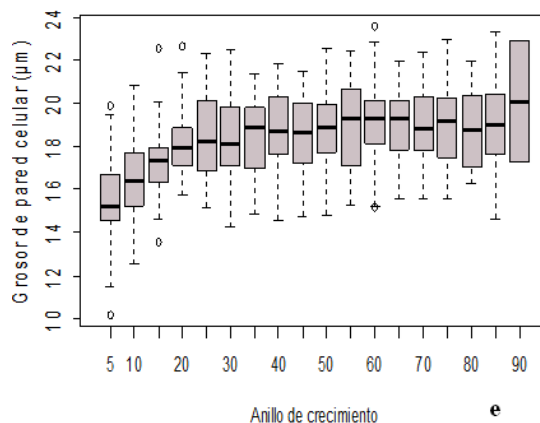


Figura 4. Variación radial de medula a corteza de la a) densidad básica, b) longitud de traqueidas, c) diámetro, d) diámetro de lumen y e) grosor de pared celular de *P. montezumae*

Relación entre las variables morfológicas de traqueidas en función de densidad básica de la madera

Los resultados del análisis de longitud de traqueidas (LT), grosor de pared celular (GPCT) y diámetro de traqueidas (DT) en función de la densidad básica (Db) indicaron una relación significativa (p valor < 0.05) (Tabla 2) y positivas entre estas variables (Figura 5a, 5b y 5d), de manera concreta se obtuvo que el 95% de la variabilidad de la longitud de traqueidas y el grosor de pared celular, así como el 90% de la variabilidad del diámetro es explicada por la densidad básica de la madera.

Estos resultados son similares para las relaciones entre la longitud de traqueidas y la densidad de la madera de *Pinus sylvestris* en árboles dominantes ($r=0.95$), intermedios ($r=0.97$) y suprimidos ($r=0.87$) (Fabisiak y Fabisiak, 2021). En *Pinus tabuliformis* Carrière las relación entre la longitud de traqueidas y el grosor de la pared celular en función de la densidad básica es positiva con coeficientes de determinación de 0.22 para ambos modelos (Ouyang et al., 2017). Además, basado en los datos obtenidos específicamente en la

relación positiva encontrada entre el grosor de pared celular y la densidad básica de la madera se reafirma lo expuesto por Panshin y De Zeeuw (1980) que, paredes gruesas en las traqueidas conllevan a densidades altas y, paredes delgadas reflejan densidades bajas en la madera.

Por otro lado, se encontró que el modelo de regresión entre el diámetro de lumen en función de la densidad básica no resultó significativo ($p > 0.05$), ver Tabla 2, lo que sugiere que estas variables no están relacionadas, además en la Figura 5c se observa en un principio un comportamiento creciente en el diámetro de lumen para posteriormente mostrar una tendencia negativa abrupta. Relaciones negativas entre el diámetro de lumen y la densidad básica de la madera también se muestran en *Pinus sylvestris* con un coeficiente de correlación de Pearson de -0.253 (Pritzkow et al., 2014) y en madera temprana y tardía en clones de *P. tabuliformis* con coeficientes de correlación de Pearson de -0.424 y -0.408 respectivamente (Ouyang et al., 2017).

Tabla 2. Modelos de regresión segmentada para las características morfológicas de traqueidas en función de la densidad básica de *P. montezumae*

x (μm)	y (kg/m^3)	Modelo $y \leq k$	Modelo $y > k$	p-valor	R ²
LT	Db	$y = -26439.335 + 66.282x$	$y = 7625.795 - 6.197x$	3.60e-07	0.95
DT		$y = -63.97631 + 0.25280x$	$y = 60.31569 - 0.0174x$	0.00091	0.90
DL		$y = -12.19391 + 0.10088x$	$y = 49.36329 - 0.03294x$	0.652	0.53
GPCT		$y = -0.45.90254 + 0.13882x$	$y = 17.82946 + 0.00322x$	5.63e-07	0.95

Nota: LT, longitud de traqueidas, DT: diámetro de traqueidas, DL: diámetro de lumen, GPCT: grosor de pared celular de traqueidas, Db: densidad básica.

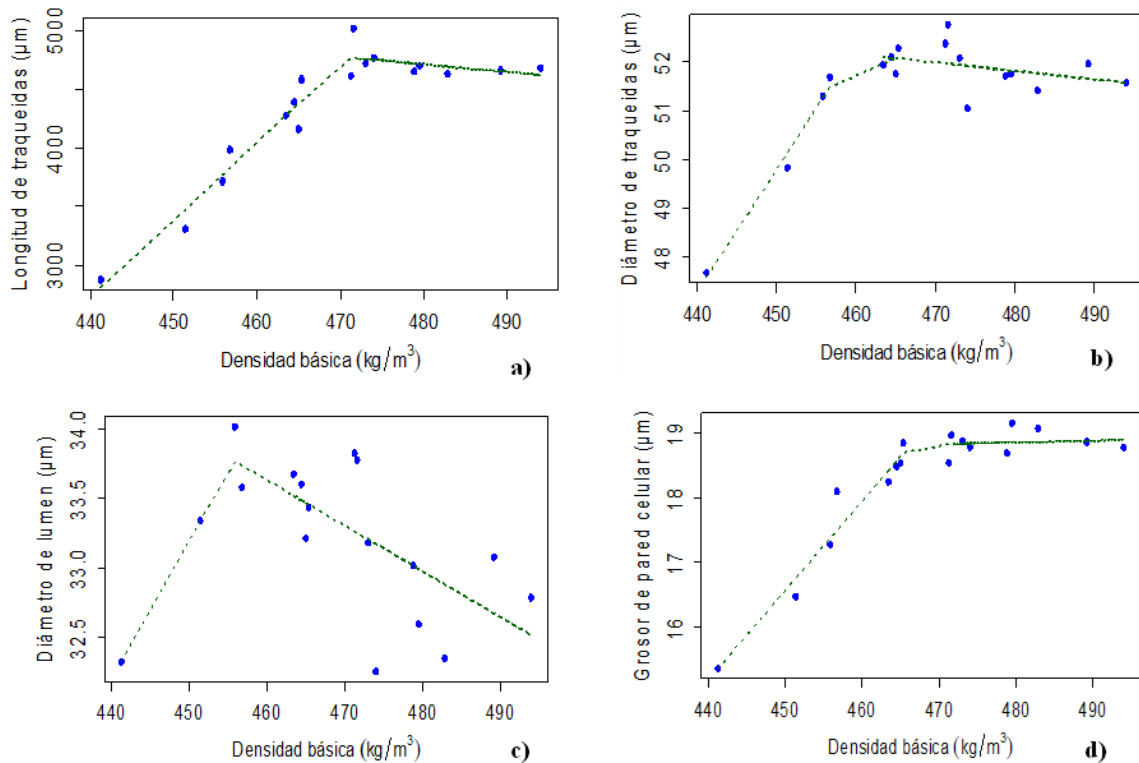


Figura 5. Relación entre las características morfológicas de traqueidas en función de la densidad básica de la madera de *P. montezumae*: a) longitud, b) diámetro, c) diámetro de lumen y c) grosor de pared celular

CONCLUSIONES

La influencia de la edad de los árboles de *Pinus montezumae* en los patrones de variación radial de la longitud, diámetro y grosor de pared celular de traqueidas presentaron tendencias crecientes de medula a corteza. En contraste, el diámetro de lumen presentó un comportamiento radial irregular. Además, a partir del perfil de variación radial de la longitud de traqueidas se encontró una edad de transición de madera juvenil a madura de 20 años para *Pinus montezumae* en la zona de estudio.

El patrón de variación en sentido radial de la densidad básica de la madera de *P. montezumae* no mostró una tendencia totalmente creciente, por lo que se recomienda y

resulta necesario profundizar a través de estudios similares si estas variaciones pudieran deberse a factores como las porciones albura-duramen u otros.

Finalmente se establece que, para *Pinus montezumae* en la zona de estudio, los modelos de regresión para la longitud, diámetro y grosor de pared celular de las traqueidas en función de la densidad básica resultaron ser los más adecuados, por lo que pueden emplearse para estimar estas características morfológicas con buena precisión haciendo uso de la densidad básica.

LITERATURA CITADA

Adenaiya, A. O., & Ogunsanwo, O. Y. (2016). Radial variation in selected physical and anatomical properties within and between trees of 31 year old *Pinus caribaea* (Morelet) grown in plantation in Nigeria. South-east European forestry: SEEFOR 7(1), 49–55. DOI: <http://dx.doi.org/10.15177/seefor.16-07>

Álvarez Lazo, D., Quilhó, T., Bessa, F., Rodríguez, J. C., & Tavares, F. (2023). Variación de la biometría de las traqueidas y propiedades de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari. Revista Cubana de Ciencias Forestales, 11(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692023000200006&script=sci_arttext

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products. ASTM D2915-17 (p. 14). ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/D2915-17>

Auty, D., Achim, A., Macdonald, E., Cameron, A. D., & Gardiner, B. A. (2014). Models for predicting wood density variation in Scots pine. Forestry, 87(3), 449–458. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>

- Casey, J. P. (Ed.). (1980). Fiber preparation and approach flow. In pulp and paper. Chemistry and chemical technology. Volume II. (3thd ed., pp. 822–827). Wiley-Interscience.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, (CONABIO), & Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2021). La biodiversidad en la Ciudad de México (p. 14). CONABIO/SEDEMA. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/region/eeb/files/CDMX_resumen.pdf
- De Angelis, M., Romagnoli, M., Vek, V., Poljanšek, I., Oven, P., Thaler, N., Lesar, B., Kržišnik, D., & Humar, M. (2018). Chemical composition and resistance of Italian stone pine (*Pinus pinea* L.) wood against fungal decay and wetting. *Industrial Crops & Products*, 117(February), 187–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.016>
- De la Paz-Pérez, O. C., & Dávalos-Sotelo, R. (2016). Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 113–132. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>
- Escoto García, T., Beas Beas, N., Contreras Quiñones, H. J., Rodríguez Rivas, A., Díaz Ramos, S. G., Anzaldo Hernández, J., & Vega Elvira, R. (2017). Caracterización dasométrica y químico - micrográfica de tres especies de pino y su viabilidad de aprovechamiento integral. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 109–138. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i41.28>
- Fabisiak, E., & Fabisiak, B. (2021). Relationship of tracheid length annual ring width and wood density in scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand. *BioResources*, 16(4), 7492–7508. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>
- Flores, A., Pineda, T., & Flores, E. (2019). Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.604>

- García Esteban, L., Guindeo Casasús, A., Peraza Oramas, C., & De Palacios de Palacios, P. (2003). La madera y su anatomía. Anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular. Fundación Conde del Valle Salazar, Ediciones Mundi-Prensa y Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AiTiM).
- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(S1), 126–133. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- IAWA. (2004). List of microscopic features for softwood identification (H. G. Richter, D. Grosser, I. Heinz, & P. E. Gasson (Eds.); Vol. 25, Issue 1).
- Jankowski, A., Wyka, T. P., & Oleksyn, J. (2021). Axial variability of anatomical structure and the scaling relationships in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles of contrasting origins. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 274(October 2020), 151747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151747>
- Kamala, F., & Missanjo, E. (2017). Radial and among-family variations of tracheid length and the relationships with bending properties in *Pinus patula*. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 4(11), 9–13. https://www.researchgate.net/publication/320622094_Radial_and_Among-Family_Variations_of_Tracheid_Length_and_the_Relationships_with_Bending_Properties_in_Pinus_patula
- Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones (1st ed.). Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera.
- Letourneau, F. J., Medina, A. A., Andia, I. R., Andenmatten, E., De Agostini, N., & Mantilaro, N. (2014). Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la Patagonia Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 40(2), 196–201. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1669-23142014000200012&script=sci_arttext

- Lima Rojas, L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía [Universidad Autónoma de Nuevo León]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://eprints.uanl.mx/3530/1/1080256594.pdf
- Lira González, D. E. (2020). Guía básica de pinos mexicanos. In Bozkia.
- López, L. M., & Valencia, M. S. (2001). Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques*, 7(1), 37–46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770105>
- Mäkinen, H., & Hynynen, J. (2012). Predicting wood and tracheid properties of scots pine. *Forest Ecology and Management*, 279, 11–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.024>
- Marja-Sisko, I.-P. (1995). Fiber atlas: Identification of paper making fibers (1st ed.). Springer Series in Wood Science. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-662-07212-7>
- Márquez-Carrero, G., Valero, S. W., León-Hernández, W. J., Gutiérrez-Gotera, I., & Maldonado-Rangel, J. C. (2022). Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de plantaciones de 25 años de edad. *Tecnología en marcha*, 35(3), 82–93. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5868>
- Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U., Nepveu, G., Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U., Nepveu, G., Utza, R. M., Uilleyb, E. G., Auterc, U. H. S., & Epveub, G. N. (2004). Modelling juvenile-mature wood transition in scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects. *Annals of Forest Science*, 61(8), 831–841. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2004084>
- Oluwadare, A. O., Oyelere, A. T., Riki, J. T. B., Majekobaje, A. R., & Adeyemo, S. M. (2019). Axial and radial variation in tracheid length of plantation grown *Pinus*

- caribaea*. Morelet grown in Afaka. Journal of Sustainable Environmental Management, 11, 1–8.
https://www.researchgate.net/publication/355158592_Axial_and_Radial_Variation_in_Tracheid_Length_of_Plantation_grown_Pinus_caribaea_Morelet_Grown_in_Afaka
- Ouyang, F., Ma, J., An, S., Wang, J., & Weng, Y. (2017). Genetic variation of wood tracheid traits and their relationships with growth and wood density in clones of *Pinus tabuliformis*. Journal of Forestry Research. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0483-7>
- Palermo, G. P. M., Latorraca, J. V. F., Severo, E. T. D., Nascimento, A. M., & Rezende, M. A. (2013). Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. Revista Árvore, 37(1), 191–200. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000100020>
- Panshin, A. J., & De Zeeuw, C. (1980). Textbook of wood technology. Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada (4th ed.). McGraw-Hill Book Company.
- Perry, J. P. (1991). The pines of Mexico and Central America (1st edit). Timber Press.
- Pritzkow, C., Heinrich, I., Grud, H., & Helle, G. (2014). Relationship between wood anatomy, tree-ring widths and wood density of *Pinus sylvestris* L. and climate at high latitudes in northern Sweden. Dendrochronologia, 32(4), 295–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.07.003>
- R Core Team. (2023). R: A Language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. <https://www.r-project.org/>
- Refort, M. M., Acuña-Rello, L., Monteoliva, S., Mateo, C., Charlot, P., Palazzini, D., Pagano, C., Keil, G., & Spavento, E. (2024). Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura y de sus valores elasto-resistentes en *Pinus contorta*.

Maderas: Ciencia y Tecnología, 26(1). DOI:
<https://doi.org/https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.34>

Rodríguez, G. M. D. L., & López, B. J. (2006). Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. *Investigaciones Geograficas*, 60, 46–61.

Sackser, M. R., Valdés, P. A., Grance, L., Bohren, A. V., Aguilera, A., Andrade, N. Y., & Grance, J. (2018). Densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm de 21 años de edad, a distintas alturas desde la medula a la corteza; estimación del límite madera juvenil-madura. *Revista Yvyrareta*, 26, 29–37. DOI:
<https://hdl.handle.net/20.500.12219/2588>

Saucedo-Ibarra, J., Borja de la Rosa, A., Tarcísio-Lima, J., Corona-Ambriz, A., & Machuca-Velasco, R. (2022). Efecto del ángulo microfibrilar en las características tecnológicas de la madera de *Pinus*. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 24, 1–18. DOI:
<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100448>

Silva-Arredondo, F. M., & Návar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77–88.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-04712012000100006&script=sci_arttext

Sotomayor Castellanos, J. R., Herrera Ferreyra, M. A., & Cruz de León, J. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas. XII Congreso Forestal Mundial. <https://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>

Sotomayor, J. (2008). Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
https://www.academia.edu/6820211/Tabla_FITECMA_de_Clasificación_de_Características_Mecánicas_de_Maderas_Mexicanas

- Valencia Manzo, S., & Vargas Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81–87. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- Vignote Peña, S., & Martínez Rojas, I. (2006). *Tecnología de la madera* (3a ed.). Ediciones Mundi-Prensa. <https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>
- Winck, R. A., Area, M. C., Belaber, E. C., Aquino, D. R., Fassola, H. E., & Gauchat, M. E. (2022). Tracheid morphological characteristics of fast growth hybrid pine. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 24(24), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100443>
- Winck, R. A., Martínez, M. I., Romberg, E. I., Fassola, H. E., Bohren, A. V., & Aquino, D. R. (2019). Morfometría de traqueidas de *Pinus taeda* L., provenientes de un ensayo de poda en NE de Argentina. (p. 9). <https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/4129>
- Zamora-Campos, E. M., Vázquez-Cuecuecha, O. G., Pérez-Ahuatzi, A., Cano-Flores, R., Aparicio-Rentería, A., & Fernández Pedraza, E. (2007). Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. en tres altitudes del parque nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana*, 9(2), 33–37. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49790205>
- Zanuncio, A. J. V., Possato, E. L., Carvalho, A. G., Lopes, O. P., & De Castro, V. R. (2022). Basic density and scaling of juvenile and mature wood in *Pinus Caribaea* trees. *Cellulose Chemistry and Technology*, 56(5), 473–479. DOI: <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2022.56.40>

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

La calidad de la madera de *Pinus montezumae* afectados por incendios forestales en la Alcaldía de Milpa Alta mostró aptitudes óptimas para uso estructural en caso de un posible aprovechamiento maderable permitiendo la obtención de madera de mediana calidad principalmente en la segunda troza del arbolado, sin embargo, esto no limita que la madera no apta para su uso en estructuras pueda emplearse para otros fines.

La variación radial de las características morfológicas de traqueidas en esta especie y su relación con la densidad básica mostraron tendencias similares a otras especies de este género, al mismo tiempo se encontró que la longitud y el grosor de pared celular de las traqueidas son las variables que tienen mayor relación con la densidad básica.

Así mismo, con esta investigación se generó información base necesaria para el surgimiento y seguimiento de investigación científica. Se mostraron también las ventajas que ofrece el uso de métodos no destructivos para la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas de la madera aplicado a especies de importancia económica y ecológica, así como el establecimiento de una metodología útil y reproducible en áreas y especies forestales con limitantes en el empleo de los métodos tradicionales de evaluación maderable.

Se recomienda y considera la necesidad de realizar estudios similares a este para otras especies forestales de esta región y demás áreas de producción silvícola con la finalidad de contribuir al manejo forestal sustentable de la región, así como la evaluación de los efectos del fuego sobre la estructura y características tecnológicas de la madera.

Anexos

Formatos de campo

F.1 Colecta de muestras de madera en campo

ID de muestra (árbol)	Coordenadas UTM		Diámetro a la altura del pecho (DAP)
	E	N	

F2. Datos de laboratorio para determinación de densidad

ID de muestra	Volumen fresco	Peso seco