



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE 149 ESPECIES MEXICANAS DE IMPORTANCIA
INDUSTRIAL CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta

DIANA LAURA TORRES CEBALLOS



DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES Y
UNIDAD DE EXÁMENOS PROFESIONALES

Bajo la supervisión de: **DRA. AMPARO BORJA DE LA ROSA**



Chapingo, Estado de México, Febrero 2020

ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149
ESPECIES MEXICANAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL CON MÉTODOS NO
DESTRUCTIVOS

Tesis realizada por la C. **Diana Laura Torres Ceballos** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

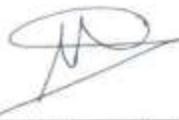
MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTOR:



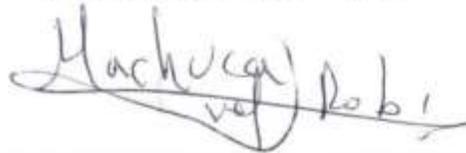
Dra. Amparo Borja de la Rosa

ASESOR:



Dra. Adriana Avalos Vargas

ASESOR:



M.C. Roberto Machuca Velasco

DEDICATORIA

A mi madre Isabel, la persona más maravillosa que conozco. Gracias por estar presente en mí día a día, por guiarme, protegerme, apoyarme, amarme y respetarme como ser humano, hija y amiga. Cada paso, cada triunfo, cada éxito son y serán siempre para ti. Te quiero mucho.

A mis hermanos y amigos Luis y Daniel, quiénes a pesar de la distancia siempre han estado dispuestos a apoyarme para cumplir mis sueños. Los quiero mucho.

A mis chaparritos Adonai, Janna, Nickté, Meiling y Liam quiénes alegran mi día al verlos y escuchar sus risas. Siempre tendrán mi apoyo.

A mis abuelos Reyna y Ramón, por brindarme el hogar en el que me siento segura y amada, y por estar presentes en cada etapa de mi formación. Los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por todo el apoyo brindado durante esta etapa y para la realización de este estudio.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por haberme acogido, guiado y protegido por tanto tiempo, por permitirme forjar el camino hacía mi futuro y por darme la oportunidad de conocer gente maravillosa.

Al Dios que sé que existe, y que no pide lujos, riquezas, sacrificios o adoraciones absurdas, sino aquél que es bondadoso en todo momento y con cualquier ser que habita en el planeta.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa por todos los años que trabajamos juntas, porque siempre me brindó su confianza y amistad pero sobre todo por creer en mí.

Al M.C. Roberto Machuca Velasco por ser parte de mi formación profesional, por brindarme su amistad y su apoyo para la realización de este documento.

A la Dra. Adriana Ávalos Vargas por brindarme su amistad y por apoyarme en la realización de este documento.

A la Sra. Adriana Acosta García por su paciencia y gran apoyo para la elaboración de este documento.

A mi compañero y amigo Alan, por estar presente siempre en el momento y lugar indicado.

A todos ustedes ¡Gracias!

DATOS BIBLIOGRÁFICOS



DATOS PERSONALES

Nombre:	Diana Laura Torres Ceballos
Fecha de nacimiento:	15 de Junio de 1995
Lugar de nacimiento:	Los Reyes, La Paz, estado de México
CURP:	TOCD950615MMCRBN01
Profesión:	Ingeniero Forestal Industrial
Cédula profesional:	11520782

DESARROLLO ACADÉMICO

Bachillerato	De 2010 a 2013- Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	De 2013 a 2017 - Ingeniería Forestal Industrial en la Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149 ESPECIES MEXICANAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL CON METODOS NO DESTRUCTIVOS

El conocimiento de las propiedades tecnológicas de las especies maderables es importante para elegir el aprovechamiento que se les dará a las mismas. De dichas propiedades destacan las mecánicas las cuales se obtienen a partir de pruebas destructivas de probetas de madera, sin embargo la tendencia mundial hacia la conservación de los recursos ha generado la creación de ensayos y modelos no destructivos para la estimación de éstas sin dañar el material experimental, por lo tanto el objetivo de esta investigación fue comparar dos modelos como métodos no destructivos para la estimación de las propiedades mecánicas de especies mexicanas y compararlas con las obtenidas por medio de un ensayo de ultrasonido. Se utilizaron 149 tabletas de dimensiones 0.13 x 0.7 x 0.01 m de largo, ancho y grueso a un contenido de humedad del 14%, se clasificaron en 3 grupos, Latifoliadas con 111 especies, Coníferas con 23 y uno del género *Quercus* con 14, se midieron el peso y volumen en estado saturado, en equilibrio y anhidro y se midió el tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido en sentido longitudinal de las tabletas. Se calcularon las densidades básica, en equilibrio y normal y se estimaron las propiedades mecánicas por medio de dos modelos de regresión. Con los tiempos de ultrasonido se calcularon las velocidades y con la densidad básica se estimaron los Módulos de Elasticidad de las especies. La comparación entre los modelos de regresión determinó que ambos son viables para estimar las propiedades mecánicas en especies mexicanas mientras que para la estimación de los módulos de elasticidad por ultrasonido se obtuvo un valor de 1.1432 para ajustar los valores obtenidos con el equipo Fakopp.

Palabras clave: densidad básica, ultrasonido, propiedades mecánicas, módulo de elasticidad.

ABSTRAC

MECHANICAL PROPERTIES OF 149 MEXICAN SPECIES OF INDUSTRIAL IMPORTANCE WITH NON-DESTRUCTIVE METHODS

The knowledge of the technological properties of timber species is important to choose the use that will be given to them. Of these properties, the mechanicals stand out because they are obtained from destructive tests of wood specimens. However, the global trend towards the conservation of resources has generated the creation of tests and non-destructive models for the estimation of these without damaging the experimental material. Therefore, the objective of this research was to compare two models as non-destructive methods for estimating the mechanical properties of Mexican species and compare them with those obtained by means of an ultrasound test. 149 tablets of dimensions of 0.13 x 0.7 x 0.01 m (long, wide and thickness, respectively) at a moisture content of 14% were used, and classified into three groups: Broadleaf trees, with 111 species; conifers, with 23; and one of the genus *Quercus*, with 14. Were measured the weight and volume in saturated, equilibrium and anhydrous state; also the transmission time of the ultrasound wave in the longitudinal direction of the tablets, was measured. Basic, equilibrium and normal densities were calculated and mechanical properties were estimated by means of two regression models. With the ultrasound times, the velocities were calculated and with the basic density, the Elasticity Modules of the species were estimated. The comparison between the regression models determined that both are viable for estimating the mechanical properties in Mexican species while for the estimation of the moduli of elasticity by ultrasound a value of 1.1432 was obtained to adjust the values obtained with the Fakopp equipment.

Keywords: basic density, ultrasound, mechanical properties, modulus of elasticity.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DATOS BIBLIOGRÁFICOS.....	V
RESUMEN GENERAL	VI
ABSTRAC	VII
CONTENIDO.....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	9
1.1 Objetivos.....	10
1.1.1 Objetivo general	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 Justificación	10
1.3 Hipótesis	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	11
2.1 Las características tecnológicas de la madera	11
2.2 Los ensayos no destructivos (END).....	13
2.3 Los ensayos no destructivos en México.....	16
CAPÍTULO 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149 ESPECIES CON VALOR INDUSTRIAL, POR MEDIO DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.....	19
CAPÍTULO. 4. COMPARACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE 149 ESPECIES MADERABLES MEXICANAS.....	58
CONCLUSIONES GENERALES.....	87
LITERATURA CITADA.....	88

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La determinación y el conocimiento de las propiedades tecnológicas de las especies maderables dependen de diversos criterios técnicos, biológicos, físicos, etc. Además, el sitio en donde se desarrollan forma una gran influencia para otorgar dichas características, por lo que es común que exista variabilidad entre una misma especie (Quintero, Heano, Monroy, & Camargo, 2011).

Las propiedades tecnológicas de especies mexicanas presentan una gran variabilidad, lo que les permite aprovecharlas en diversas industrias, y de dicho conocimiento, darles el uso que mejor convenga (Sotomayor & Villaseñor, 2016).

La industria de los productos forestales requiere de información actualizada sobre las propiedades tecnológicas de especies maderables para que sean aprovechadas de forma correcta, sin embargo, aún existen muchas especies maderables que no cuentan con dicha información, por lo que suelen ser mal aprovechadas o ignoradas, dando paso así a la sobreexplotación de otras especies (Labonnote, Ronnquist, & Malo, 2015, Sotomayor, 2018).

Los estudios sobre las propiedades mecánicas de la madera eran realizados por medio de pruebas destructivas en las que se requería el empleo de grandes cantidades de madera que terminaba inservible, sin embargo, desde hace años se han empezado a realizar estudios sobre ensayos no destructivos que permiten calcular dichas propiedades sin destruir el material.

Un método de ensayo no destructivo (*NDT- Nondestructive testing*) es cualquier tipo de prueba que no altere las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material estudiado. Se basan en la aplicación de fenómenos físicos o cualquier otro tipo de prueba que permita evaluar alguna propiedad (Íñiguez, Arriaga, Esteban, & Argüelles, 2007).

Entre las pruebas aplicadas a la madera aquellas que se basan en el uso de los ultrasonidos han sido estudiadas por diversos autores (Acuña, Díez, & Casado, 2006, Baradit, Niemz, & Fernández, 2013, Domingosa, Maia, Maia, & Schneidera, 2015, Sales, Candian, & Cardin, 2011, Sotomayor, Guridi, & García, 2010,

Sotomayor, Villaseñor, & Aoi, 2007, etc.) comprobando su eficacia para la determinación de las constantes elásticas de la madera (Acuña et al., 2006).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Comparar dos modelos como métodos no destructivos para el cálculo de las propiedades mecánicas de especies mexicanas y, a su vez, comparar dichas propiedades con las obtenidas por medio de ultrasonido en 149 especies.

1.1.2 Objetivos específicos

- Calcular la Densidad básica, en equilibrio y normal a través del Método de pesadas de 150 especies maderables
- Determinar las Propiedades Mecánicas de 149 especies maderables, por medio del Módulo de Young, para obtener datos experimentales y compararlos con los datos teóricos
- Estimar las propiedades mecánicas de las 149 especies, a través de los modelos de Brown et al., (1952) y Sotomayor et al. (2003) para compararlas con las obtenidas experimentalmente
- Analizar los datos obtenidos experimental y teóricamente, a través del modelo matemático que mejor convenga, para establecer uno que se ajuste a las características de las maderas mexicanas.

1.2 Justificación

Esta investigación surgió ante la necesidad de un modelo de estimación de las propiedades mecánicas de especies mexicanas debido a las diferencias que existe entre estas especies, pues con los modelos ya existentes se generan sesgos considerables.

1.3 Hipótesis

Al menos un modelo presentará diferencias significativas con el modelo ajustado para el cálculo de propiedades mecánicas mexicanas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1 Las características tecnológicas de la madera

La variabilidad de las características tecnológicas de la madera se genera por diversos factores, tomando en consideración que no es un material homogéneo. Múltiples estudios se han dado a la tarea de encontrar las principales causas que generan dicha variabilidad, así como de su clasificación y descripción.

A nivel mundial, en Ondo, Nigeria se realizó un experimento para estudiar las propiedades físicas y mecánicas de un grupo de especies provenientes de un mismo ecosistema de Selva Tropical en el que se incluían *Meliceae excelsa*, *Khaya ivorensis*, *Triplochiton scleroxylon*, *Azelia africana* y *Celtis mildbraedii*, demostrando que la resistencia de la madera depende en mayor medida de la misma especie que del entorno en el que se desarrolla (Jamala, Olubunmi, Mada, & Abraham, 2013).

En Portugal, se analizó la variabilidad de las propiedades dentro del mismo árbol, la especie estudiada fue *Acacia melanoxylon* R. Br., demostrando que ésta es más notoria dentro de un mismo árbol que entre ellos, debido a que la madera es un material anisotrópico, además, que existe una correlación moderada entre la densidad y las propiedades mecánicas de la especie (Saporiti et al., 2014).

En América Latina, países como Chile y República Dominicana, han estudiado las propiedades mecánicas de especies solo para describirlas mediante ensayos destructivos de acuerdo a normas nacionales.

En Chile se caracterizó al *Pinus canariensis* mediante la norma chilena NCh1989, utilizando 20 piezas de 7 x 7 pulgadas de escuadría y de entre 75 y 90 cm de largo con 10 repeticiones (Rodríguez & Vergara, 2008).

En República Dominicana se realizó un análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Tectona grandis* empleando 60 probetas de acuerdo con las normas ASTM de 1996, las pruebas fueron realizadas en una

máquina universal de ensayos Tinius Olsen (Crespo, Jiménez, Suatunce, Law, & Sánchez, 2008)

Los investigadores en México han realizado estudios descriptivos de especies maderables sobre sus propiedades tecnológicas, sin embargo se muestra cierta heterogeneidad de acuerdo al uso de normas para establecer las pruebas para las propiedades mecánicas.

Una de las más empleadas es la American Society for Testing and Materiales (ASTM) D-143-83, 1992, que se ha utilizado en estudios como la evaluación de ensayos de flexión estática, compresión perpendicular a la fibra y dureza Janka de *Peltogine mexicana* Martínez que emplea probetas a un contenido de humedad de equilibrio (Navarro, Borja, & Machuca, 2005), la descripción tecnológica de *Juniperus fláccida* Var. Poblana Martínez (Borja de la Rosa et al., 2010), la caracterización tecnológica de 20 especies maderables de la selva lacandona, Chiapas, con probetas libres de defectos a un contenido de humedad verde y en equilibrio (Bárcenas, 1995) y la caracterización de las propiedades tecnológicas de *Quercus insignis* de Huatusco, Veracruz (Machuca, Borja, Zamudio, & Bárcenas, 1999).

Sin embargo, existe el empleo de otras normas como el estudio que realiza la descripción anatómica, física y mecánica de la madera de *Andira inermis* (W. Wright) DC., del estado de Michoacán, en donde se aplica la norma ASTM D-143-94 (2000) para la elaboración de las probetas acondicionadas a un 12% de contenido de humedad (Téllez, Herrera, & Rutiaga, 2009)

Otro caso es aquel sobre la descripción de la madera de *Quercus laeta* Liemb., que utiliza las normas 459, 464, 465, 466, 555, 741, 742, y 743 de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) (1972), las cuales se refieren a métodos específicos para cada ensayo (Nájera, Vargas, Méndez, & Graciano, 2005).

El manejo de todas estas normas (y de muchas otras) genera diversidad en los resultados sobre las propiedades mecánicas de las especies, provocando una falta

de confianza al momento de consultar los resultados, lo que a su vez provoca que no se aprovechen las especies con potencial industrial.

2.2 Los ensayos no destructivos (END)

Por definición de acuerdo con Ross (2015), *“la evaluación no destructiva es la ciencia de identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar sus capacidades de uso final y luego usar esta información para tomar decisiones con respecto a las aplicaciones apropiadas”*.

Una de las técnicas no destructivas más antigua y empleada en el área de la industria forestal es la evaluación visual de las características de una pieza de madera, tales como el tamaño, número y ubicación de nudos, color, veteado, hilo, defectos y más, que se consideran para clasificar principalmente la calidad y el uso de la misma.

Baettig (2001) determina el Módulo de Young o Módulo de elasticidad (MOE) en 5 piezas de *Pinus radiata* D. Don por medio de la frecuencia de vibración con dos equipos distintos, uno elaborado de acuerdo a la norma ASTM E1876-99 y el otro acorde al equipo 340E-Computer de Metriguard Inc., concluyendo la ventaja de éstos ante el uso de la Máquina Universal.

Un estudio sobre la estimación de la calidad de la madera producida en Uruguay para uso estructural evaluada por ensayos no destructivos (END) menciona que la tecnología que empleó llegó a su país desde finales de los años 90's, lo que nos da una idea del atraso de América Latina sobre las investigaciones con estos ensayos a comparación de otras partes del mundo (O'Neill, 2004).

En España, las investigaciones que hablan sobre los ensayos no destructivos llevan realizándose desde los años 80's, la gran mayoría por arquitectos e ingenieros de montes (ingenieros forestales en América) y por universidades e instituciones de investigación ya que poco es lo que aporta la industria privada en este campo (Carballo, Hermoso, & Díaz, 2009, Esteban, Argüelles, Arriaga, Iñiguez, & Bobadilla, 2007).

Un ejemplo de ello es la investigación elaborada por Acuña, Díez, y Casado (2006), en la que evalúan la calidad de la madera estructural de *Pinus pinaster* Ait a través del ultrasonido, con la premisa de que los estudios que se han realizado trabajan con probetas pequeñas, lo que impide su extrapolación hacia piezas de tamaño estructural.

Íñiguez, Arriaga, Esteban, y Argüelles (2007), mencionan que las primeras citas sobre END diferentes a la clasificación visual parten de los años 50's. Estos mismos afirman que todo ensayo no destructivo depende del registro de un parámetro físico para poder estimar uno mecánico.

Existe una recopilación que contiene la descripción, ventajas y desventajas de algunas investigaciones que usan END y que se estudian en el mismo país, mencionando además los posibles retos a futuro. Ésta fue presentada en el "II Taller Latinoamericano de técnicas no destructivas para productos de madera"; celebrado en Costa Rica del 2 al 4 de diciembre del 2008 (Carballo et al., 2009).

La utilidad de estos ensayos en madera es amplia. En un estudio combinan 6 diferentes END para analizar piezas estructurales en la Plaza Mayor de Chinchón, en Madrid, concluyendo que para tener un mejor diagnóstico se debe utilizar una combinación éstos (Basterra, Acuña, Casado, Ramón, & López, 2009).

Brasil es otro país en el que se han realizado este tipo de ensayos, ejemplo de ello es un estudio sobre la comparación del MOE y Módulo de ruptura (MOR) de la madera de *Goupia glabra* evaluados por el método de vibraciones transversales y el de ultrasonido, comparando los resultados y concluyendo la viabilidad de ambos (Sales, Candian, & Cardin, 2011)

También se realizó una investigación para desarrollar un microcontrolador de las ondas ultrasónicas emitidas a través de transductores durante la evaluación de piezas de madera de Pino, con la finalidad de controlar la transmisión de las ondas y evaluarlas su punto más significativo, teniendo una mayor confianza en los resultados y destacando la factibilidad del método (Domingosa, Maia, Maia, & Schneidera, 2015).

En este mismo se valoraron las propiedades de resistencia y rigidez de una especie de Bambú (*Bambusa vulgaris*) por medio de un END evaluando las ondas ultrasónicas con ayuda del software Stimer Wave Timer y concluyendo que el método es confiable a pesar de no ser madera sólida (Sá Ribeiro, Sá Ribeiro, & Miranda, 2017)

Otra investigación llevada a cabo en Argentina, estimó el MOE dinámico en vigas de álamo, a través de dos END, el primero basándose en el ultrasonido y el segundo en frecuencias de vibración, concluyendo que con el primer método los resultados aparentaron una sobrestimación en comparación con los resultados del segundo (Andreini, Quiroga, & Rabolini, 2013).

En el mismo año, en Chile se realizó una estimación de los MOE y MOR para 6 especies de madera nativas, 4 latifoliadas y 2 coníferas, por medio de pruebas de ultrasonido con 2 equipos diferentes, teniendo como resultado que los módulos obtenidos con el ultrasonido sobreestiman a los obtenidos por la máquina universal en casi un 50% a los de latifoliadas y en un 30% a los de coníferas (Baradit, Niemz, & Fernández, 2013).

Por otra parte, Ross (2015), realizó una descripción detallada de los principales END para madera que se han publicado en revistas científicas, simposios, notas técnicas, etc., con el fin de servir como referencia sobre estos para futuras investigaciones y homogeneizar así los procedimientos.

En Japón se analizó la utilidad de un END sin contacto para la estimación del MOE y el MOR que se desarrolla por medio de ondas ultrasónicas acopladas al aire, midiendo la velocidad con un receptor de pulso ultrasónico, un preamplificador y unos transductores y sugiriendo como conclusión la posibilidad de usar éste para predecir los valores anteriores (Mori, Hasegawa, Yoo, Kang, & Matsumura, 2016).

Otro estudio llevado a cabo en India, describió el uso de la técnica de dispersión de Compton (CST) que consiste en dispersar y transmitir rayos gamma a través de muestras de madera para estimar su densidad. Su conclusión fue que la técnica es más confiable y menos destructiva que el método que relaciona el peso y volumen,

especialmente en maderas de baja densidad (Tondona, Singhb, Sandhua, & Singha, 2017).

Otro que también hace uso de un END diferente a los anteriores es el que se basa en pruebas de sismología para estudiar el efecto de la anisotropía de las trozas de madera por medio de la velocidad de la onda dibujada de un extremo a otro, con la finalidad de evaluar su calidad antes de ser utilizada. Dicha investigación se realizó en Colombia por los investigadores Espinosa, Prieto, Brancheriau, y Lasaygues (2018).

China también ha realizado estudios sobre los END tanto en laboratorio como en estructuras en pie, por ejempló, evaluó la calidad de la madera de tableros de partículas de densidad media (MDF), por medio del método de vibraciones transversales, mostrando la utilidad de éste a pesar de no ser usado en madera sólida (Guan, Liu, Zhang, Wang, & Zhou, 2019).

En ese año, Jiao, Xia, y Shi (2019), valoraron la calidad de la estructura de madera y ladrillo de la construcción Brick timber ubicada en Anyuan Miners Club por medio de un conjunto de END principalmente visuales para detectar el nivel de deterioro, descomposición o putrefacción de las vigas y columnas, también calculó el contenido de humedad y la capacidad de carga, y tomaron pequeñas muestras para analizarlas en un microscopio e identificar a las especies.

2.3 Los ensayos no destructivos en México

La tendencia en México al igual que en otros países es utilizar los END para la estimación de las características tecnológicas de especies maderables. Sin embargo, sigue siendo un campo no explorado por completo. Algunos estudios han utilizado modelos de estimación de las propiedades mecánicas, mientras que otros si han realizado experimentos con equipos en piezas de madera.

El modelo de Brown et al. (1952), ha sido empleado en investigaciones que describen dichas características, en especies como *Dendropanax arboreus* (L.) Planch & Decne y *Hymenaea oblongifolia*, obteniendo parámetros del módulo de elasticidad, flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra y la

dureza, usando a la densidad básica y normal como parámetro físico (Martínez, Borja, & Ávalos, 2001, Serna, Borja, Fuentes, & Corona, 2011).

Uno de los investigadores que más ha experimentado en el área de los END es Javier Sotomayor Castellanos quien en el 2003 realizó una clasificación de 100 especies maderables mexicanas a través de la recopilación en la literatura de datos sobre la densidad básica y las propiedades mecánicas, además estableció coeficientes para la predicción de éstas con apoyo de la densidad básica.

En el 2007 estimó por medio del método de vibraciones transversales y del de ultrasonido, el MOE de la madera de *Pinus douglasiana* proveniente del estado de Michoacán, México, para a su vez valorar el MOR y la resistencia al límite elástico debido a que éstos solo se pueden calcular con ensayos destructivos, concluyendo como factible dicha valoración.

Para el año 2010 elaboró una base de datos sobre las características acústicas de 152 especies maderables con parámetros como la densidad, velocidad de ultrasonido, módulo de elasticidad, factor de calidad e índice material, a través de la velocidad obtenida por el método de ultrasonido y utilizando tabletas de la colección de la xiloteca de su facultad.

Hacia el 2011 caracterizó a la madera de *Abies sp.* por medio de dos END, el de vibraciones trasversales y el de ondas de ultrasonido, con parámetros físicos como densidad y contenido de humedad calculados a partir de probetas complementarias para evitar daños a las de estudio, concluyendo la posibilidad de usar estos END en la caracterización tecnológica de la especie y su uso para la elaboración de guitarras.

Durante el 2018 estudió las características dinámicas de 22 especies maderables, empleando el método de vibraciones transversales para justificar la utilidad de éstas en el área de la construcción con madera, ya que en México este material no suele ser usado. Empleó probetas de dimensiones 0.05 x 0.05 m y 0.4 x 0.5 m y la densidad en equilibrio la calculó al momento de realizar los ensayos.

En ese mismo año, determinó la densidad y el módulo dinámico de 3 especies endémicas de México y Centro América, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Juglans pyriformis* Liebm de madera sólida y laminada, con el mismo ensayo.

Actualmente, en el 2019, comprobó la frecuencia natural de la onda en barras de madera de 12 especies endémicas de México, por medio del Método del Elemento Finito (MEF) encontrando que las magnitudes obtenidas por éste no tienen diferencias significativas con las experimentales (Sotomayor & Bocanegra, 2011, Sotomayor & López, 2019, Sotomayor, 2018, Sotomayor, Guridi, & García, 2010, Sotomayor et al. 2003, Sotomayor, Villaseñor, & Aoi, 2007).

CAPÍTULO 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149 ESPECIES CON VALOR INDUSTRIAL, POR MEDIO DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.

Propiedades mecánicas de 149 especies maderables con valor industrial por métodos no destructivos.

Resumen

El estudio de las propiedades mecánicas de las especies maderables ha evolucionado a través de los años de acuerdo a la demanda de la industria. Una forma de realizar estos estudios es a través de ensayos no destructivos, que suelen ser más económicos y fáciles de realizar. Dentro de éstos los modelos de regresión para la estimación de las propiedades mecánicas son empleados en investigaciones en las que el material es insuficiente para realizar las pruebas destructivas. Los modelos más utilizados son el de Brown et al. (1952) y el de Sotomayor et al. (2003). Ambas metodologías se estiman un conjunto de variables que describen las propiedades mecánicas de la madera utilizando únicamente la densidad. Sin embargo, entre ambos métodos hay una diferencia de 50 años y además en la de Brown et al (1952) se recopila información de especies europeas mientras que en la de Sotomayor et al. (2003) se recopila información de 149 especies de madera mexicanas. Por tanto el objetivo del estudio ha sido comparar los modelos de regresión estimando las propiedades mecánicas de 149 especies mexicanas a partir de la densidad básica calculada experimentalmente. Los resultados fueron comparados a partir de una prueba t para medias pareadas con la que se demostró que existe diferencia significativa entre los modelos de regresión de los autores, sin embargo también se realizó un análisis de clustering jerárquico con este se agruparon a las

especies igual con ambos modelos a partir de su densidad básica y de sus propiedades mecánicas.

Palabras clave: Propiedades mecánicas, modelo de regresión, diagrama de Cluster.

Abstrac

The study of the mechanical properties of timber species has evolved over the years according to the demand of the industry. One way to carry out these studies is through non-destructive tests, which are usually cheaper and easier to perform. Within these, the regression models for estimating mechanical properties are used in investigations in which the material is insufficient to perform destructive tests. The most commonly used models are Brown et al. (1952) and that of Sotomayor et al. (2003). Both methodologies are estimated a set of variables that describe the mechanical properties of wood using only density. However, between the two methods there is a difference of 50 years and in addition to that of Brown et al (1952), information of European species is collected while in that of Sotomayor et al. (2003) information is collected from 100 Mexican wood species. Therefore, the objective of the study has been to compare the two regression models estimating the mechanical properties of 149 Mexican species from the experimentally calculated basic density. The results were compared from a hierarchical clustering with which it was determined that both models are functional for the estimation of the mechanical properties of Mexican species. The results were compared from a t-test for paired means with which it was shown that there is a significant difference between the regression models of the authors, however a hierarchical clustering analysis was also performed with the species were grouped equally with both models based on their basic density and their mechanical properties.

Keywords: Mechanical properties, regression model, Cluster diagram.

Introducción

La industria de los productos forestales necesita información constante y actualizada sobre las propiedades tecnológicas de las maderas con el fin de ser aprovechadas de manera adecuada (Labonnote, Ronnquist, & Malo, 2015 y Sotomayor, 2018). Esto se debe a que, en general, para asignar un uso adecuado a una especie de madera es importante identificarla y por consiguiente a sus propiedades (Saporiti, Pereira & Quilhó, 2019).

La tendencia sobre la identificación de estas propiedades es la evaluación no destructiva (END) que de acuerdo con Ross (2015) se describe como “...*la ciencia de identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar sus capacidades de uso final y luego usar esta información para tomar decisiones con respecto a las aplicaciones apropiadas.*”

Investigadores del mundo han probado con éxito diferentes END en madera: vigas, tabletas, madera estructural, árboles en pie, tableros de partículas, entre otros, para obtener información sobre las propiedades mecánicas de las maderas a través de la relación con un parámetro físico que usualmente es la densidad (Fang, Lin, Feng, Lu, & Emmisc, 2017 y Tondon, Singhb, Sandhua, & Singha, 2017).

Es importante reconocer que los modelos de regresión para la estimación de las propiedades mecánicas son adaptables a especies con características particulares a las condiciones de un lugar, por ello es necesario conocer cuál de ellos se adapta mejor a las características de especies mexicanas. Una forma de saberlo es a través de la técnica estadística conocida como “agrupación jerárquica o análisis de Cluster” que junta a las variables (en este caso especies)

de acuerdo a sus propiedades, buscando la máxima homogeneidad dentro de un Cluster y a su vez la máxima heterogeneidad entre éstos (De la Fuente, 2011).

Particularmente Brown, Panshin, y Forsaith (1952) y Sotomayor, Herrera, y Cruz (2003) estimaron las propiedades mecánicas de especies por medio de un modelo de regresión que hace uso de la densidad básica de éstas, sin embargo entre ambos hay una diferencia de 50 años, además el modelo de Brown et al. (1952) fue hecho con información de especies europeas mientras que el de Sotomayor et al. (2003) lo hizo con información bibliográfica de especies mexicanas, lo que puede generar diferencias entre ambos.

Objetivo

Estimar las propiedades mecánicas de 149 especies forestales con valor comercial e industrial por medio de los modelo de regresión propuestos por Brown et al. (1952) y Sotomayor et al. (2003), considerando la densidad básica determinada experimentalmente de cada una de las especies, con el fin de realizar una comparación de ambos métodos, además de recopilar información sobre sus propiedades mecánicas para elegir de mejor forma los usos que se les puedan dar a través de una propuesta de clasificación de las mismas.

Materiales y métodos

De la colección de la Xiloteca “Juana Huerta Crespo” del Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la División de Ciencias Forestales se seleccionaron 149 tabletas de diferentes especies, de dimensiones 0.13 x 0.7 x 0.01 m de largo, ancho y grueso aproximadamente a un contenido de humedad del 14%. Se separaron en 3 grupos, uno de Latifoliadas con 111 especies, otro de Coníferas con 24 y el último del género *Quercus* con

14 especies, éstos últimos se separaron del grupo de latifoliadas debido a su relevancia en la industria forestal.

De cada una de las tabletas se obtuvieron 5 probetas de 0.01 m^3 , las cuales fueron numeradas del 1 al 5 y se colocaron en bolsas de malla por especie. Las bolsas se introdujeron en grupos de 5, durante un periodo de 4 a 7 días a un desecador de vacío de la marca GLASWERX WETHEM para hacer llegar a las probetas a una condición de saturación. Transcurrido dicho periodo se sacaron de las bolsas y se registró su peso en una balanza digital de la marca OHAUS tipo SCOUT PRO con precisión de 0.01 g y su volumen se obtuvo con el método de desplazamiento de agua. Después se colocaron en rejillas y se dejaron reposar por un periodo de 4 a 7 días en condiciones ambientales hasta que llegaron a una condición en equilibrio con el medio ambiente, durante ese tiempo se monitorearon diariamente midiendo el peso de las probetas, cuando éste ya no cambió, se registró su peso y su volumen. Finalmente se depositaron en una estufa de secado a una temperatura de $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. El procedimiento de monitoreo y de registro de peso y volumen fue similar al anterior.

La densidad básica es aquella que relaciona el peso anhidro con el volumen verde y se calculó de acuerdo a la fórmula (International Organization for Standardization [ISO], 2014):

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

en donde:

Db = Densidad básica (gcm^{-3})

Po = Peso anhidro (g)

$V_v =$ Volumen verde (cm^{-3})

Similarmente, se define la densidad en equilibrio como aquella que relaciona el peso con el volumen en condición de equilibrio con el medio ambiente y se calculó de acuerdo a la fórmula (International Organization for Standardization [ISO], 2014):

$$De = \frac{Pe}{Ve}$$

en donde:

$De =$ Densidad en equilibrio (gcm^{-3})

$Pe =$ Peso en equilibrio (g)

$Ve =$ Volumen en equilibrio (cm^{-3})

La densidad normal relaciona el peso con el volumen a un 12% de contenido de humedad, se calculó de acuerdo a la fórmula (International Organization for Standardization [ISO], 2014):

$$Dn = \frac{Pn}{Vn}$$

en donde:

$Dn =$ Densidad normal (gcm^{-3})

$Pn =$ Peso al 12% de contenido de humedad (g)

$Vn =$ Volumen al 12% de contenido de humedad (cm^{-3})

En este caso para obtener la densidad normal primero se calculó el incremento de 1% de contenido de humedad para cada especie, debido a que el registrado en la xiloteca es de 14%, la fórmula empleada para ello fue la siguiente (Serna, Borja, Fuentes, & Corona, 2011):

$$\Delta P1\% = \frac{P_{14\%} - P_o}{14}$$

$\Delta P1\%$ = Incremento de volumen

$P14\%$ = Volumen al 14% de contenido de humedad (cm⁻³)

P_o = Volumen anhidro (cm⁻³)

Con el incremento en 1% de contenido de humedad se calcularon peso y volumen del 12% de contenido de humedad de todas las especies con la fórmula (Serna et al., 2009):

$$\Delta P_{12} = P_o + 12(\Delta P1\%)$$

$$\Delta V_{12} = V_o + 12(\Delta V1\%)$$

Con las densidades obtenidas, las propiedades mecánicas fueron estimadas por medio de las regresiones de la tabla 1 de Brown et al. (1952) y las de Sotomayor et al. (2003) de la tabla 2.

Tabla 1: Ecuaciones para la estimación de las propiedades mecánicas por Brown et al. (1952).

Características	Madera verde	Madera al 12% de CH
1._ Flexión estática (kgcm⁻²)		
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	717.13Db ^{1.25}	1174.13Dn ^{1.25}
Módulo de ruptura	1237.40Db ^{1.25}	1806.89Dn ^{1.25}
Módulo de elasticidad x 1000	162.92Db	196.86Dn
2._ Impacto (cm)	289.56Db ^{1.75}	240.284Dn ^{1.75}
3._ Compresión paralela a la fibra (kgcm⁻²)		
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	369.11Db	615.18Dn
Esfuerzo máximo	473.16Db	857.74Dn
Módulo de elasticidad x 1000	204.59Db	237.64Dn
4._ Compresión perpendicular a la fibra (kgcm⁻²)		
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	210.92Db ^{2.25}	2325.52Dn ^{2.25}
5._ Dureza (kg)		
Lateral	1696.43Db ^{2.25}	2177.24Dn ^{2.25}
Extrema	1551.28Db ^{2.25}	1710.04Dn ^{2.25}

Fuente: elaboración propia a partir de Brown et al. (1952).

Tabla 2: Coeficientes para la estimación de las propiedades mecánicas por Sotomayor et al. (2003).

Características	A	r
1._ Flexión estática (kgcm⁻²)		
Módulo de elasticidad	191045Db ^{1.02}	0.86
Resistencia al límite elástico	792 Db ^{1.18}	0.79
Resistencia a la ruptura	1507Db ^{1.27}	0.88
2._ Compresión paralela (kgcm⁻²)		
Módulo de elasticidad	209127Db ^{1.14}	0.79
Resistencia al límite elástico	460Db ^{1.27}	0.85
Resistencia a la ruptura	696Db ^{1.36}	0.85
3._ Compresión perpendicular (kgcm⁻²)		
Resistencia al límite elástico	762Db ^{1.48}	0.87
4._ Cortante paralela (kgcm⁻²)		
Resistencia a la ruptura	802Db ^{1.92}	0.78
5._ Dureza Janka (kg)		
Cara lateral	1248Db ^{1.92}	0.93
Cara transversal	1225Db ^{1.76}	0.94

Fuente: elaboración propia a partir de Sotomayor et al. (2003).

Para la estimación de las propiedades mecánicas se utilizó a la Db en gcm⁻³ y después se obtuvo su estadística de resumen. Algunas propiedades se compararon a través de una prueba t para muestras pareadas, para comprobar si existe diferencia significativa entre ambas estimaciones. También se comprobó la similitud de ambas estimaciones a través de un análisis jerárquico. Dicho análisis sirvió para determinar si con ambas estimaciones se podía lograr el mismo agrupamiento de las maderas bajo estudio. Además con dicho agrupamiento se propuso una clasificación para maderas mexicanas de acuerdo a sus capacidades mecánicas. Tanto las gráficas, el análisis estadístico, las pruebas para comparar las estimaciones y el análisis jerárquico se realizó con el software estadístico R versión 3.6.1 (R core team 2019)

Resultados

La figura 1 representa las gráficas de cajas de los tres tipos de densidad para los tres grupo de maderas. La distribución de los datos del grupo de latifoliadas en las tres densidades se

observa como normal, la mediana pasa por la mitad de la caja formada por el primer y el tercer cuartil y los bigotes son del mismo tamaño a los extremos de la misma, la media se dibuja como un asterisco y se ubica cercana a la mediana y abarca un rango amplio de valores. El grupo de coníferas bajo estudio tiene las densidades más pequeñas, mientras que el grupo de Encinos estudiados tiene las más altas. El comportamiento de las densidades está relacionado con el contenido de humedad, por ello la De y Dn son más cercanas entre sí.

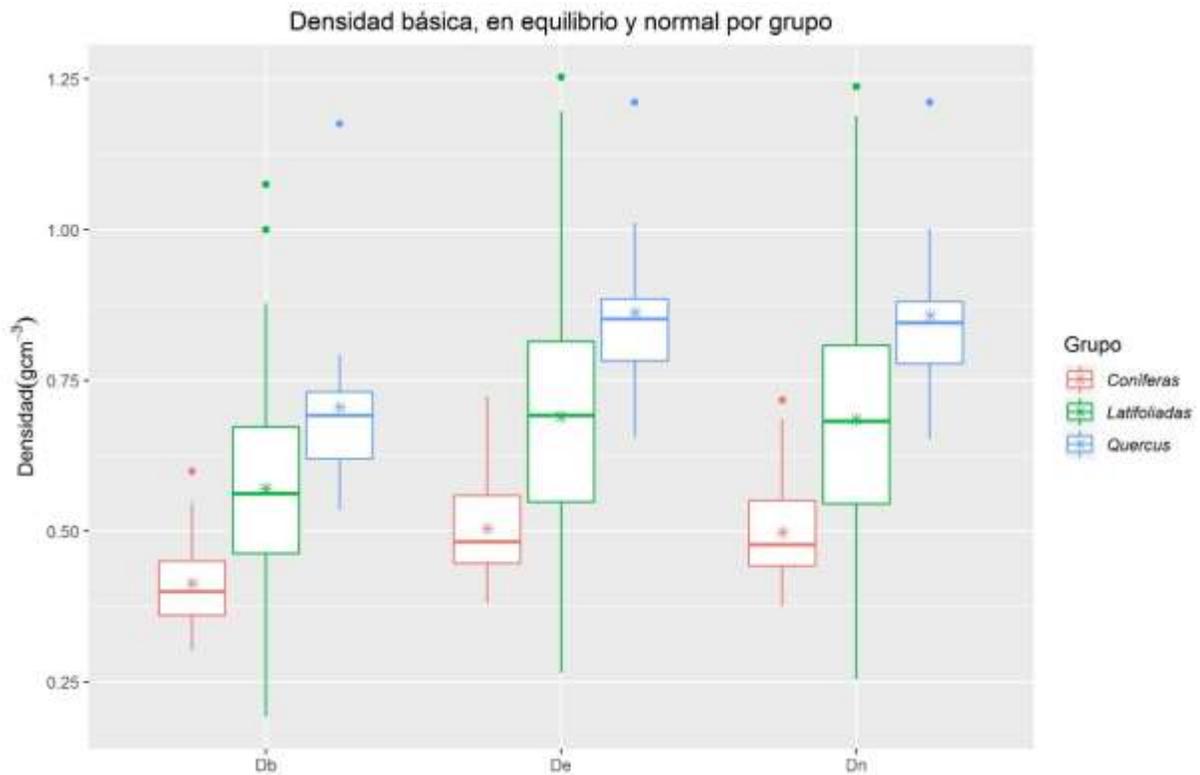


Figura 1: Gráfica de cajas de la Db, De y Dn para los tres grupos de especies. Fuente: elaboración propia.

La media de la Db del grupo de latifoliadas es de 0.570 gcm^{-3} , que de acuerdo a Fuentes (1998) se clasifica como alto, es decir, que son maderas altamente resistentes, para las otras dos densidades, en equilibrio y normal la media es de 0.690 gcm^{-3} . Las tres cajas muestran

valores atípicos representados como puntos que sobresalen por arriba del largo de los bigotes, éstos se refieren a las especies de *Tabebuia guayacan* (Seem.) Hemsl. Con una cantidad mayor de 0.505 gcm^{-3} y *Brya ebenae* de 0.430 gcm^{-3} respecto a la media de la densidad básica.

Para el grupo de coníferas la distribución de los datos está ligeramente sesgada a la izquierda. El valor medio de la Db es de 0.410 gcm^{-3} y de acuerdo con Fuentes (1998) se clasifica como medio y se refiere a que son maderas medianamente resistentes, para la De y la Dn la media es de 0.500 gcm^{-3} . El valor atípico que se dibuja en las tres cajas se refiere a la especie de *Pinus monophylla* Torr. & Frém. que es 0.189 gcm^{-3} mayor que la media de la Db y es por este valor que la mediana se desplaza del centro hacía la izquierda.

Del grupo de especies pertenecientes al género *Quercus* la distribución de los datos está sesgada a la derecha. La media de la Db es de 0.710 gcm^{-3} , clasificándola como de muy alta resistencia de acuerdo a Fuentes (1998). El valor de la media de De y la Dn es 0.860 gcm^{-3} . Las especies de *Quercus obtusata* Humb. & Bonpl. (1809) y *Quercus magnoliaefolia* Née son las que representan los valores atípicos en las cajas, la primera es 0.465 gcm^{-3} mayor al valor medio de la Db y la segunda es 0.082 gcm^{-3} mayor. Los valores de los tres tipos de densidad de las 149 especies se muestran en el anexo 1.

Una vez que se determinaron las densidades, se estimaron las propiedades mecánicas de las maderas bajo estudio. En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de las propiedades mecánicas estimadas por medio de las ecuaciones de regresión de Brown et al. (1952). El valor promedio del módulo de elasticidad en flexión estática (MOE_FLEX) del grupo de coníferas es de $66,960.000 \text{ kgcm}^{-2}$ y se clasifica como “bajo”, el del grupo de latifoliadas es

de 93,260.000 kgcm⁻² y el del grupo *Quercus* es de 114,910.000 kgcm⁻², los cuales se clasifican como “medio” de acuerdo con Sotomayor et al. (2003).

El valor promedio del módulo de elasticidad de la compresión paralela a la fibra (MOE_COMP) del grupo de latifoliadas es de 117,120.000 kgcm⁻² y se clasifica como “medio”, del grupo de coníferas es de 84,090.000 kgcm⁻² y se clasifica como “bajo” y del género *Quercus* es de 144,300.000 kgcm⁻² y se clasifica como “medio” de acuerdo a Sotomayor et al. (2003).

Por último, el valor de la dureza Janka lateral (JK_LATE) para el grupo de latifoliadas es de 513.940 kg, para el grupo de coníferas es de 240 kg y para el grupo del género *Quercus* es de 822.300 kg, y respecto a Sotomayor et al. (2003) se clasifican como “medio”, “bajo” y “muy alto” respectivamente. La clasificación se realizó de acuerdo con dichos autores debido a que no se encontró una de Brown et al. (1952) y solo se consideraron las propiedades anteriores porque son en las que coinciden ambos autores. Los valores de las propiedades mecánicas de las 149 especies se describen en el anexo 2.

Tabla 3: Resumen de las propiedades mecánicas estimadas a partir de Brown et al. (1952).

Propiedad	Grupo	Mínima	Primer cuartil	Mediana	Media	Tercer cuartil	Máxima
1. Flexión estática (kgcm⁻²)							
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	Latifoliadas	90.860	275.860	349.010	361.050	437.020	785.120
	Coníferas	160.200	198.900	221.800	237.200	262.400	378.000
	Género <i>Quercus</i>	328.200	394.200	452.800	466.400	484.500	877.400
Módulo de ruptura	Latifoliadas	156.800	476.000	602.200	623.000	754.100	1354.700
	Coníferas	276.500	343.100	382.700	409.200	452.800	652.200
	Género <i>Quercus</i>	566.400	680.200	781.200	804.800	835.900	1513.900
Módulo de elasticidad	Latifoliadas	31200.000	75870.000	91570.000	93260.000	109620.000	175160.000

	Coníferas	49130.00	58390.000	63710.00	66960.00	72890.000	97600.00
	Género <i>Quercus</i>	87180.00	100930.00	112770.000	114910.000	119040.00	191440.000
2. Impacto (cm)	Latifoliadas	16.060	76.010	105.650	114.160	144.750	328.710
	Coníferas	35.530	48.070	56.010	62.380	70.870	118.120
	Género <i>Quercus</i>	96.950	125.300	152.100	161.550	167.230	384.020
3. Compresión paralela a la fibra (kgcm⁻²)							
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	Latifoliadas	70.690	171.880	207.470	211.290	248.360	396.850
	Coníferas	111.300	132.200	144.300	151.700	165.100	221.100
	Género <i>Quercus</i>	197.500	228.700	255.500	260.300	269.700	433.700
Esfuerzo máximo	Latifoliadas	90.620	220.330	265.950	270.850	318.370	508.720
	Coníferas	142.700	169.600	185.000	194.500	211.700	283.500
	Género <i>Quercus</i>	253.200	293.100	327.500	333.700	345.700	556.000
Módulo de elasticidad	Latifoliadas	39180.00	95270.000	115000.000	117120.000	137660.00	219970.000
	Coníferas	61690.00	73320.000	80000.000	84090.000	91530.000	122560.000
	Género <i>Quercus</i>	109500.000	126800.00	141600.000	144300.000	149500.00	240400.000
4. Compresión perpendicular a la fibra (kgcm⁻²)							
Esfuerzo al límite de proporcionalidad	Latifoliadas	5.118	37.783	57.698	66.138	86.486	248.270
	Coníferas	14.210	20.960	25.520	29.850	34.530	66.590
	Género <i>Quercus</i>	51.660	71.860	92.180	102.240	104.150	303.230
5. Dureza (kg)							
Lateral	Latifoliadas	41.170	303.890	464.060	531.940	695.610	1996.840
	Coníferas	114.300	168.600	205.300	240.100	277.700	535.600
	Género <i>Quercus</i>	415.500	577.900	741.400	822.300	837.600	2438.900
Extrema	Latifoliadas	37.640	277.890	424.360	486.430	636.090	1825.980
	Coníferas	104.500	154.200	187.700	219.500	254.000	489.800
	Género <i>Quercus</i>	380.000	528.500	678.000	752.000	766.000	2230.200

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 1.

La tabla 4 muestra la estadística de resumen de las propiedades mecánicas estimadas con los modelos de regresión de Sotomayor et al. (2003). La clasificación utilizada es la propuesta por los autores anteriores. El valor promedio MOE_FLEX es de 108,227 kgcm⁻² para latifoliadas y se clasifica como “medio”, para las coníferas es de 77,160 kgcm⁻² y se clasifica como “bajo” y para el género *Quercus* es de 133,868 kgcm⁻² clasificándose como “alto”.

Para el MOE_COMP el valor del módulo de elasticidad para el grupo de latifoliadas es de 111,350 kgcm⁻² y se clasifica como “medio”, el valor del grupo de coníferas es de 76,081 kgcm⁻² y se clasifica como “bajo” y del grupo de *Quercus* es de 140,912 kgcm⁻² que se clasifica como “alto”.

Respecto a la JK_LATE, el valor promedio del grupo de latifoliadas es de 450.210 kg y que se clasifica como “medio”, para el grupo de coníferas es de “228.900 kg y se clasifica como “bajo” y del grupo del género *Quercus* es de “659.000 kg que se clasifica como “alto”. Los valores de las 149 especies se describen en el anexo 3.

Tabla 4: Resumen de las propiedades mecánicas estimadas a partir de Sotomayor et al. (2003).

Propiedad	Grupo	Mínima	Primer cuartil	Mediana	Media	Tercer cuartil	Máxima
1._ Flexión Estática (kgcm⁻²)							
Módulo de Elasticidad	Latifoliadas	35400.000	87614.000	106152.000	108227.000	127532.000	205700.000
	Coníferas	56241.000	67077.000	73315.000	77160.000	84109.000	113282.000
	Género <i>Quercus</i>	100965.000	117232.000	131269.000	133868.000	138715.000	225219.000
Resistencia al Límite Elástico	Latifoliadas	112.700	321.400	401.300	413.200	496.200	862.700
	Coníferas	192.500	236.000	261.600	278.300	306.600	432.700
	Género <i>Quercus</i>	378.700	450.200	513.100	526.800	546.900	958.100
Resistencia a la Ruptura	Latifoliadas	184.700	570.900	725.000	751.100	911.100	1652.300
	Coníferas	328.700	409.400	457.400	489.800	542.600	786.200

	Género <i>Quercus</i>	681.200	820.500	944.500	974.000	1011.700	1849.70 0
2._ Compresión Paralela (kgcm⁻²)							
Módulo de Elasticidad	Latifoliadas	31779.000	87502.000	108437.000	111350.000	133120.000	227136.000
	Coníferas	53315.000	64919.000	71705.000	76081.000	83599.000	116609.000
	Género <i>Quercus</i>	102533.000	121165.000	137487.000	140912.000	146235.000	251355.000
Resistencia al Límite Elástico	Latifoliadas	56.390	174.270	221.310	229.270	278.110	504.340
	Coníferas	100.300	125.000	139.600	149.500	165.600	240.000
	Género <i>Quercus</i>	207.900	250.400	288.300	297.300	308.800	564.600
Resistencia a la Ruptura	Latifoliadas	73.520	246.150	317.930	331.600	406.060	768.080
	Coníferas	136.300	172.400	194.100	209.300	233.100	346.700
	Género <i>Quercus</i>	297.400	363.000	422.000	437.200	454.200	866.800
3._ Compresión Perpendicular (kgcm⁻²)							
Resistencia al Límite Elástico	Latifoliadas	66.010	245.870	324.830	342.140	423.920	848.260
	Coníferas	129.200	166.900	189.900	206.700	231.700	357.000
	Género <i>Quercus</i>	302.100	375.200	442.100	461.200	479.000	967.500
4._ Cortante Paralela (kgcm⁻²)							
Resistencia a la Ruptura	Latifoliadas	33.580	184.880	265.330	292.000	374.790	921.710
	Coníferas	80.260	111.820	132.260	149.630	171.210	299.870
	Género <i>Quercus</i>	241.500	319.900	395.700	425.900	439.100	1093.20 0
5._ Dureza Janka (kg)							
Cara Lateral	Latifoliadas	50.550	283.330	408.150	450.210	578.610	1436.37 0
	Coníferas	121.900	170.500	202.000	228.900	262.200	461.900
	Género <i>Quercus</i>	371.100	493.100	611.300	659.000	679.100	1706.70 0
Cara Transversal	Latifoliadas	66.810	319.120	444.400	480.670	609.930	1391.63 0
	Coníferas	148.500	201.300	234.700	261.700	297.400	497.200
	Género <i>Quercus</i>	407.600	527.600	641.100	681.400	705.300	1627.30 0

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 2.

Por otro lado, utilizando las mismas propiedades mecánicas comparables, se realizó la prueba t para muestras pareadas para cada una de ellas. En los tres casos la prueba indica que hay diferencia significativa entre las estimaciones de Brown et al. (1952) y las de Sotomayor et al. (2003). El resultado de las pruebas se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Estadística de resumen de las pruebas t para muestras pareadas de las tres propiedades mecánicas comparables.

Propiedad mecánica	Estadístico t	P valor	Media de la diferencia entre pares	Intervalo de confianza de la media (95%)
MOE_FLEX	36.876	-2.2E-16	14,572.690	[13791.760, 15353.610]
MOE_CP	-24.902	-2.2E-16	-5,902.946	[-6371.387, -5434.505]
DUREZA_JK	-9.525	-2.2E-16	-78.029	[-94.217, -61.841]

Fuente: elaboración propia.

Dado que los valores de las propiedades mecánicas de ambos autores resultaron diferentes, se buscó averiguar la similitud entre ambas estimaciones. Para ello se utilizó la técnica de análisis jerárquico, en la que agruparon a las maderas de acuerdo a su similitud en la densidad básica y en cada una de las propiedades mecánicas estimadas con la regresión de Brown et al. (1952) y de manera similar para las estimaciones de Sotomayor et al. (2003). El resultado se visualizó a través de dos dendogramas que se muestran en las figuras 7 y 8 respectivamente. Se observa que en ambos casos las muestras de maderas se pueden dividir en cinco Clusters, siendo los rojos los más nutridos, es decir que son muchas las maderas cuyo comportamiento mecánico es similar. El Cluster con menos elementos en ambos dendogramas es el verde con sólo tres maderas que son las que tienen una mayor densidad y por ende valores de propiedades mecánicas más altos.

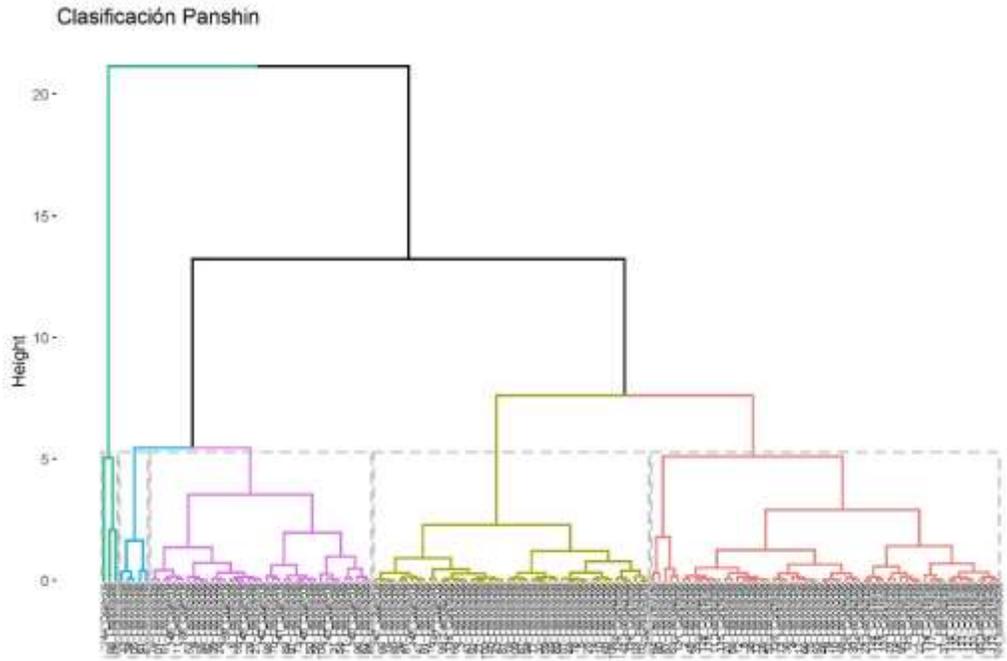


Figura 7: Agrupación a través de un análisis jerárquico de las muestras de madera de acuerdo a su densidad básica y a las propiedades mecánicas estimadas de acuerdo a Brown et al. (1952). Fuente: elaboración propia.

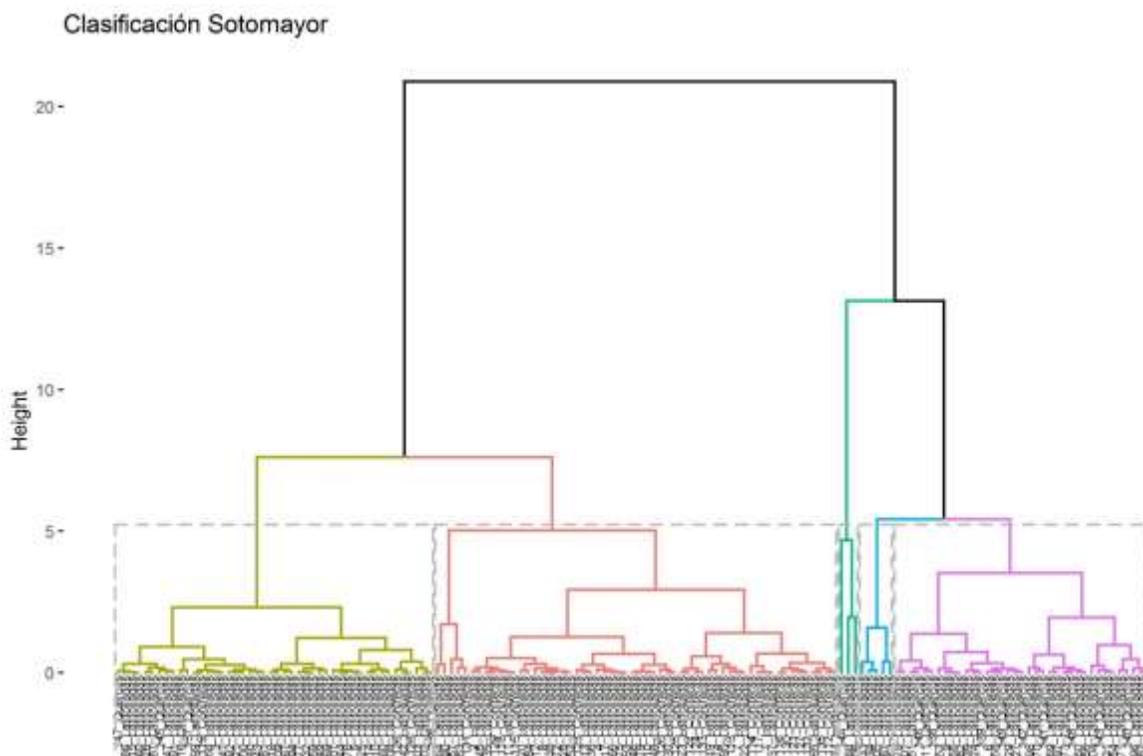


Figura 8: Agrupación a través de un análisis jerárquico de las muestras de madera de acuerdo a su densidad básica y a las propiedades mecánicas estimadas de acuerdo a Sotomayor et al. (2003).

Fuente: elaboración propia.

Discusión

En general, las tres densidades de las coníferas son menores a las de las latifoliadas y las de los encinos. Para el caso de la densidad básica del género *Quercus*, el único valor que sale del comportamiento normal de la muestra es el del *Quercus obtusata* Humb. & Bonpl. (1809) cuyo valor fue 1.175 gcm^{-3} mientras que Quintanar (2002) reportó para la misma un valor de 0.91 gcm^{-3} , y Sotomayor et al. (2003) reportó 0.76 gcm^{-3} . Por lo tanto este valor debe tomarse con cautela. Similarmente, en el caso de las densidades de las coníferas se cuenta con un valor que puede ser considerado atípico y corresponde al *Pinus monophylla* Torr. & Frém; ya que en este estudio fue de 0.59 gcm^{-3} según Milles y Smith (2009) menciona para esta

especie 0.43gcm^{-3} ; en el caso de las latifoliadas se presentan dos especies: *Tabebuia guayacan* (Seem.) Hemsl., con una densidad básica de 1.1gcm^{-3} , Osazuwa-Peters, Wright y Zanne (2014) reportaron 0.88gcm^{-3} y para *Brya ebenae*. Se determinó una densidad básica de 1.00gcm^{-3} y Krebs, (1968) encontró $1.00-1-20\text{gcm}^{-3}$. Dado que las propiedades mecánicas se estiman a partir de la densidad es de esperarse comportamientos similares en cuanto a la distribución de las propiedades mecánicas de las especies maderables. Por otro lado, las propiedades mecánicas que se pudieron comparar para ambas regresiones fueron el MOE_FLEX, MOE_COMP y JK_LATE, encontrando que hay diferencia significativa entre ambas estimaciones.

Lo anterior podría influir sobre la clasificación de las propiedades mecánicas que difiere entre Brown et al. (1952) y Sotomayor et al. (2003) a pesar de que se utilizaron los mismos valores de densidad básica para ambos. Sin embargo, los valores comparables clasifican similar con la clasificación de Sotomayor et al. (2003), para MOE_FLEX el valor promedio del grupo de latifoliadas para ambos autores clasifica dentro del rango de “medio”, el de coníferas es de “bajo” y el de *Quercus* de “alto”. Los valores promedio del MOE_COMP difieren únicamente en el grupo de *Quercus* pues el valor para la estimación con Brown et al. (1952) es de “medio” mientras que el valor para Sotomayor et al. (2003) es “alto”. Lo mismo sucedió con la JK_LATE, el grupo de *Quercus* difiere en su clasificación ya que el valor para la estimación realizada con la regresión del primer autor clasifica como “muy alto” mientras que el del segundo clasifica como “alto”.

Al agrupar las maderas utilizando un proceso jerárquico no hubo diferencia en el número de grupos ni de las especies en cada uno de ellos, lo que podría indicar una similitud entre las propiedades mecánicas estimadas con ambos modelos (Tabla 6)

Tabla 6: Agrupación de las especies de acuerdo a los dendrogramas de Cluster de Brown et al. (1952) y Sotomayor et al. (2003).

Grupo / Cluster	1 (rojo)	2 (amarillo)	3 (rosa)	4 (azul)	5 (verde)
Coníferas	20	3	0	0	0
Latifoliadas	38	39	28	5	2
Género	0	4	9	0	1
<i>Quercus</i>					

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a esta agrupación se propone que las maderas que se encuentran en del primer y segundo clúster se clasifiquen como maderas de muy baja y baja resistencia mecánica, cuya Db va de 0.211 gcm^{-3} - 0.354 gcm^{-3} para muy bajas y de 0.535 gcm^{-3} - 0.609 gcm^{-3} para bajas, un ejemplo de especies dentro de estos clústers son: *Mangifera indica* L., *Bursera hintonii* Bullock y *Arbutus glandulosa* M.Martens & Galeotti en el primero y *Phoebe effusa* Meisn., *Ternstroemia pringlei* (Rose) Standl., y *Populus tremuloides* Michx. en el segundo. Las del tercer cluster como *Thouinia villosa* ex DC., *Cordia dodecandra* DC. y *Quercus tuberculata* Liebm. se propone como de mediana resistencia mecánica con un rango de Db de 0.656 gcm^{-3} - 0.776 gcm^{-3} , las del cuarto cluster son *Pistaceae mexicana* H.B. & K., *Agonandra racemosa* Standl., *Bucida macrostachya* Standl., *Talisia olivaeformis* (H.B.K.) Radlk y *Caesalpinia mollis* (Kunth) Spreng., clasificadas de alta resistencia mecánica con un rango de Db de 0.825 gcm^{-3} - 0.877 gcm^{-3} y las del quinto cluster como de muy alta resistencia mecánica con un rango de Db de 1.075 gcm^{-3} - 1.175 gcm^{-3} , en este último grupo están las especies de *Quercus obtusata* Humb. & Bonpl. (1809), *Tabebuia guayacan* (Seem.) Hemsl. y *Brya ebenae*.

Conclusiones

Aunque las estimaciones de las propiedades mecánicas de la madera utilizando modelos de autores distintos son estadísticamente diferentes, esto no impidió realizar una agrupación

general de las maderas de acuerdo a su resistencia mecánica. Esta agrupación es válida para maderas mexicanas, sin embargo, puede fortalecerse si se incluyen muestras de maderas de otras latitudes.

Si bien, este estudio no permite discernir cuál de los modelos estadísticos utilizados es pertinente si da pauta sobre la problemática que puede enfrentarse al momento de elegir un modelo estadístico para estimar propiedades mecánicas que dependan exclusivamente de la densidad básica.

Referencias

Brown, H., Panshin, A., & Forsaith, C. (1952). *Textbook of Wood Technology, Volume II: The physical mechanical and chemical properties of the comercial Woods of the United States* (First edition). Mc Grow-Hill Book Company, New York, Toronto, London.

De la Fuente, F. S. (2011). Análisis conglomerados. Fac. Ciencias Económicas y Empresariales [PDF]. Consultado en Enero de 2020 en http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf

Echenique, M. R. & Plumptre, R. A. (1994). *Guía para el uso de maderas de México y Belice*. Universidad de Guadalajara. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la madera, A.C. Guadalajara, México.

Fang, Yiming., Lin, Lujun., Feng, Hailin., Lu, Zhixiong., & Emmsc, Grant W. (2017). Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products. *Computers and Electronics in Agriculture*, (137), 79-87

Fuentes, S. M. (1998). Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 4(1), 221-229.

International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). ISO 13061-2:2014 Wood. *Determination of density for physical and mechanical tests* (pp. 5). International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

Kribs, D.A. (1968). *Commercial Foreign Woods on the American Market*. Editorial Dover Publications Inc. New. York

Kribs, D.A. (1968). *Commercial Foreign Woods on the American Market*. Editorial Dover Publications Inc. New. York

Labonnote, N., Ronnquist, A., & Malo, K. A. (2015). Prediction of material damping in timber floors, and subsequent evaluation of structural damping. *Materials and Structures*, 48(6), 1965-1975.

Miles, W. P. D. & Smith, B. (2009). Specific Gravity and Other Properties of Wood and Bark for 156 Tree Species Found in North America. Research Note NRS-38. United States Department of Agriculture.

Osazuwa-Peters, O. L., S. J. W. Right, & A.E. Anne. (2014) Radial Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Tree Species Differing in Growth–Mortality Strategies. *American Journal of Botany* 101(5), 803–811.

Quintanar, O. J. (2002). *Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México, libro técnico N° 2*. INIFAP-CIRCE C.E. San Martinito, Tlahuapan, Puebla, México.

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Ross R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (Second edition). Madison, WI: U.S, United States Department of Agricultura (USDA).

Saporiti, M. J., Pereira, F. & Quilhó, T. (2019). Assessment of old timber members: Importance of wood species identification and direct tensile test information. *Construction and Building Materials*, 207, 651–660.

Serna, M. Y., Borja, De la R. A., Fuentes, S. M., & Corona, A. A. (2011). Propiedades tecnológicas de la madera de algarrobo (*Hymenaea oblongifolia* Huber.), de Bagadó-Chocó, Colombia. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(3), 411-422.

Sotomayor, C. J. (2018). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 48(9). doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.150>

Sotomayor, C. J., Herrera, F. M., & Cruz, L. J. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas [online]. Revisado en enero de 2020, en <http://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>

Tondon, A., Singhb, M., Sandhua, B. S., & Singha, B. (2017). Non-destructive study of wood using the Compton scattering technique. *Applied Radiation and Isotopes*, (129), 204–210.

Anexo 1

Tabla 7: Valores de las densidades de las 149 especies.

#	Nombre científico	Db	De	Dn	#	Nombre científico	Db	De	Dn	#	Nombre científico	Db	De	Dn
1	<i>Sterculia mexicana</i> R. Br.	0.340	0.403	0.398	51	<i>Exostema mexicanum</i> A. Gray	0.642	0.784	0.779	101	<i>Garrya laurifolia</i> Hartw.	0.654	0.783	0.776
2	<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	0.448	0.538	0.532	52	<i>Oreopanax xalapensis</i> Decne. & Planch. 1854	0.439	0.487	0.487	102	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	0.535	0.661	0.655
3	<i>Dalbergia glabra</i> Standl.	0.595	0.682	0.678	53	<i>Aspidosperma megalocarpon</i> Müll. Arg.	0.667	0.825	0.823	103	<i>Viburnum</i> sp.	0.527	0.651	0.649
4	<i>Eucalyptus rostrata</i> Schlecht.	0.464	0.516	0.515	54	<i>Sideroxylon meyeri</i> Standl.	0.754	0.939	0.934	104	<i>Acacia schaffneri</i> (L.) Willd	0.765	0.958	0.953
5	<i>Zuelania guidonia</i> (Sw.) Britt & Millsp.	0.522	0.718	0.712	55	<i>Pouteria unicoloris</i> (Donn. - Sm) Baeni	0.672	0.858	0.846	105	<i>Caesalpinia mollis</i> (Kunth) Spreng.	0.809	0.959	0.954
6	<i>Phyllostylon brasiliensis</i> Capan ex. Benth. & Hook.	0.700	0.823	0.816	56	<i>Dipholis salicifolia</i> (L.) A. DC.	0.735	0.876	0.869	106	<i>Tabebuia guayacan</i> (Seem.) Hemsl.	1.075	1.253	1.237
7	<i>Populus mexicana</i> Wesm. ex DC.	0.385	0.475	0.472	57	<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	0.272	0.356	0.347	107	<i>Citrus aurantium</i> L.	0.518	0.690	0.675
8	<i>Inga spuria</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	0.437	0.553	0.543	58	<i>Acacia melanoxylon</i> R. Br.	0.698	0.814	0.807	108	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	0.512	0.641	0.628

9	<i>Prosopis laevigata</i> Humb. & Bonpl. ex Willd	0.674	0.741	0.738	59	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	0.562	0.770	0.767	109	<i>Lysiloma bahamensis</i> Benth	0.553	0.631	0.631
10	<i>Guarea chichon</i> C.DC.	0.490	0.617	0.608	60	<i>Protium copal</i> (Schltdl. & Cham.) Engl.	0.509	0.633	0.624	110	<i>Liquidambar macrophylla</i> Oerst.	0.506	0.657	0.650
11	<i>Nectandra aff. Tabascensis</i> Lundell.	0.445	0.516	0.515	61	<i>Bucida macrostachya</i> Standl.	0.861	1.031	1.022	111	<i>Prunus capuli</i> Cav	0.636	0.775	0.769
12	<i>Vitex gaumeri</i> Greenm	0.431	0.540	0.533	62	<i>Lucuma campechiana</i> Kunth.	0.776	0.952	0.944	112	<i>Pinus ayacahuite</i> var. Veitchii (Roetzl) Shaw	0.355	0.450	0.442
13	<i>Luehea speciosa</i> Willd	0.457	0.560	0.557	63	<i>Talisia olivaeformis</i> (H.B.K.) Radlk	0.877	1.104	1.101	113	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	0.382	0.450	0.444
14	<i>Zinowiewia concinna</i> Lundell	0.507	0.594	0.595	64	<i>Schizolobium parahybum</i> (Vell.) Blake	0.211	0.310	0.297	114	<i>Pinus strobus</i> var. Chiapensis (Martínez) Andresen.	0.327	0.403	0.393
15	<i>Sickingia salvadorensis</i> (Standl.) Standl.	0.606	0.751	0.749	65	<i>Sweetia panamensis</i> Benth.	0.776	0.913	0.910	115	<i>Pinus cembroides</i> Zucc. (1832).	0.445	0.548	0.540
16	<i>Citrus limón</i> (L.) Burm	0.576	0.619	0.621	66	<i>Phoebe effusa</i> Meisn.	0.471	0.549	0.548	116	<i>Pinus engelmannii</i> Carr.	0.367	0.446	0.442
17	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	0.468	0.607	0.600	67	<i>Guarea excelsa</i> H.B. & K.	0.558	0.705	0.698	117	<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	0.339	0.386	0.385
18	<i>Mangifera indica</i> L.	0.553	0.675	0.671	68	<i>Guettarda seleriana</i> Standl.	0.597	0.653	0.654	118	<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	0.444	0.501	0.500
19	<i>Persea americana</i> Mill	0.388	0.444	0.443	69	<i>Licania arborea</i> Seem.	0.568	0.729	0.717	119	<i>Pinus monophylla</i> Torr. & Frém.	0.599	0.723	0.717

20	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill. (1800)	0.422	0.508	0.505	70	<i>Jacaranda acutifolia</i> Bonpl.	0.712	0.863	0.854	120	<i>Pinus quadrifolia</i> Parl. ex Sudw.	0.475	0.585	0.577
21	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht. & Cham.) Benth.	0.587	0.701	0.697	71	<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	0.796	0.945	0.941	121	<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham	0.359	0.450	0.442
22	<i>Bocconia arborea</i> S. Watson	0.384	0.431	0.430	72	<i>Populus simaroa</i> Rzedowski	0.437	0.459	0.460	122	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.409	0.501	0.494
23	<i>Conzattia multiflora</i> Standl.	0.408	0.485	0.481	73	<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i> Donn. Smith	0.737	0.903	0.901	123	<i>Pinus rudis</i> Endl.	0.455	0.513	0.506
24	<i>Coccoloba tuercaehimii</i>	0.688	0.818	0.817	74	<i>Cornus disciflora</i> Sessé & Moc. ex DC.	0.393	0.473	0.467	124	<i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham.	0.400	0.488	0.480
25	<i>Psychotria</i> spp.	0.522	0.627	0.621	75	<i>Ternstroemia pringlei</i> (Rose) Standl.	0.470	0.572	0.567	125	<i>Pinus greggii</i> Englem.	0.480	0.598	0.592
26	<i>Trichilia</i> spp.	0.621	0.763	0.754	76	<i>Eurya mexicana</i>	0.520	0.627	0.625	126	<i>Pinus lumholtzii</i> Robins & Ferns	0.547	0.664	0.658
27	<i>Bumelia cartilaginea</i>	0.697	0.846	0.839	77	<i>Platanus mexicana</i> Moric. (1837).	0.560	0.633	0.631	127	<i>Pinus lawsoni</i> Roetzl.	0.364	0.460	0.455
28	<i>Heliocarpus terebinthinaceus</i> (DC.) Hochr.	0.440	0.530	0.526	78	<i>Pithecellobium arboreum</i> (L.) Urban	0.656	0.792	0.784	128	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	0.542	0.694	0.686
29	<i>Thouinia villosa</i> ex DC.	0.694	0.841	0.836	79	<i>Sapium lateriflorum</i> W.B. Hemsley	0.488	0.518	0.523	129	<i>Pinus cooperi</i> blanco	0.441	0.570	0.562
30	<i>Ehretia latifolia</i> DC.	0.481	0.574	0.570	80	<i>Olea europea</i> L.	0.606	0.702	0.704	130	<i>Pinus ponderosa</i> Dougl. ex Laws	0.367	0.447	0.442
31	<i>Condalia velutina</i> Johnston	0.753	0.922	0.914	81	<i>Arbutus glandulosa</i> M.Martens & Galeotti	0.592	0.763	0.758	131	<i>Pinus reflex</i> Engelm	0.302	0.381	0.376
32	<i>Ardisia</i> spp.	0.562	0.789	0.769	82	<i>Mimosa</i> spp.	0.672	0.821	0.812	132	<i>Pinus coulteri</i> D. Don	0.362	0.443	0.438

33	<i>Pistaceae mexicana</i> H.B. & K.	0.825	0.943	0.938	83	<i>Euphorbia calyculata</i> Kunth	0.291	0.313	0.311	133	<i>Pinus michoacana</i> var. <i>cortuna</i> Martínez	0.402	0.482	0.478
34	<i>Agonandra racemosa</i> Standl.	0.813	0.985	0.977	84	<i>Styrax ramirezii</i> Greenm.	0.427	0.471	0.469	134	<i>Picea chihuahuana</i> Martínez.	0.354	0.432	0.429
35	<i>Hedyosmum mexicanum</i> C. Cordem 1863	0.442	0.523	0.520	85	<i>Celastrus pringlei</i> Rose.	0.348	0.430	0.425	135	<i>Abies durangensis</i> Martínez.	0.347	0.412	0.409
36	<i>Clusia salvinii</i> Donn. Sm.	0.459	0.542	0.537	86	<i>Alseis yucatanensis</i> Standl.	0.607	0.720	0.713	136	<i>Quercus axillaris</i> E.Fourn. ex Trel.	0.535	0.656	0.653
37	<i>Symplocos prionophylla</i> Hemsl.	0.341	0.435	0.431	87	<i>Vochysia hondurensis</i> Spegue	0.620	0.807	0.796	137	<i>Quercus skinneri</i> Benth.	0.580	0.693	0.691
38	<i>Acer negundo</i> variedad <i>mexicanum</i> L.	0.437	0.525	0.520	88	<i>Brya ebenae</i>	1.000	1.196	1.189	138	<i>Quercus laurina</i> Humb et Bonpl.	0.639	0.786	0.786
39	<i>Colubrina triflora</i> Brongn.	0.685	0.783	0.778	89	<i>Pouteria campechiana</i> (Kunth) Baehni	0.730	0.899	0.889	139	<i>Quercus glabrescens</i> Benth.	0.689	0.885	0.879
40	<i>Rhamnus mucronata</i> Schltld.	0.589	0.706	0.702	90	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn. (1791).	0.192	0.265	0.255	140	<i>Quercus magnolifolia</i> Née	0.792	1.006	0.997
41	<i>Celtis caudata</i> Planch.	0.595	0.785	0.771	91	<i>Cupania dentata</i> Moc & Sessé ex DC.	0.617	0.725	0.720	141	<i>Quercus castanea</i> Née	0.709	0.883	0.880
42	<i>Crataegus pubescens</i> (Kunth) Steud. (1841).	0.542	0.694	0.686	92	<i>Tectona grandis</i> L.	0.586	0.635	0.631	142	<i>Quercus tuberculata</i> Liebm.	0.695	0.860	0.853
43	<i>Bursera hintonii</i> Bullock	0.591	0.723	0.714	93	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	0.470	0.547	0.546	143	<i>Quercus peduncularis</i> Née	0.757	1.012	1.001

44	<i>Ilex brandegeana</i> Loes.	0.520	0.649	0.644	94	<i>Carpinus caroliniana</i> Walt.	0.556	0.696	0.695	144	<i>Quercus obtusata</i> Humb. & Bonpl. (1809)	1.175	1.211	1.211
45	<i>Meliosma dentata</i> (Liemb) Urban.	0.451	0.559	0.558	95	<i>Clethra lanata</i> M.Martens & Galeotti	0.375	0.438	0.439	145	<i>Quercus affinis</i> Scheif. Hort	0.613	0.782	0.775
46	<i>Myrica lindeniana</i> (DC.)	0.488	0.627	0.622	96	<i>Lonchocarpus longistylus</i> Pittier	0.782	0.889	0.884	146	<i>Quercus glaucoides</i> M. Martens & Galeotti	0.644	0.823	0.815
47	<i>Casimiroa edulis</i> La llave & Lex.	0.616	0.787	0.784	97	<i>Bucida buceras</i> L.	0.729	0.912	0.904	147	<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	0.609	0.768	0.760
48	<i>Zanthoxylum fagara</i> (L.) Sargent	0.491	0.605	0.598	98	<i>Cordia dodecandra</i> DC.	0.717	0.858	0.847	148	<i>Quercus insignes</i> Martens & Galeotti (1843)	0.738	0.866	0.866
49	<i>Lippia palmeri</i> S. Watson	0.565	0.667	0.663	99	<i>Acacia coulteri</i> Benth. ex A.Gray	0.599	0.727	0.723	149	<i>Quercus oleoides</i> Schltdl. & Cham.	0.699	0.843	0.838
50	<i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Gaudich.	0.734	0.848	0.845	100	<i>Morus celtidifolia</i> H.B. & K.	0.587	0.700	0.693					

#: número asignado a la especie para un mejor control, Densidad básica (Db) en grcm⁻³, Densidad en equilibrio (De) en grcm⁻³ y Densidad normal (Dn) en grcm⁻³.. Fuente: elaboración propia.

Anexo 2

Tabla 8: Propiedades mecánicas de 149 especies estimadas a partir de Brown et al. (1952).

Número de especie	Flexión estática:			Impacto	Compresión paralela a la fibra:			Compresión perpendicular a la fibra	Dureza	
	ELP	MOR	MOE		ELP	EM	MOE		ELP	L

1	186.352	321.549	55432.404	43.89	125.587	160.989	69610.334	18.648	149.99	137.156
2	262.933	453.688	73008.249	71.07	165.407	212.034	91681.547	34.655	278.728	254.879
3	374.659	646.469	96918.063	116.679	219.577	281.474	121706.767	65.552	527.235	482.124
4	274.332	473.356	75529.533	75.42	171.119	219.356	94847.699	37.406	300.854	275.113
5	318.39	549.379	85087.100	92.906	192.773	247.114	106849.802	48.907	393.357	359.701
6	459.411	792.708	114092.488	155.233	258.487	331.353	143273.890	94.625	761.065	695.947
7	217.275	374.906	62676.458	54.415	141.999	182.028	78707.197	24.584	197.733	180.814
8	254.508	439.151	71130.728	67.902	161.153	206.581	89323.813	32.682	262.859	240.368
9	437.618	755.105	109741.784	145.022	248.63	318.717	137810.407	86.699	697.318	637.654
10	293.805	506.957	79789.026	83.02	180.769	231.727	100196.641	42.32	340.381	311.258
11	260.967	450.296	72571.226	70.327	164.417	210.765	91132.747	34.19	274.988	251.459
12	250.742	432.653	70287.490	66.5	159.243	204.132	88264.901	31.816	255.899	234.004
13	269.767	465.48	74522.399	73.669	168.837	216.431	93582.971	36.293	291.903	266.927
14	307.16	530.001	82677.579	88.351	187.314	240.116	103823.999	45.846	368.736	337.187
15	383.586	661.874	98761.192	120.589	223.752	286.827	124021.312	68.39	550.063	502.999
16	360.002	621.18	93872.952	110.339	212.678	272.63	117882.810	61.009	490.693	448.708
17	277.394	478.64	76203.303	76.602	172.645	221.313	95693.799	38.161	306.927	280.665
18	341.727	589.647	90040.924	102.578	203.996	261.501	113070.664	55.548	446.769	408.543
19	219.696	379.082	63234.354	55.265	143.263	183.648	79407.785	25.08	201.715	184.456
20	244.154	421.285	68806.076	64.066	155.886	199.83	86404.586	30.327	243.924	223.053
21	368.823	636.4	95708.492	114.142	216.836	277.961	120187.825	63.726	512.545	468.691
22	216.96	374.362	62603.685	54.304	141.834	181.817	78615.811	24.52	197.217	180.342
23	233.959	403.694	66497.959	60.353	150.657	193.127	83506.122	28.086	225.898	206.57
24	449.603	775.785	112139.740	150.613	254.063	325.682	140821.688	91.019	732.07	669.432
25	318.173	549.004	85040.659	92.818	192.667	246.979	106791.484	48.847	392.874	359.259
26	395.609	682.62	101230.018	125.914	229.346	293.997	127121.590	72.297	581.486	531.733

27	456.644	787.935	113542.553	153.926	257.241	329.756	142583.298	93.601	752.836	688.422
28	256.685	442.907	71616.977	68.717	162.255	207.993	89934.430	33.186	266.919	244.081
29	454.013	783.395	113018.823	152.685	256.054	328.235	141925.614	92.633	745.046	681.298
30	287.025	495.258	78312.601	80.351	177.424	227.439	98342.592	40.579	326.373	298.448
31	503.419	868.644	122755.129	176.442	278.113	356.511	154152.172	111.562	897.29	820.516
32	349.015	602.221	91573.729	105.653	207.469	265.953	114995.515	57.698	464.064	424.358
33	564.052	973.265	134447.030	206.894	304.602	390.467	168834.507	136.904	1101.118	1006.904
34	553.582	955.2	132446.918	201.538	300.07	384.659	166322.826	132.364	1064.603	973.513
35	258.411	445.885	72002.029	69.364	163.127	209.112	90417.966	33.589	270.159	247.044
36	270.992	467.595	74793.153	74.138	169.451	217.218	93922.976	36.59	294.295	269.114
37	186.566	321.918	55483.273	43.961	125.702	161.137	69674.213	18.687	150.3	137.44
38	254.983	439.97	71236.815	68.079	161.393	206.889	89457.034	32.791	263.742	241.175
39	446.983	771.265	111616.657	149.386	252.878	324.162	140164.816	90.067	724.409	662.427
40	370.022	638.47	95957.418	114.662	217.4	278.684	120500.418	64.099	515.549	471.438
41	375.019	647.09	96992.531	116.836	219.745	281.69	121800.282	65.665	528.147	482.958
42	333.316	575.133	88263.491	99.06	199.969	256.339	110838.617	53.111	427.17	390.621
43	371.461	640.952	96255.796	115.287	218.076	279.551	120875.112	64.548	519.163	474.743
44	316.886	546.784	84765.430	92.292	192.044	246.18	106445.859	48.492	390.019	356.648
45	265.141	457.498	73498.359	71.907	166.517	213.457	92297.013	35.18	282.956	258.745
46	292.726	505.095	79554.503	82.594	180.238	231.046	99902.135	42.041	338.134	309.203
47	391.003	674.672	100286.040	123.867	227.207	291.255	125936.170	70.789	569.357	520.642
48	294.444	508.06	79927.939	83.273	181.084	232.131	100371.084	42.486	341.716	312.478
49	350.974	605.603	91984.891	106.485	208.4	267.147	115511.839	58.282	468.766	428.657
50	487.156	840.583	119572.321	168.514	270.902	347.268	150155.298	105.158	845.79	773.422
51	412.393	711.579	104651.357	133.456	237.097	303.933	131418.004	77.911	626.642	573.025
52	256.125	441.941	71492.023	68.507	161.972	207.631	89777.517	33.056	265.872	243.124

53	432.057	745.509	108624.742	142.449	246.099	315.473	136407.660	84.726	681.449	623.143
54	504.221	870.028	122911.569	176.836	278.467	356.966	154348.625	111.882	899.865	822.871
55	436.424	753.045	109502.298	144.469	248.087	318.022	137509.668	86.274	693.898	634.527
56	488.195	842.375	119776.252	169.018	271.364	347.86	150411.388	105.562	849.039	776.394
57	140.911	243.14	44325.256	29.677	100.423	128.732	55662.313	11.276	90.69	82.93
58	457.894	790.091	113791.048	154.516	257.804	330.477	142895.351	94.063	756.548	691.817
59	348.886	601.998	91546.652	105.598	207.407	265.874	114961.512	57.66	463.756	424.076
60	308.685	532.633	83005.915	88.966	188.057	241.07	104236.313	46.256	372.039	340.207
61	594.714	1026.173	140262.835	222.809	317.778	407.358	176137.819	150.59	1211.196	1107.564
62	521.892	900.519	126345.735	185.573	286.248	366.939	158661.146	119.038	957.425	875.506
63	608.759	1050.407	142906.672	230.211	323.768	415.036	179457.869	157.052	1263.17	1155.09
64	102.84	177.45	34452.996	19.095	78.056	100.06	43265.028	6.396	51.446	47.044
65	522.565	901.681	126476.134	185.908	286.543	367.318	158824.898	119.315	959.65	877.54
66	279.528	482.323	76671.934	77.428	173.707	222.674	96282.292	38.691	311.19	284.564
67	345.918	596.878	90923.171	104.343	205.995	264.063	114178.564	56.78	456.679	417.605
68	376.12	648.991	97220.326	117.316	220.261	282.352	122086.340	66.013	530.942	485.513
69	353.72	610.34	92560.044	107.653	209.703	268.817	116234.099	59.106	475.386	434.711
70	469.118	809.458	116017.092	159.844	262.847	336.942	145690.750	98.254	790.256	722.64
71	539.428	930.777	129730.698	194.361	293.917	376.77	162911.880	126.334	1016.108	929.167
72	255.115	440.198	71266.359	68.129	161.46	206.975	89494.134	32.822	263.988	241.4
73	490.114	845.687	120152.790	169.949	272.217	348.953	150884.233	106.311	855.056	781.896
74	223.282	385.271	64058.886	56.532	145.131	186.043	80443.208	25.821	207.681	189.912
75	278.957	481.337	76546.540	77.206	173.423	222.31	96124.825	38.549	310.046	283.518
76	316.968	546.925	84782.960	92.326	192.083	246.231	106467.873	48.514	390.201	356.814
77	347.743	600.027	91306.813	105.115	206.864	265.178	114660.330	57.32	461.026	421.58
78	423.265	730.339	106852.842	138.407	242.085	310.327	134182.562	81.648	656.693	600.505

79	292.372	504.485	79477.617	82.454	180.064	230.823	99805.583	41.949	337.399	308.531
80	383.52	661.76	98747.622	120.56	223.722	286.788	124004.272	68.369	549.893	502.843
81	372.199	642.226	96408.743	115.608	218.423	279.995	121067.178	64.779	521.021	476.442
82	436.241	752.728	109465.419	144.384	248.004	317.915	137463.357	86.208	693.373	634.046
83	153.206	264.356	47393.359	33.365	107.374	137.642	59515.144	13.108	105.428	96.408
84	247.287	426.692	69511.681	65.221	157.485	201.879	87290.663	31.032	249.588	228.233
85	191.488	330.41	56651.146	45.593	128.348	164.529	71140.793	19.584	157.512	144.035
86	384.365	663.218	98921.682	120.933	224.116	287.293	124222.851	68.641	552.077	504.84
87	394.216	680.216	100944.755	125.294	228.699	293.169	126763.364	71.84	577.806	528.368
88	717.13	1237.4	162920.000	289.56	369.11	473.16	204590.000	210.92	1696.43	1551.28
89	484.292	835.641	119009.646	167.129	269.627	345.633	149448.708	104.048	836.861	765.258
90	90.86	156.778	31202.889	16.056	70.693	90.621	39183.642	5.118	41.165	37.643
91	392.532	677.309	100599.477	124.545	227.917	292.166	126329.775	71.288	573.369	524.31
92	367.435	634.006	95420.309	113.542	216.183	277.124	119825.933	63.295	509.079	465.521
93	278.85	481.152	76523.030	77.165	173.37	222.242	96095.303	38.522	309.832	283.322
94	344.463	594.367	90617.032	103.729	205.301	263.174	113794.124	56.35	453.227	414.448
95	210.69	363.544	61152.159	52.12	138.546	177.601	76793.028	23.26	187.077	171.07
96	527.104	909.512	127354.123	188.172	288.532	369.868	159927.449	121.187	974.704	891.306
97	483.271	833.88	118808.912	166.636	269.172	345.05	149196.632	103.654	833.689	762.356
98	473.555	817.114	116894.068	161.965	264.834	339.489	146792.029	99.933	803.76	734.989
99	378.17	652.529	97644.076	118.213	221.221	283.583	122618.473	66.662	536.163	490.288
100	368.451	635.758	95631.191	113.981	216.661	277.737	120090.752	63.61	511.614	467.839
101	421.572	727.417	106510.713	137.633	241.31	309.333	133752.927	81.061	651.971	596.187
102	328.258	566.406	87190.340	96.962	197.538	253.222	109490.988	51.669	415.573	380.016
103	321.894	555.424	85835.338	94.341	194.468	249.287	107789.416	49.88	401.183	366.857
104	512.886	884.98	124598.574	181.105	282.289	361.865	156467.114	115.367	927.893	848.501

105	550.39	949.692	131835.589	199.913	298.685	382.883	165555.139	130.993	1053.579	963.432
106	785.118	1354.713	175163.685	328.708	396.849	508.719	219965.248	248.27	1996.837	1825.984
107	315.283	544.017	84422.182	91.639	191.266	245.183	106014.818	48.051	386.474	353.407
108	310.477	535.724	83390.998	89.69	188.93	242.188	104719.889	46.741	375.934	343.768
109	342.328	590.683	90167.512	102.83	204.283	261.869	113229.630	55.723	448.184	409.836
110	305.71	527.498	82365.111	87.768	186.606	239.209	103431.611	45.457	365.608	334.326
111	407.191	702.604	103594.016	131.105	234.702	300.863	130090.227	76.151	612.487	560.081
112	196.815	339.603	57908.639	47.379	131.197	168.181	72719.915	20.575	165.488	151.328
113	215.144	371.229	62184.117	53.669	140.884	180.598	78088.930	24.152	194.255	177.634
114	177.259	305.859	53257.787	40.922	120.66	154.674	66879.515	17.043	137.074	125.346
115	260.493	449.477	72465.725	70.148	164.178	210.458	91000.262	34.078	274.089	250.638
116	204.688	353.187	59754.384	50.053	135.379	173.542	75037.745	22.08	177.593	162.398
117	185.514	320.103	55232.914	43.614	125.135	160.41	69359.820	18.498	148.778	136.048
118	259.898	448.451	72333.323	69.924	163.878	210.074	90833.996	33.938	272.964	249.608
119	377.958	652.163	97600.319	118.12	221.122	283.455	122563.524	66.595	535.623	489.794
120	283.017	488.344	77436.667	78.784	175.44	224.895	97242.620	39.564	318.217	290.99
121	199.536	344.296	58548.043	48.298	132.646	170.038	73522.858	21.09	169.628	155.114
122	234.207	404.122	66554.377	60.443	150.785	193.29	83576.970	28.14	226.329	206.964
123	268.133	462.661	74161.210	73.045	168.019	215.383	93129.400	35.898	288.73	264.025
124	228.395	394.094	65229.809	58.353	147.784	189.444	81913.618	26.895	216.32	197.811
125	286.633	494.582	78227.041	80.197	177.23	227.191	98235.147	40.479	325.572	297.715
126	337.369	582.127	89121.119	100.751	201.912	258.83	111915.601	54.279	436.566	399.213
127	202.552	349.501	59254.939	49.323	134.247	172.091	74410.557	21.667	174.27	159.36
128	333.496	575.444	88301.680	99.135	200.055	256.45	110886.574	53.163	427.586	391.001
129	257.919	445.037	71892.393	69.18	162.879	208.793	90280.289	33.474	269.234	246.198
130	204.908	353.567	59805.787	50.128	135.495	173.691	75102.296	22.123	177.937	162.712

131	160.237	276.487	49125.367	35.528	111.298	142.672	61690.148	14.211	114.296	104.517
132	201.603	347.864	59032.924	49	133.744	171.446	74131.757	21.485	172.805	158.019
133	229.469	395.946	65474.914	58.737	148.339	190.155	82221.413	27.123	218.153	199.488
134	195.594	337.495	57620.908	46.968	130.545	167.345	72358.590	20.346	163.643	149.642
135	190.938	329.461	56520.940	45.41	128.053	164.151	70977.284	19.483	156.698	143.291
136	328.233	566.362	87184.986	96.952	197.525	253.207	109484.264	51.662	415.516	379.963
137	363.226	626.743	94544.814	111.725	214.2	274.582	118726.512	61.996	498.63	455.966
138	409.736	706.995	104111.682	132.254	235.874	302.366	130740.296	77.01	619.394	566.398
139	450.097	776.638	112238.315	150.845	254.286	325.968	140945.475	91.2	733.519	670.757
140	535.996	924.855	129069.981	192.632	292.42	374.851	162082.172	124.891	1004.501	918.554
141	466.874	805.586	115572.801	158.774	261.841	335.652	145132.822	97.409	783.463	716.429
142	455.437	785.851	113302.292	153.356	256.697	329.058	142281.586	93.156	749.257	685.149
143	506.653	874.224	123385.606	178.031	279.541	358.342	154943.906	112.855	907.692	830.028
144	877.368	1513.889	191443.930	384.022	433.734	556.001	240409.487	303.228	2438.862	2230.188
145	389.006	671.225	99875.969	122.982	226.278	290.065	125421.216	70.139	564.132	515.864
146	413.438	713.383	104863.587	133.93	237.578	304.55	131684.516	78.267	629.505	575.643
147	385.757	665.62	99208.187	121.546	224.765	288.125	124582.635	69.089	555.681	508.136
148	490.319	846.041	120193.059	170.048	272.308	349.07	150934.802	106.391	855.701	782.486
149	457.966	790.215	113805.289	154.55	257.836	330.519	142913.234	94.089	756.762	692.011

ELP = Esfuerzo al límite de proporcionalidad en kgcm⁻², MOE = Módulo de elasticidad en kgcm⁻², MOR = Módulo de Ruptura en kgcm⁻², EM = Esfuerzo máximo en kgcm⁻², Impacto en cm, L = Lateral en kg y E = Extrema en kg. Fuente: Elaboración propia a partir de la tabla 1 de Brown et al. (1952).

Anexo 3

Tabla 9: Propiedades mecánicas de 149 especies estimadas a partir de Sotomayor et al. (2003).

Flexión estática	Compresión	Cortante paralela	Dureza Janka
------------------	------------	-------------------	--------------

Número de especie	MOE	RLE	RR	Paralela			Perpendicular			L	T
				MOE	RLE	RR	RLE	RR	RR		
1	63615.182	221.941	383.253	61185.699	116.985	160.636	154.527	101.207	154.130	183.690	
2	84248.302	307.167	543.736	83753.563	165.971	233.620	232.286	171.735	262.982	298.261	
3	112474.639	429.095	779.184	115680.638	237.840	343.427	353.274	295.856	455.627	491.059	
4	87216.955	319.723	567.694	87058.753	173.284	244.660	244.256	183.302	280.886	316.626	
5	98487.878	367.989	660.439	99724.974	201.594	287.699	291.361	230.421	353.932	390.500	
6	132838.505	520.186	958.566	139326.051	292.595	428.740	449.752	404.685	625.263	654.385	
7	72105.488	256.554	447.949	70381.474	136.733	189.839	185.331	128.122	195.599	228.016	
8	82038.967	297.867	526.040	81302.623	160.569	225.487	223.500	163.355	250.020	284.893	
9	127673.640	496.860	912.385	133285.647	278.498	406.659	424.603	375.576	579.837	611.105	
10	92236.712	341.105	608.658	92677.539	185.788	263.613	264.916	203.664	312.431	348.723	
11	83733.942	304.998	539.606	83182.272	164.710	231.720	230.231	169.766	259.937	295.125	
12	81047.082	293.705	518.133	80204.780	158.156	221.860	219.590	159.658	244.302	278.976	
13	86030.877	314.698	558.097	85736.604	170.355	240.234	239.451	178.638	273.666	309.233	
14	95643.904	355.724	636.778	96512.003	194.372	276.676	279.233	218.056	334.747	371.248	
15	114656.805	438.740	798.051	118191.895	243.599	352.340	363.263	306.753	472.587	507.613	
16	108871.216	413.231	748.225	111546.368	228.390	328.836	336.971	278.267	428.265	464.229	
17	88010.615	323.091	574.133	87944.648	175.250	247.633	247.488	186.455	285.768	321.614	
18	104339.926	393.400	709.650	106370.407	216.615	310.715	316.814	256.867	395.001	431.395	
19	72760.208	259.251	453.019	71096.104	138.280	192.141	187.777	130.321	198.991	231.600	
20	79305.100	286.415	504.303	78280.544	153.935	215.524	212.775	153.259	234.412	268.710	
21	111043.022	422.782	766.854	114036.225	234.076	337.611	346.768	288.807	444.660	480.324	
22	72020.094	256.202	447.288	70288.322	136.531	189.540	185.012	127.837	195.159	227.550	
23	76592.504	275.112	482.917	75294.070	147.407	205.752	202.297	143.541	219.398	253.049	
24	130519.837	509.697	937.779	136610.843	286.250	418.791	438.407	391.491	604.669	634.801	

25	98433.049	367.752	659.981	99662.926	201.454	287.486	291.126	230.179	353.557	390.125
26	117581.037	451.711	823.472	121565.939	251.358	364.372	376.782	321.645	495.775	530.158
27	132185.438	517.229	952.702	138560.728	290.805	425.932	446.548	400.948	619.430	648.844
28	82611.040	300.272	530.611	81936.519	161.965	227.586	225.765	165.506	253.347	288.330
29	131563.550	514.415	947.125	137832.356	289.102	423.262	443.502	397.405	613.899	643.586
30	90496.143	333.670	594.391	90725.082	181.433	257.001	257.694	196.490	301.313	337.446
31	143133.809	567.103	1051.928	151448.330	321.093	473.607	501.201	465.736	720.645	744.339
32	106151.982	401.315	725.028	108437.156	221.309	317.931	324.828	265.328	408.150	444.404
33	157052.200	631.373	1180.771	167999.377	360.421	535.986	573.441	554.628	859.753	873.597
34	154669.428	620.304	1158.508	165153.205	353.625	525.171	560.860	538.895	835.113	850.854
35	83064.109	302.178	534.237	82438.918	163.072	229.252	227.564	167.219	255.996	291.064
36	86349.707	316.048	560.674	86091.801	171.141	241.422	240.740	179.886	275.598	311.213
37	63674.728	222.181	383.700	61249.712	117.121	160.836	154.736	101.385	154.404	183.987
38	82163.772	298.392	527.036	81440.872	160.874	225.945	223.994	163.823	250.744	285.641
39	129898.871	506.892	932.227	135884.638	284.555	416.136	435.383	387.992	599.209	629.599
40	111337.614	424.080	769.388	114374.403	234.850	338.806	348.104	290.251	446.906	482.525
41	112562.789	429.484	779.944	115781.972	238.072	343.786	353.676	296.293	456.306	491.723
42	102239.451	384.253	691.907	103979.983	211.199	302.403	307.602	247.220	380.014	416.520
43	111690.752	425.637	772.428	114779.927	235.778	340.239	349.707	291.987	449.606	485.168
44	98108.115	366.348	657.270	99295.299	200.626	286.221	289.732	228.751	351.341	387.906
45	84825.218	309.601	548.376	84394.823	167.387	235.755	234.598	173.955	266.418	301.793
46	91960.188	339.922	606.387	92367.061	185.095	262.560	263.765	202.516	310.652	346.921
47	116462.760	446.744	813.732	120274.467	248.385	359.759	371.594	315.911	486.845	521.488
48	92400.511	341.806	610.004	92861.504	186.199	264.237	265.599	204.345	313.487	349.793
49	106638.153	403.442	729.165	108992.370	222.572	319.874	326.989	267.620	411.713	447.922
50	139349.386	549.793	1017.412	146979.999	310.557	456.985	482.088	442.827	684.838	710.708
51	121635.837	469.780	858.977	126260.770	262.196	381.221	395.781	342.842	528.797	562.098

52	82464.024	299.653	529.435	81773.566	161.606	227.046	225.182	164.952	252.490	287.445
53	126348.218	490.898	900.607	131740.126	274.903	401.040	418.223	368.270	568.442	600.200
54	143319.870	567.956	1053.631	151668.377	321.613	474.428	502.146	466.876	722.427	746.010
55	127389.456	495.581	909.857	132954.112	277.727	405.452	423.233	374.004	577.385	608.760
56	139591.804	550.900	1019.616	147265.803	311.230	458.045	483.305	444.279	687.106	712.843
57	50641.442	170.468	288.505	47417.834	88.064	118.514	110.988	65.880	99.882	123.927
58	132480.527	518.565	955.351	138906.485	291.614	427.200	447.995	402.635	622.062	651.345
59	106119.966	401.175	724.756	108400.604	221.226	317.803	324.686	265.178	407.916	444.173
60	96031.344	357.391	639.992	96949.058	195.352	278.171	280.876	219.722	337.331	373.846
61	163984.671	663.724	1246.014	176308.751	380.336	567.762	610.531	601.608	933.368	941.196
62	147405.465	586.728	1091.158	156508.654	333.068	492.546	523.049	492.243	762.100	783.083
63	167138.054	678.512	1275.917	180102.253	389.464	582.365	627.640	623.569	967.801	972.643
64	39164.566	126.626	209.500	35579.354	63.948	84.130	76.441	40.612	61.264	79.539
65	147560.644	587.443	1092.589	156692.812	333.504	493.237	523.848	493.219	763.626	784.506
66	88562.717	325.437	578.621	88561.468	176.619	249.706	249.744	188.662	289.187	325.103
67	105382.829	397.953	718.493	107559.384	219.314	314.863	321.419	261.721	402.544	438.862
68	112832.446	430.674	782.271	116092.016	238.782	344.884	354.906	297.630	458.388	493.757
69	107318.306	406.420	734.960	109769.615	224.341	322.597	330.020	270.842	416.722	452.863
70	135124.532	530.556	979.149	142008.501	298.878	438.605	461.026	417.894	645.888	673.938
71	151434.698	605.321	1128.418	161297.646	344.441	510.578	543.921	517.876	802.208	820.383
72	82198.530	298.538	527.314	81479.377	160.958	226.072	224.131	163.954	250.946	285.850
73	140039.426	552.944	1023.688	147793.689	312.473	460.005	485.556	446.964	691.302	716.791
74	73728.051	263.244	460.534	72153.896	140.574	195.556	191.413	133.603	204.055	236.941
75	88414.982	324.809	577.419	88396.370	176.253	249.151	249.140	188.070	288.270	324.168
76	98128.811	366.437	657.442	99318.709	200.679	286.302	289.821	228.842	351.482	388.047
77	105836.394	399.935	722.345	108076.910	220.490	316.671	323.428	263.845	405.845	442.127
78	124246.335	481.463	881.991	129293.121	269.221	392.169	408.165	356.823	550.591	583.075

79	91869.535	339.535	605.643	92265.301	184.868	262.215	263.388	202.141	310.070	346.332
80	114640.736	438.669	797.911	118173.383	243.556	352.274	363.189	306.672	472.461	507.491
81	111871.776	426.435	773.987	114987.864	236.253	340.975	350.530	292.878	450.993	486.526
82	127345.696	495.384	909.468	132903.068	277.608	405.266	423.022	373.762	577.008	608.399
83	54219.265	184.477	314.099	51177.283	95.876	129.808	122.545	74.914	113.730	139.420
84	80134.722	289.884	510.880	79196.351	155.942	218.536	216.012	156.291	239.098	273.579
85	65042.116	227.710	393.986	62721.611	120.261	165.458	159.581	105.522	160.772	190.857
86	114846.855	439.581	799.698	118410.875	244.102	353.119	364.137	307.711	474.078	509.066
87	117243.080	450.209	820.526	121175.487	250.459	362.976	375.212	319.907	493.068	527.532
88	191045.000	792.000	1507.000	209127.000	460.000	696.000	762.000	802.000	1248.000	1225.000
89	138680.562	546.742	1011.335	146191.781	308.702	454.063	478.734	438.835	678.600	704.832
90	35399.773	112.654	184.728	31779.083	56.387	73.524	66.015	33.577	50.550	66.810
91	116834.048	448.392	816.963	120703.097	249.372	361.289	373.314	317.810	489.801	524.360
92	110701.988	421.281	763.923	113644.866	233.182	336.229	345.224	287.140	442.066	477.781
93	88387.284	324.691	577.194	88365.421	176.184	249.047	249.026	187.960	288.099	323.993
94	105020.920	396.372	715.422	107146.627	218.377	313.422	319.818	260.032	399.918	436.265
95	70317.240	249.208	434.159	68433.497	132.524	183.588	178.699	122.206	186.476	218.346
96	148605.559	592.258	1102.230	157933.450	336.447	497.900	529.239	499.814	773.944	794.116
97	138441.975	545.654	1009.169	145910.710	308.041	453.021	477.540	437.415	676.381	702.741
98	136166.448	535.292	988.558	143232.874	301.750	443.120	466.193	423.980	655.393	682.930
99	113334.102	432.890	786.604	116669.038	240.105	346.930	357.198	300.126	462.272	497.551
100	110951.542	422.380	766.068	113931.232	233.836	337.240	346.354	288.360	443.964	479.641
101	123840.571	479.645	878.406	128821.290	268.127	390.462	406.233	354.633	547.176	579.793
102	100971.667	378.746	681.241	102539.982	207.943	297.414	302.083	241.481	371.102	407.648
103	99371.359	371.810	667.824	100725.322	203.848	291.145	295.161	234.327	359.995	396.564
104	145326.602	577.166	1072.031	154043.789	327.229	483.306	512.380	479.257	741.788	764.125
105	153941.284	616.927	1151.721	164284.476	351.554	521.877	557.033	534.129	827.652	843.954

106	205700.213	862.699	1652.265	227135.770	504.341	768.083	848.262	921.714	1436.368	1391.627
107	97702.908	364.598	653.891	98837.052	199.595	284.646	287.997	226.976	348.586	385.145
108	96485.787	359.349	643.765	97461.962	196.504	279.928	282.806	221.683	340.373	376.904
109	104489.554	394.053	710.918	106540.907	217.002	311.309	317.473	257.561	396.079	432.463
110	95275.216	354.138	633.723	96096.294	193.439	275.255	277.673	216.476	332.297	368.782
111	120382.442	464.184	847.971	124807.537	258.836	375.993	389.877	336.222	518.482	552.141
112	66515.064	233.686	405.126	64311.216	123.661	170.473	164.852	110.065	167.767	198.376
113	71527.797	254.178	443.485	69751.554	135.370	187.814	183.180	126.197	192.629	224.873
114	61070.653	211.703	364.261	58456.935	111.188	152.127	145.640	93.721	142.616	171.197
115	83609.780	304.475	538.610	83044.428	164.406	231.262	229.736	169.293	259.204	294.371
116	68678.208	242.500	421.595	66653.174	128.689	177.905	172.687	116.900	178.296	209.639
117	63381.673	220.998	381.502	60934.739	116.451	159.850	153.704	100.509	153.055	182.528
118	83453.964	303.819	537.360	82871.478	164.025	230.688	229.115	168.699	258.286	293.425
119	113282.298	432.661	786.156	116609.438	239.968	346.719	356.961	299.868	461.870	497.159
120	89463.806	329.270	585.960	89569.154	178.860	253.100	253.439	192.292	294.809	330.832
121	67264.267	236.734	410.815	65121.352	125.398	173.038	167.553	112.411	171.379	202.247
122	76658.787	275.387	483.437	75366.898	147.565	205.989	202.551	143.775	219.759	253.426
123	85605.590	312.899	554.664	85263.047	169.307	238.652	237.736	176.980	271.099	306.600
124	75102.919	268.932	471.251	73659.345	143.846	200.434	196.613	138.331	211.354	244.617
125	90395.295	333.240	593.566	90612.092	181.181	256.619	257.277	196.078	300.675	336.798
126	103252.846	388.662	700.456	105132.553	213.809	306.406	312.036	251.853	387.210	423.669
127	68092.744	240.110	417.125	66018.444	127.324	175.885	170.555	115.031	175.416	206.565
128	102284.572	384.449	692.287	104031.272	211.315	302.581	307.799	247.425	380.333	416.837
129	82935.102	301.635	533.204	82295.832	162.756	228.777	227.051	166.730	255.240	290.284
130	68738.470	242.746	422.056	66718.542	128.829	178.113	172.907	117.093	178.594	209.956
131	56241.088	192.458	328.749	53314.816	100.348	136.301	129.231	80.258	121.932	148.511
132	67832.522	239.049	415.141	65736.531	126.719	174.990	169.610	114.205	174.143	205.205

133	75390.777	270.124	473.501	73974.956	144.532	201.459	197.708	139.331	212.897	246.237
134	66177.977	232.316	402.571	63947.063	122.882	169.322	163.641	109.018	166.154	196.645
135	64889.638	227.092	392.836	62557.298	119.910	164.941	159.039	105.057	160.055	190.086
136	100965.342	378.719	681.188	102532.803	207.927	297.389	302.055	241.452	371.057	407.604
137	109666.062	416.723	755.033	112456.944	230.468	332.041	340.547	282.103	434.232	470.093
138	120996.063	466.922	853.356	125518.771	260.480	378.550	392.764	339.455	523.520	557.006
139	130636.864	510.225	938.826	136747.749	286.569	419.291	438.977	392.152	605.701	635.784
140	150648.058	601.685	1121.124	160361.486	342.214	507.045	539.827	512.824	794.301	813.043
141	134596.739	528.159	974.389	141388.706	297.425	436.323	458.415	414.826	641.098	669.402
142	131900.140	515.937	950.143	138226.529	290.024	424.706	445.150	399.321	616.889	646.430
143	143883.693	570.542	1058.794	152335.393	323.189	476.918	505.015	470.339	727.842	751.081
144	225218.582	958.086	1849.688	251354.529	564.603	866.764	967.508	1093.209	1706.652	1627.250
145	115977.038	444.590	809.508	119713.971	247.096	357.759	369.347	313.436	482.991	517.741
146	121887.450	470.904	861.190	126552.713	262.872	382.273	396.970	344.178	530.880	564.106
147	115186.147	441.084	802.641	118801.919	245.000	354.510	365.698	309.425	476.745	511.664
148	140087.299	553.163	1024.124	147850.158	312.606	460.214	485.796	447.252	691.752	717.214
149	132497.439	518.641	955.503	138926.303	291.660	427.273	448.078	402.731	622.213	651.489

MOE = Módulo de elasticidad en kgcm^{-2} , RLE = Resistencia al límite elástico en kgcm^{-2} , RR = Resistencia a la ruptura en kgcm^{-2} , L = Lateral en kg y T = Transversal en kg. Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 2 de Sotomayor et al. (2003)

CAPÍTULO. 4. COMPARACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE 149 ESPECIES MADERABLES MEXICANAS

Comparación de ensayos no destructivos para la estimación del módulo de elasticidad de 149 especies maderables mexicanas

Resumen

En este trabajo se calcula la velocidad del sonido y el módulo de elasticidad para 149 especies maderables mexicanas a través de un ensayo no destructivo y de un modelo de regresión. El ensayo se trata del uso de ultrasonido en el que se mide el tiempo de transmisión de una onda sonora en una pieza de madera. Para éste se utilizaron tabletas de madera de la xiloteca de la División de Ciencias Forestales y el equipo de Microsecond Timer de la marca Fakopp. Los resultados muestran alta dispersión en el tiempo y por ende en el módulo de elasticidad, los valores subestiman el módulo de elasticidad cuando se compara con los estimados a partir de un modelo de regresión. Además, se propone una metodología para mejorar las estimaciones realizadas con la técnica de ultrasonido comparándolas con las de regresión. Se concluye que el ensayo por ultrasonido es de utilidad para estimar el módulo de elasticidad en piezas de pequeñas dimensiones.

Palabras clave: Módulo de elasticidad, ultrasonido, densidad normal, regresión, velocidad.

Abstrac

This paper calculates the speed of sound and the modulus of elasticity for 149 Mexican timber species through a non-destructive test and a regression model. The test is about the use of ultrasound in which the transmission time of a sound wave in a piece of wood is measured. For this, wooden tablets from the forest library of the Forest Science Division were used together with the Microsecond Timer equipment of the Fakopp brand. The results show high dispersion over time and therefore in the modulus of elasticity, even so the values underestimate the modulus of elasticity when compared with those estimated from a regression model. In addition, a methodology is proposed to improve the estimates made with the ultrasound technique by comparing them with those of regression. It is concluded that the ultrasound test is useful for estimating the modulus of elasticity in small pieces and provided that there is good control over the direction and type of wood (sapwood or heartwood).

Keywords: Modulus of elasticity, ultrasound, normal density, regression, speed.

Introducción

La tendencia sobre la evaluación de la madera en los últimos años se ha dirigido hacia el empleo de ensayos no destructivos que responden preguntas sobre la condición, resistencia, calidad, defectos, contenido de humedad y otras características de una pieza de madera o de un árbol en pie (Tondon, Singhb, Sandhua, & Singha, 2017).

La evaluación de la madera a través de ensayos no destructivos ha sido ampliamente desarrollada en distintas áreas: laboratorios, industrias y en campo, mostrando una gran versatilidad a un costo menor a comparación de los ensayos destructivos, además las características de la madera o del árbol en pie no resultan afectadas.

La evaluación no destructiva por ultrasonido es una de las técnicas que más se han utilizado para evaluar las propiedades de la madera sólida (Ettelaei, Layeghi, Hosseinabadi, & Ebrahimi, 2019, y Kránitz, Deublein, & Niemz, 2014), esta técnica utiliza ondas ultrasónicas de 20 kHz o más las cuales son producidas por medio de transductores piezoeléctricos que viajan a través de la madera con el fin de saber el tiempo que tardan en realizar dicho recorrido (Ross, 2015). La velocidad se correlaciona con la densidad para conocer algunas propiedades mecánicas de la madera como el módulo de elasticidad (Tondon et al., 2017).

Diversos autores han estudiado la calidad de piezas de madera por medio del método de ultrasonido y lo han comparado con otros ensayos no destructivos, por ejemplo, Andreini, Quiroga, & Rabolini, (2013) determinaron el módulo de elasticidad en vigas estructurales de *Populus deltoides* Australiano a partir del método de vibraciones transversales y de ultrasonido, encontrando una mayor variación en los resultados con el método de ultrasonido. Por otra parte, Baradit, Niemz, & Fernández, (2013) y O'Neill, (2004) compararon los módulos de elasticidad por ultrasonido con los obtenidos por medio de ensayos destructivos, encontrando que los primeros sobreestiman a comparación de los valores del segundo. Además, Baettig, (2001) comparó el ultrasonido con el método de vibraciones transversales teniendo como resultado una subestimación de los valores del módulo de elasticidad con el método de ultrasonido. Dichas variaciones pueden deberse a la viscoelásticidad y atenuación de la madera (Baar, Tippner, & Rademacher, 2015, Chauhan, & Sethy, 2016, Ettelaei et al., 2019 y Hassan, Horáček, & Tippner, 2013).

Otra alternativa para estimar el módulo de elasticidad de piezas de madera pequeña es la que emplea modelos de regresión y también utiliza a la densidad (Guan, Liu, Zhang, Wang, & Zhou, 2019). Por lo antes mencionado el objetivo de esta investigación es comparar los

valores del módulo de elasticidad estimados con un modelo de regresión y los calculados por medio del método de ultrasonido utilizando valores reales de densidad de 149 especies maderables mexicanas de pequeñas probetas.

Materiales y métodos

Se eligieron 149 tabletas de diferentes especies, de dimensiones 0.13 x 0.7 x 0.01 m, a un contenido de humedad del 14% , se separaron en 3 grupos, Latifoliadas con 111, Coníferas 24 y el grupo de los encinos con 14 especies, éste último se apartó del resto de latifoliadas debido a su importancia en la industria forestal en México.

Se obtuvo la densidad normal que relaciona el peso con el volumen a un 12% de contenido de humedad y se calculó de acuerdo a la fórmula (International Organization for Standardization [ISO], 2014):

$$Dn = \frac{Pn}{Vn}, \quad (1)$$

donde:

Dn = Densidad normal (gcm^{-3})

Pn = Peso al 12% de contenido de humedad (g)

Vn = Volumen al 12% de contenido de humedad (cm^{-3}).

Para calcular el módulo de elasticidad por ultrasonido e siguieron las metodologías de Sotomayor, & Bocanegra (2011) y Acuña, Díez, & Casado (2006). Las tabletas se dimensionaron con una cinta métrica, se marcaron 3 puntos en los cantos, uno al centro y los otros dos a 15 mm del primero (Figura 1). Después se perforaron con un taladro a una

profundidad de 11 mm y un diámetro de 3 mm para tener un mejor acoplamiento de los sensores en la madera.

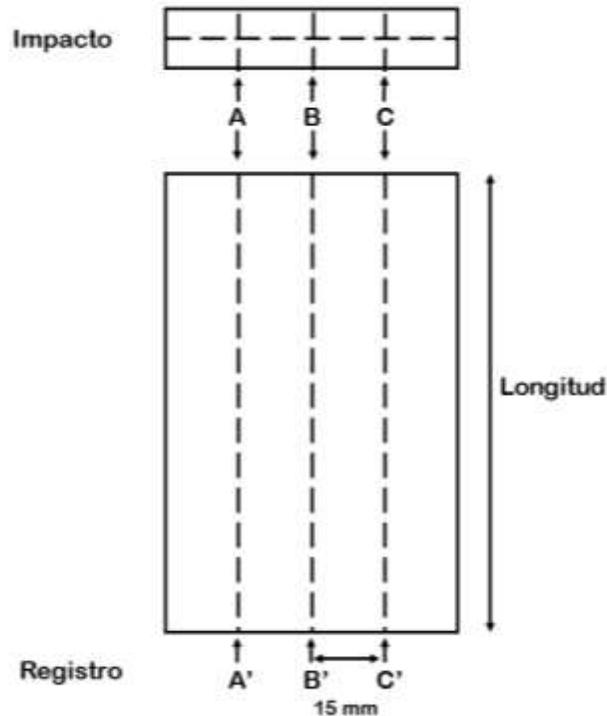


Figura 2: Localización de los puntos de contacto del medidor de tiempo de recorrido del ultrasonido. Fuente: elaboración propia.

Las lecturas del tiempo se realizaron con el equipo Microsecond Timer Fakopp el cual trabaja a una frecuencia de ultrasonido de 23kHz. Este consta de dos sensores, un emisor y otro receptor. El sensor emisor se colocó en un punto (A, B o C) de la tableta y el receptor al otro extremo en el punto correspondiente (A', B', C'), con un martillo de metal se golpeó el sensor para generar la onda y registrar la lectura del tiempo de transmisión (Figura 2).



Figura 3: Tiempo de transmisión de la onda con el equipo Fakopp, con el martillo más grande se clavaron los sensores a la madera, con el chico se golpeó el sensor para generar la onda.

De acuerdo al manual del equipo de ultrasonido se calculó un coeficiente de corrección del tiempo, para éste se midieron los tiempos de trasmisión de la onda en una pieza de madera de *Pinus patula* Schl. et Cham a dimensiones de 1 m, 0.9 m, 0.8 m y hasta 0.1 m de longitud, por lo que la pieza se fue cortando hasta llegar a 0.1 m de longitud (Figura 3).

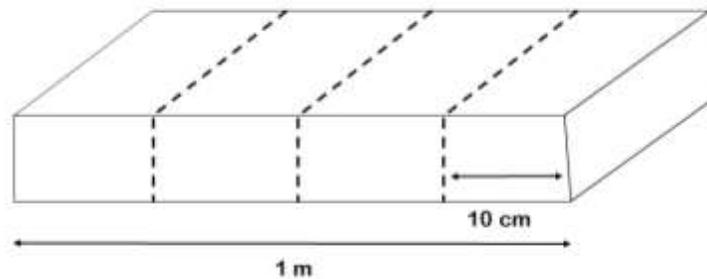


Figura 4: Representación de una pieza de madera de 1 m que se fue seccionando hasta llegar a 10 cm para calcular el coeficiente de corrección del tiempo. Fuente: elaboración propia.

La velocidad de ultrasonido se calculó a partir de la fórmula (Fakopp microsecond Timer, S/A):

$$V = \frac{1000 d}{t - \text{coeficiente de corrección}}, \quad (2)$$

donde:

V = velocidad (m/s)

d = longitud de la tableta (mm)

t = tiempo (μ s).

El valor del coeficiente de corrección para este estudio fue de 10.088 μ s.

El módulo de elasticidad se calculó de acuerdo a la fórmula:

$$MOE = v^2 \rho, \quad (3)$$

donde:

MOE = Módulo de elasticidad (Pa)

v = velocidad (m/s)

ρ = densidad normal (kgcm^{-2}).

La estimación del módulo de elasticidad se realizó por medio del modelo de regresión de Brown et al. (1952):

$$MOE = 162.92 \rho, \quad (4)$$

De acuerdo con Brown et al (1952), el valor obtenido con la ecuación (4) se debe de multiplicar por 1000. Además, en este modelo de regresión el MOE tiene unidades de kgcm^{-2} mientras que el de la ecuación (3) tiene unidades en Pa, por lo que fue necesario estandarizar todas las unidades a kgcm^{-2} .

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el software estadístico R versión 3.6.1 (R core team, 2019).

Resultados y discusión

Se midió el largo de cada una de las 149 tabletas y se obtuvo la densidad normal para después medir el tiempo que tarda en transmitirse una onda de sonido a lo largo de las mismas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

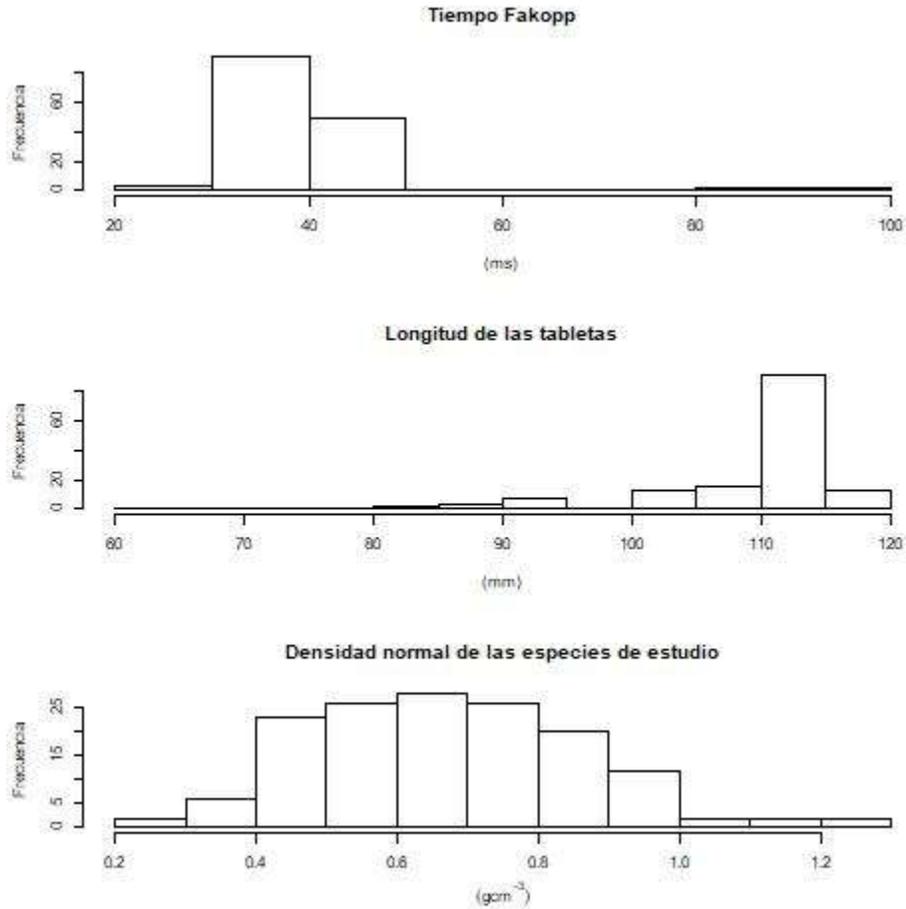


Figura 5: Histogramas del tiempo, la distancia y la densidad. Fuente: elaboración propia.

Tanto los histogramas como la prueba de Kolmogorov-Smirnov mostraron que ni el tiempo ni la longitud de las tabletas tienen una distribución normal mientras que la densidad normal sí la tuvo. La estadística de resumen de tiempo, longitud, densidad y velocidad se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Estadística de resumen de la variable tiempo, distancia y densidad normal.

Estadística / Variable	Tiempo (μs)	Longitud (mm)	Densidad normal (g/cm^3)	Velocidad (m/s)
Media	40.497	109.117	0.672	3776.628
Mediana	38.556	112.500	0.663	3812.574
Desviación estándar	9.541	9.119	0.191	714.074

Varianza	91.029	83.150	0.037	509900.900
Intervalo de confianza al 95%	[38.953, 42.042]	[107.641, 110.594]	[0.641, 0.703]	[3661.026, 3892.229]

Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que el tiempo medido tuvo una dispersión alta. En particular esto se debe a que las mediciones se realizaron sin considerar el sentido (tangencial, radial o transversal) de la madera. Se observó que los tiempos para las maderas con una orientación transversal la diferencia con la media fue mayor respecto a las demás. Las maderas con esta orientación corresponden a las especies *Pinus rudis* Endl (diferencia de 53.503 μ s), *Conzattia multiflora* (diferencia de 51.947 μ s), *Zinowiewia concinna* Lundl (diferencia de 47.723 μ s) y *Aspidosperma megalocarpum* M. (diferencia de 39.947 μ s). Por otro lado, aunque la muestra se compone por 111 latifoliadas, 24 coníferas y 14 especies del género *Quercus*, parece que esto no indujo dispersión en los tiempos medidos pues la diferencia entre las medias de cada grupo y la media de la muestra es de 0.640 μ s, -2.276 μ s y -1.172 μ s, respectivamente. La dispersión en el tiempo se refleja en la velocidad lo que se puede notar en la Figura 5.

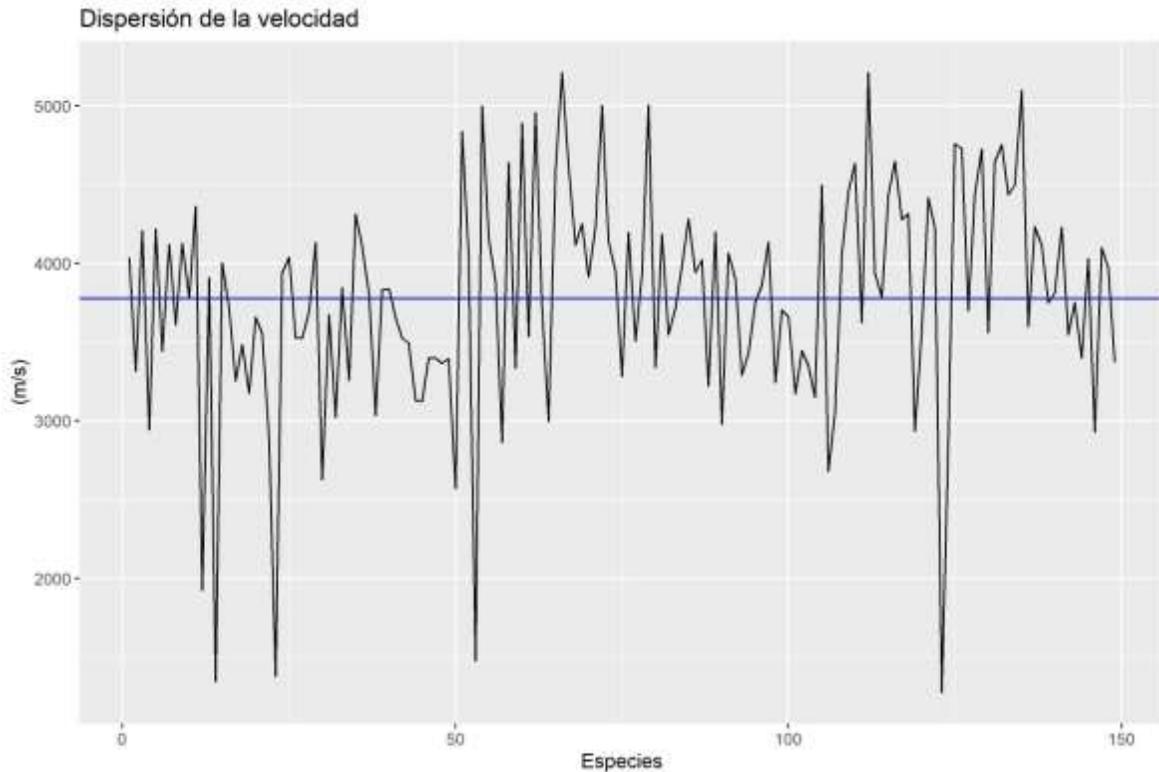


Figura 6: Dispersión de la velocidad (m/s) de las 149 especies estudiadas. Fuente: elaboración propia.

Aquí la media de la velocidad está representada por la línea azul, destacan cinco picos que se refieren a velocidades muy bajas. Los valores del tiempo, distancia velocidad, densidad normal, y módulo de elasticidad se observan en el Anexo 1.

Utilizando la velocidad del sonido en la madera junto con la densidad se encontró el MOE. En la Figura 6 se presenta la gráfica de cajas del MOE obtenido a partir del equipo de ultrasonido Fakopp, del modelo de regresión de Brown et al. (1952) y de los recopilados de literatura obtenidos a partir de pruebas destructivas, los cuales constaron de 10 especies en su mayoría del género *Quercus*. La distribución de estos valores se dibuja ligeramente sesgada a la derecha, sin embargo la media, que se dibuja como un asterisco y su valor es de 106443.99 kgcm^{-2} y la mediana son cercanas, fuera de la caja se dibuja un punto como valor

atípico que se trata de la especie *Zuelania guidonia* (Sw.) Britt & Millsp. cuyo valor es 105421.99 kgcm⁻² menor que la media. Para los MOE del Fakopp y del modelo de Brown et al. (1952) la distribución de los valores se observa como normal, la mediana y la mediana son cercanas y a pasan por la mitad de la caja dibujada por el primer y tercer cuartil. Los valores del Fakopp son los más bajos y su media es 100546.295 kgcm⁻² mientras que los más elevados son los del modelo de regresión de Brown et al. (1952) cuyo valor de media es 132304.007 kgcm⁻². De la distribución del Fakopp se tienen dos valores atípicos representados por puntos encima de la caja que se refieren a las especies de *Sideroxylon meyeri Standl.* con un valor de 137647.075 kgcm⁻² por encima de la media y *Lucuma campechiana* Kunth. con 136158.435 kgcm⁻² por encima.

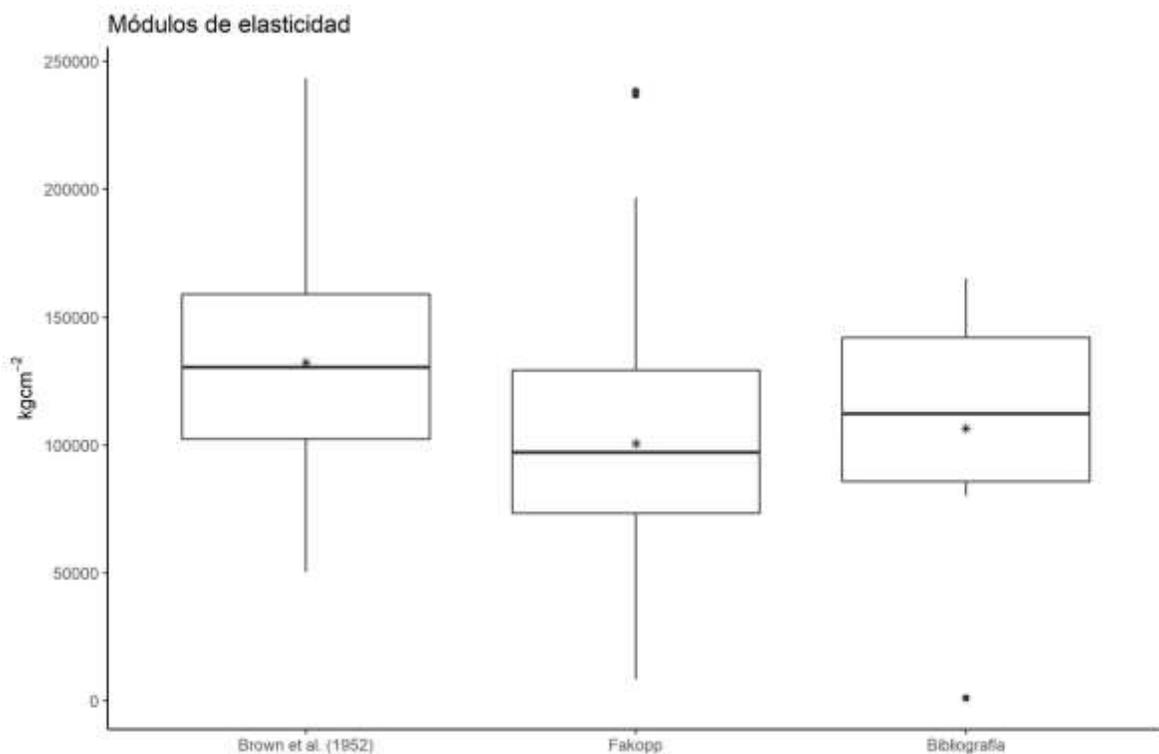


Figura 7: Gráfico de cajas de los diferentes módulos de elasticidad. Fuente: elaboración propia.

Autores como O'Neill, (2004) y Baradit et al. (2013), mencionan que los valores del MOE obtenidos con el Fakopp sobrestiman a comparación de los valores obtenidos por medio de una Máquina universal, sin embargo, contrario a ellos Baettig, (2001) menciona que los valores obtenidos con el Fakopp subestiman a comparación de otros ensayos no destructivos, como él, en esta investigación los valores obtenidos del MOE con el equipo Fakopp subestimaron a comparación de los encontrados a partir del modelo de regresión de Brown et al. (1952), por ello se propuso una metodología para corregir estadísticamente dicha subestimación.

Primero, siguiendo a Hernández (2010) se estableció que el mejor modelo de predicción para características elásticas de madera es:

$$MOE = a\rho^b, \quad (5)$$

donde:

a = constante particular para el MOE

b = potencia particular para el MOE.

ρ = densidad normal (gcm^{-3})

Para encontrar a y b se utilizó la función nls del paquete estadístico R, esta función requiere de valores iniciales para a y b. Estos valores iniciales se estimaron a través de una regresión lineal de la forma:

$$\ln(MOE) = \alpha + \beta \ln(\rho), \quad (6)$$

con α y β los coeficientes de la regresión lineal. En particular, el valor inicial de a será $\exp(\alpha)$ y el valor inicial de b será β . Así, se encontró que el modelo de regresión para el MOE del Fakopp es:

$$MOE = 142504.2 \rho^{0.8623}, \quad (7)$$

con una bondad de ajuste de 0.606. El modelo solo explica el 60% de la varianza de los datos, pues el tiempo y la distancia medidos son muy dispersos, como se observa en la Figura 7. Sin embargo se usará este modelo para corregir la estimación del MOE con el Fakopp (MOE Estimado).

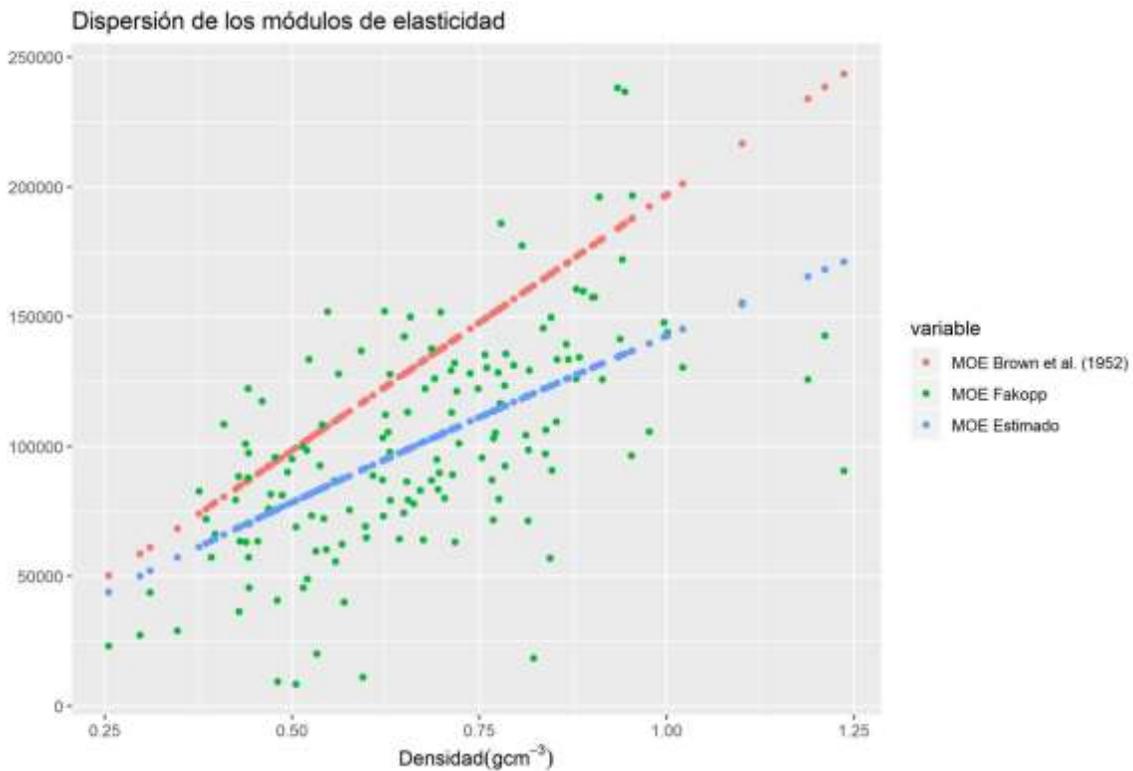


Figura 8: Dispersión de los valores de los diferentes módulos de elasticidad. Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto se propuso corregir la medición del Fakopp multiplicándolo por un factor que se obtiene al dividir el modelo de estimación del Fakopp entre el de estimación de Brown et al. (1952) suponiendo que dicha razón es 1, es decir, ambas deben dar un valor igual del MOE:

$$1 = \frac{MOE \text{ Fakopp}}{MOE \text{ Brown et al. (1952)}} = \frac{A(142504.2\rho^{0.86})}{162920\rho} \quad (8)$$

$$= A(0.8747\rho^{-0.14}) \approx 0.8747A.$$

En esta igualdad se ha considerado que $\rho^{-0.14} \approx 1$, por lo que se encontró que $A = 1.1432$. Es decir, se propone que el módulo de elasticidad que depende de la velocidad y la densidad normal sea:

$$MOE = 1.1432v^2\rho. \quad (9)$$

El efecto de multiplicar por este factor la velocidad y la densidad normal desplaza la distribución de los valores del MOE y se acercan a la distribución de Brown et al. (1952), como se observa en la Figura 8 siendo el MOE ajustado el que se multiplicó por dicho factor.

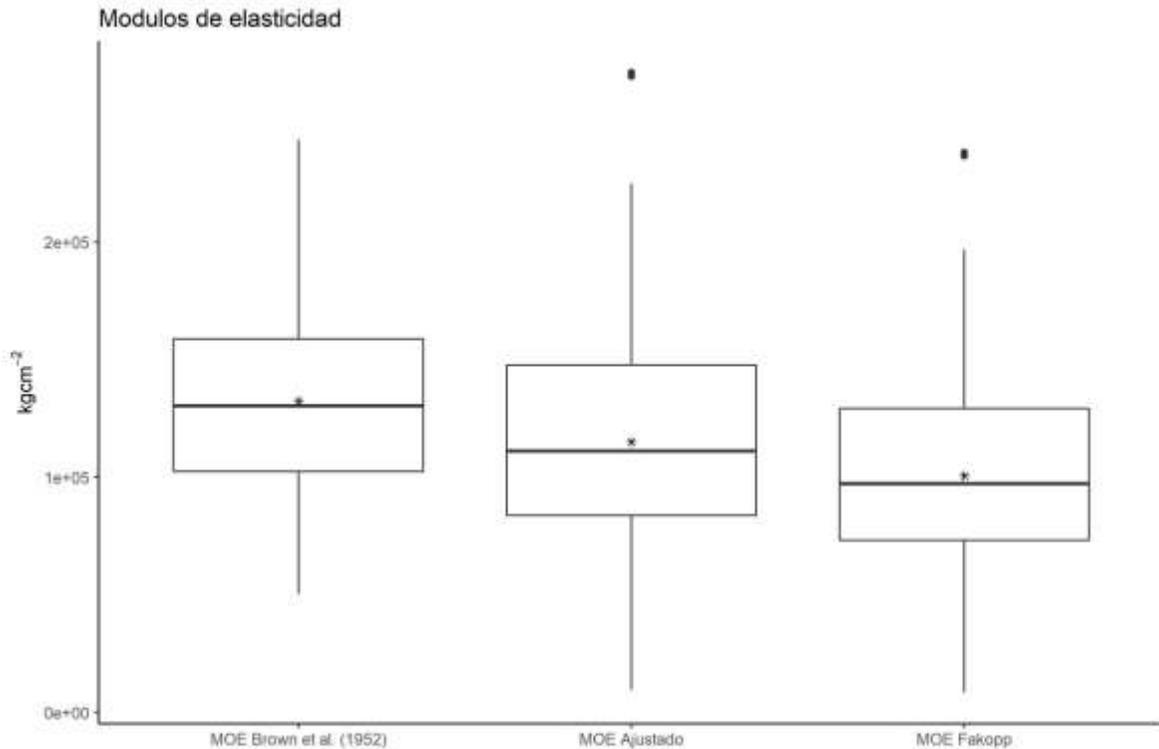


Figura 9: Gráfico de cajas de los módulos de elasticidad de Brown et al. (1952), el ajustado y el del Fakopp. Fuente: elaboración propia.

Aunque la dispersión de las mediciones del MOE por ultrasonido no se corrigió con este procedimiento si se mejoró el error, el cual se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Error entre los MOE estimados con la regresión de Brown et al. (1952), Fakopp y Fakopp corregido.

Decil	Error Brown et al. (1952) - Fakopp	Error Brown et al. (1952) - Fakopp corregido
0%	1.076	0.010
10%	7.287	3.646
20%	11.683	7.387
30%	15.809	12.566
40%	21.172	17.729
50%	27.340	23.233
60%	32.347	27.616

70%	37.958	33.284
80%	43.407	40.734
90%	53.549	49.011
100%	91.578	90.371

Fuente: elaboración propia.

El decil más alto contiene a las cuatro muestras en sentido transversal por lo que es natural un error de ese tamaño (entre el 80 % y el 90 %). Por otro lado, los errores de los demás deciles son atribuibles a la dispersión de los datos obtenidos con el Fakopp. Esta dispersión es probable que se deba a tres factores: la longitud de las tabletas, el sentido y el tipo de madera (albura o duramen).

Conclusiones

Los resultados encontrados para el MOE de las 149 especies de madera y la metodología de corrección propuesta son de utilidad solo para piezas pequeñas de madera.

Con la técnica de ultrasonido se sobreestimó el MOE de 26 especies y se subestimó en 123, por lo que se debe tener cuidado al interpretar estos valores.

Sin embargo, este estudio se puede afinar si se controla el sentido de las tabletas, lo que pudo incidir sobre la distribución en el tiempo medido con el equipo Fakopp.

La metodología de corrección propuesta se puede afinar contando con una mayor cantidad de datos del MOE obtenido a través de pruebas destructivas, en lugar de la estimación de Brown et al. (1952).

Referencias

Acuña, L., Díez, M. R., & Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* Ait. *Boletín del CIDEU*, pp. 7-26. ISSN 1885-5237

Andreini, V., Quiroga, M., & Rabolini, S. (2013). Determinación del módulo de elasticidad en vigas de álamo 2” x 3” mediante ensayos no destructivos. *Nota técnica N°4*.

Baar, J., Tippner, J., & Rademacher, P. (2015). Prediction of mechanical properties modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2), 239–252.

Baettig, P. R. (2001). Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 3(1-2), 44-51. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100005>

Baradit, E., Niemz, P., & Fernández, P. A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2), 235-244. doi:10.4067/S0718-221X2013005000019

Brown, H., Panshin, A., & Forsaith, C. (1952). *Textbook of Wood Technology, Volume II: The physical mechanical and chemical properties of the comercial Woods of the United States* (First edition). Mc Grow-Hill Book Company, New York, Toronto, London.

Chauhan, S., & Sethy, A. (2016). Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(2), 373–382.

Ettelaei, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H., & Ebrahimi, G. (2019). Prediction of modulus of elasticity of poplar wood using ultrasonic technique by applying empirical correction factors. *Measurement*, 135, 392–399.

Fakopp microsecond Timer.(S/A). Guía de uso. H-9423 Agfalva Fenyó u. 26 Hungría

Guan, C., Liu, J., Zhang, H., Wang, X., & Zhou, L. (2019). Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-lines using a vibration technique. *Construction and Building Materials*, (218), 64–72. ISSN: 0950-0618

Hassan, K., Horáčĕk, P., & Tippner, J. (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources*, 8(2), 1634–1645.

Hernández, M. S. (2010). *Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones* (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). ISO 13061-2:2014 Wood. *Determination of density for physical and mechanical tests* (pp. 5). International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

Kránitz, K., Deublein, M., & Niemz, P. (2014). Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures*, 47(6), 925–936.

O'Neill, H. (2004). Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. *Nota técnica (4)*. Editorial Montevideo.

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Ross R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood (Second edition)*. Madison, WI: U.S, United States Department of Agricultura (USDA).

Sotomayor, C. J. & Bocanegra, O. S. (2011). Caracterización dinámica de la madera de *Abies* sp. por métodos no destructivos. *Investigación e ingeniería de la madera*, 1(7), 3-15.

Sotomayor, C. J., Herrera, F. M., & Cruz, L. J. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas [online]. Revisado en enero de 2020, en <http://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>

Tondon, A., Singhb, M., Sandhua, B. S., & Singha, B. (2017). Non-destructive study of wood using the Compton scattering technique. *Applied Radiation and Isotopes*, (129), 204–210.

Anexos

Anexo 1

Cuadro 3: Valores del tiempo, distancia, Densidad normal y módulos de elasticidad de las 149 especies estudiadas.

Nombre científico	Tiempo	Longitud	Dn	V	MOE Brown et al. (1952)	MOE Fakopp	MOE Fakopp Ajustado
<i>Sterculia mexicana</i> R. Br.	38.333	114.000	0.398	4036.065	78310.293	66077.678	75540.002
<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	44.778	115.000	0.532	3315.098	104777.988	59646.138	68187.465
<i>Dalbergia glabra</i> Standl.	37.667	116.000	0.678	4206.150	133416.026	122263.571	139771.715
<i>Eucalyptus rostrata</i> Schlecht.	49.333	115.500	0.515	2943.025	101419.427	45501.813	52017.673
<i>Zuelania guidonia</i>	37.222	114.500	0.712	4219.763	140250.691	129360.253	147884.642

(Sw.) Britt & Millsp.							
<i>Phyllostylon brasiliensis</i> Capan ex. Benth. & Hook.	40.000	103.000	0.81 6	3443.43 4	160596.0 07	98636.560	112761.315
<i>Populus mexicana</i> Wesm. ex DC.	35.222	103.500	0.47 2	4117.89 1	92822.17 9	81530.703	93205.9
<i>Inga spuria</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	38.333	102.000	0.54 3	3611.21 6	106805.5 87	72147.375	82478.88
<i>Prosopis laevigata</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	34.444	100.500	0.73 8	4126.21 8	145307.0 24	128147.630	146498.371
<i>Guarea chichon</i> C.DC.	37.444	103.500	0.60 8	3783.38 6	119691.3 23	88744.959	101453.237
<i>Nectandra aff. Tabascensis</i> Lundell.	36.333	114.500	0.51 5	4362.68 0	101359.6 48	99928.993	114238.825
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm	63.111	102.000	0.53 3	1923.68 9	104970.6 13	20121.358	23002.737
<i>Luehea speciosa</i> Willd	36.444	103.000	0.55 7	3907.96 3	109579.8 52	86686.435	99099.932
<i>Zinowiewia concinna</i> Lundell	88.222	105.000	0.59 5	1343.84 1	117078.7 57	10952.008	12520.335
<i>Sickingia salvadorensis</i> (Standl.) Standl.	35.444	101.500	0.74 9	4002.92 7	147379.4 08	122324.039	139840.841
<i>Citrus limón</i> (L.) Burm	34.889	92.000	0.62 1	3709.54 4	122171.1 13	87082.186	99552.355
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	37.889	90.500	0.60 0	3255.29 2	118039.9 37	64793.045	74071.409
<i>Mangifera indica</i> L.	36.778	93.000	0.67 1	3484.48 0	132170.9 96	83125.022	95028.525
<i>Persea americana</i> Mill	37.333	86.500	0.44 3	3174.85 6	87126.95 2	45490.437	52004.668
<i>Eucalyptus globulus</i> Labill. (1800)	34.000	87.500	0.50 5	3659.25 1	99443.11 9	68972.929	78849.853
<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht. &	42.444	115.000	0.69 7	3554.16 1	137190.8 63	89767.455	102622.155

Cham.) Benth.								
<i>Bocconia arborea</i> S. Watson	49.333	113.000	0.43 0	2879.32 3	84579.85 6	36321.804	41523.087	
<i>Conzattia multiflora</i> Standl.	92.444	113.500	0.48 1	1378.15 6	94668.22 6	9313.661	10647.377	
<i>Coccoloba tuercaehimii</i>	38.778	113.000	0.81 7	3938.68 5	160787.1 40	129203.256	147705.162	
<i>Psychotria spp.</i>	38.556	115.000	0.62 1	4039.68 7	122306.9 10	103387.004	118192.023	
<i>Trichilia</i> spp.	42.000	112.500	0.75 4	3525.32 0	148401.0 15	95533.019	109213.347	
<i>Bumelia cartilaginea</i>	42.000	112.500	0.83 9	3525.32 0	165127.7 62	106300.847	121523.128	
<i>Heliocarpus terebinthinace us</i> (DC.) Hochr.	40.000	110.500	0.52 6	3694.17 0	103644.3 24	73265.380	83756.982	
<i>Thouinia villosa</i> ex DC.	37.556	113.500	0.83 6	4132.14 8	164480.0 16	145473.694	166305.527	
<i>Ehretia latifolia</i> DC.	52.556	111.500	0.57 0	2625.53 4	112132.5 00	40039.287	45772.913	
<i>Condalia velutina</i> Johnston	41.667	116.000	0.91 4	3673.36 6	179979.4 82	125797.215	143811.377	
<i>Ardisia</i> spp.	47.778	114.000	0.76 9	3024.69 3	151337.0 04	71717.858	81987.855	
<i>Pistaceae mexicana</i> H.B. & K.	40.000	115.000	0.93 8	3844.61 1	184632.8 74	141362.246	161605.319	
<i>Agonandra racemosa</i> Standl.	44.778	113.000	0.97 7	3257.44 4	192342.6 69	105718.044	120856.868	
<i>Hedyosmum mexicanum</i> C. Cordem 1863	34.444	105.000	0.52 0	4310.97 4	102291.9 11	98471.768	112572.926	
<i>Clusia salvinii</i> Donn. Sm.	37.222	111.500	0.53 7	4109.20 2	105777.4 12	92518.280	105766.897	
<i>Symplocos prionophylla</i> Hemsl.	39.556	112.000	0.43 1	3800.79 0	84810.72 9	63462.657	72550.509	
<i>Acer negundo</i> variedad mexicanum L.	46.667	111.000	0.52 0	3034.55 6	102419.6 48	48853.212	55848.992	
<i>Colubrina triflora</i> Brongn.	39.444	112.500	0.77 8	3832.20 8	153104.3 10	116467.615	133145.778	
<i>Rhamnus mucronata</i> Schtdl.	39.667	113.500	0.70 2	3837.22 5	138195.4 04	105401.737	120495.265	

<i>Celtis caudata</i> Planch.	35.667	93.500	0.77 1	3655.39 0	151847.4 70	105098.038	120148.077
<i>Crataegus pubescens</i> (Kunth) Steud. (1841).	43.000	116.000	0.68 6	3524.55 0	135090.2 84	86926.296	99374.142
<i>Bursera hintonii</i> Bullock	43.556	117.000	0.71 4	3495.92 3	140643.2 04	89035.278	101785.13
<i>Ilex brandegeana</i> Loes.	46.667	114.500	0.64 4	3130.24 0	126692.5 29	64302.205	73510.281
<i>Meliosma dentata</i> (Liemb) Urban.	46.556	114.000	0.55 8	3126.06 6	109925.1 98	55643.352	63611.48
<i>Myrica lindeniana</i> (DC.)	44.222	116.000	0.62 2	3398.34 9	122402.3 97	73222.661	83708.146
<i>Casimiroa edulis</i> La llave & Lex.	44.222	116.000	0.78 4	3398.34 9	154407.8 26	92368.713	105595.913
<i>Zanthoxylum fagara</i> (L.) Sargent	44.111	114.500	0.59 8	3365.35 9	117796.3 44	69105.779	79001.727
<i>Lippia palmeri</i> S.Watson	44.111	115.500	0.66 3	3394.75 1	130421.0 65	77854.423	89003.177
<i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Gaudich.	42.778	84.000	0.84 5	2569.61 1	166278.9 27	56871.080	65015.019
<i>Exostema mexicanum</i> A. Gray	33.556	113.500	0.77 9	4836.46 5	153375.5 53	185836.829	212448.663
<i>Oreopanax xalapensis</i> Decne. & Planch. 1854	36.778	108.000	0.48 7	4046.49 3	95839.73 7	81287.326	92927.671
<i>Aspidosperma megalocarpon</i> Müll. Arg.	80.444	104.000	0.82 3	1478.18 7	161927.0 44	18327.276	20951.742
<i>Sideroxylon meyeri</i> Standl.	32.889	114.000	0.93 4	4999.80 5	183951.7 40	238193.373	272302.664
<i>Pouteria unocularis</i> (Donn. - Sm) Baeni	37.333	113.500	0.84 6	4165.85 1	166465.2 00	149640.985	171069.574
<i>Dipholis salicifolia</i> (L.) A. DC.	39.333	113.500	0.86 9	3880.96 1	171025.7 59	133431.918	152539.368
<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	49.556	113.000	0.34 7	2863.11 1	68316.01 7	29008.054	33162.008

<i>Acacia melanoxylon</i> R. Br.	34.111	111.500	0.80 7	4641.36 4	158892.9 94	177302.808	202692.57
<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	43.667	112.000	0.76 7	3335.45 1	151035.6 69	87037.880	99501.704
<i>Protium copal</i> (Schltdl. & Cham.) Engl.	32.889	111.500	0.62 4	4890.16 0	122766.1 98	152070.374	173846.852
<i>Bucida macrostachya</i> Standl.	38.778	101.500	1.02 2	3537.84 5	201108.7 66	130385.215	149056.378
<i>Lucuma campechiana</i> Kunth.	32.778	112.500	0.94 4	4958.18 0	185884.3 15	236704.729	270600.846
<i>Talisia olivaeformis</i> (H.B.K.) Radlk	40.333	112.500	1.10 1	3719.58 2	216691.3 63	155292.158	177529.995
<i>Schizolobium parahybum</i> (Vell.) Blake	47.444	112.000	0.29 7	2998.14 4	58549.48 5	27261.370	31165.199
<i>Sweetia panamensis</i> Benth.	34.889	114.000	0.91 0	4596.60 9	179151.9 00	196072.306	224149.86
<i>Phoebe effusa</i> Meisn.	31.667	112.500	0.54 8	5213.48 2	107871.3 43	151873.341	173621.604
<i>Guarea excelsa</i> H.B. & K.	34.889	114.500	0.69 8	4616.77 0	137487.2 34	151795.355	173532.45
<i>Guetarda seleriana</i> Standl.	37.778	114.000	0.65 4	4117.04 3	128835.5 48	113116.537	129314.825
<i>Licania arborea</i> Seem.	36.667	113.000	0.71 7	4251.53 0	141178.7 57	132184.183	151112.958
<i>Jacaranda acutifolia</i> Bonpl.	39.333	114.500	0.85 4	3915.15 5	168128.4 32	133493.037	152609.24
<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	36.667	112.500	0.94 1	4232.71 8	185267.6 81	171932.492	196553.225
<i>Populus simaroa</i> Rzedowski	32.778	113.500	0.46 0	5002.25 3	90589.68 8	117416.636	134230.698
<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i> Donn. Smith	28.444	76.000	0.90 1	4140.23 5	177316.1 40	157441.042	179986.599
<i>Cornus disciflora</i> Sessé & Moc. ex DC.	38.444	112.000	0.46 7	3949.71 9	91990.99 8	74335.703	84980.576
<i>Ternstroemia pringlei</i>	45.111	115.000	0.56 7	3283.54 6	111630.3 50	62343.066	71270.593

(Rose) Standl.							
Eurya mexicana	36.778	112.000	0.62 5	4196.36 3	122983.2 65	112179.055	128243.096
Platanus mexicana Moric. (1837).	42.889	115.000	0.63 1	3506.00 3	124289.7 02	79136.936	90469.345
Pithecellobium arborescens (L.) Urban	39.222	114.500	0.78 4	3930.08 6	154289.5 18	123441.210	141117.991
Sapium lateriflorum W.B. Hemsley	32.667	113.000	0.52 3	5004.72 4	102904.6 26	133510.319	152628.996
Olea europea L.	37.333	91.000	0.70 4	3340.02 2	138524.3 52	80046.858	91509.568
Arbutus glandulosa M.Martens & Galeotti	37.333	114.000	0.75 8	4184.20 3	149147.7 64	135257.646	154626.541
Mimosa spp.	42.778	116.000	0.81 2	3548.51 0	159883.5 78	104283.483	119216.878
Euphorbia calyculata Kunth	40.778	114.000	0.31 1	3714.59 2	61145.69 7	43702.647	49960.866
Styrax ramirezii Greenm.	38.444	113.000	0.46 9	3984.98 5	92357.85 2	75970.816	86849.837
Celastrus pringlei Rose.	35.778	110.000	0.42 5	4281.85 9	83597.76 1	79392.404	90761.396
Alseis yucatanensis Standl.	38.111	110.500	0.71 3	3943.17 4	140371.8 57	113055.458	129245
Vochysia hondurensis Sprengue	38.556	114.500	0.79 6	4022.12 3	156699.5 63	131310.070	150113.673
Brya ebenae	38.333	91.000	1.18 9	3221.77 1	233993.6 49	125809.395	143825.301
Pouteria campechiana (Kunth) Baehni	37.000	113.000	0.88 9	4198.87 0	174931.8 19	159754.603	182631.462
Ceiba pentandra (L.) Gaertn. (1791).	47.667	112.000	0.25 5	2980.41 4	50274.28 0	23132.299	26444.845
Cupania dentata Moc & Sessé ex DC.	37.889	113.000	0.72 0	4064.61 8	141750.5 63	121306.464	138677.55
Tectona grandis L.	39.444	114.500	0.63 1	3900.33 6	124151.5 15	97830.826	111840.2

<i>Populus tremuloides</i> Michx.	43.667	110.500	0.54 6	3290.78 0	107504.7 74	60303.850	68939.362
<i>Carpinus caroliniana</i> Walt.	43.333	114.000	0.69 5	3429.05 3	136834.4 63	83341.908	95276.469
<i>Clethra lanata</i> M.Martens & Galeotti	40.444	114.000	0.43 9	3755.38 1	86353.72 8	63082.460	72115.868
<i>Lonchocarpus longistylus</i> Pittier	39.222	112.500	0.88 4	3861.43 8	173989.1 47	134381.652	153625.104
<i>Bucida buceras</i> L.	37.889	115.000	0.90 4	4136.55 8	177887.6 36	157668.055	180246.121
<i>Cordia dodecandra</i> DC.	44.778	112.500	0.84 7	3243.03 0	166712.7 86	90821.893	103827.588
<i>Acacia coulteri</i> Benth. ex A.Gray	41.667	117.000	0.72 3	3705.03 3	142353.3 46	101221.194	115716.069
<i>Morus celtidifolia</i> H.B. & K.	41.333	114.500	0.69 3	3664.54 7	136454.8 13	94918.122	108510.397
<i>Garrya laurifolia</i> Hartw.	40.667	97.000	0.77 6	3172.14 6	152758.4 94	79621.687	91023.513
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	42.889	113.000	0.65 5	3445.02 9	129004.7 76	79306.919	90663.67
<i>Viburnum</i> sp.	44.111	114.000	0.64 9	3350.66 4	127775.3 93	74306.792	84947.525
<i>Acacia schaffneri</i> (L.) Willd	46.111	113.500	0.95 3	3150.75 5	187625.3 13	96480.678	110296.711
<i>Caesalpinia mollis</i> (Kunth) Spreng.	35.778	115.500	0.95 4	4495.95 2	187824.0 13	196659.086	224820.668
<i>Tabebuia guayacan</i> (Seem.) Hemsl.	43.667	90.000	1.23 7	2680.27 3	243454.0 11	90593.010	103565.928
<i>Citrus aurantium</i> L.	39.778	90.500	0.67 5	3048.18 7	132952.6 02	63988.177	73151.284
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	38.556	115.500	0.62 8	4057.25 0	123720.5 92	105493.386	120600.039
<i>Lysiloma bahamensis</i> Benth	35.889	115.000	0.63 1	4457.21 1	124195.1 63	127805.827	146107.622
<i>Liquidambar macrophylla</i> Oerst.	35.111	116.000	0.65 0	4635.71 5	127912.4 93	142385.565	162775.178

<i>Prunus capuli</i> Cav	38.778	104.000	0.76 9	3624.98 5	151469.9 09	103099.914	117863.822
<i>Pinus ayacahuite</i> var. <i>Veitchii</i> (Roetzl) Shaw	30.333	105.500	0.44 2	5211.07 7	86953.58 2	122310.056	139824.856
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	26.333	64.000	0.44 4	3939.59 3	87329.77 9	70207.690	80261.431
<i>Pinus cembroides</i> Zucc. (1832).	38.889	109.000	0.39 3	3784.60 5	77273.73 5	57331.426	65541.286
<i>Pinus strobus</i> var. <i>Chiapensis</i> (Martínez) Andresen.	34.778	109.500	0.54 0	4435.03 4	106370.9 79	108376.884	123896.454
<i>Pinus engelmannii</i> Carr.	32.889	106.000	0.44 2	4648.94 2	87084.26 0	97491.660	111452.466
<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	35.444	108.500	0.38 5	4278.99 1	75857.47 4	71945.026	82247.554
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	35.111	108.000	0.50 0	4316.01 0	98484.79 6	95028.467	108636.543
<i>Pinus monophylla</i> Torr. & Frém.	47.556	110.000	0.71 7	2935.87 3	141226.9 11	63053.869	72083.183
<i>Pinus quadrifolia</i> Parl. ex Sudw.	41.333	112.000	0.57 7	3584.53 5	113502.2 01	75542.201	86359.844
<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham	35.556	112.500	0.44 2	4417.38 5	86970.96 8	87907.202	100495.513
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	36.111	110.000	0.49 4	4227.01 2	97308.61 8	90061.229	102957.997
<i>Pinus rudis</i> Endl.	94.000	107.000	0.50 6	1275.14 5	99512.97 5	8381.442	9581.665
<i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham.	47.556	108.000	0.48 0	2882.49 4	94577.94 5	40704.863	46533.799
<i>Pinus greggii</i> Englem.	32.889	108.500	0.59 2	4758.58 6	116593.6 79	136757.312	156340.959
<i>Pinus lunholtzii</i> Robins & Ferns	33.778	112.000	0.65 8	4727.77 8	129522.2 40	149960.904	171435.305
<i>Pinus lawsonii</i> Roetzl.	40.778	113.500	0.45 5	3698.30 0	89496.53 3	63405.959	72485.693
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	35.333	112.000	0.68 6	4436.46 4	135074.7 84	137710.717	157430.892

<i>Pinus cooperi</i>	27.333	81.500	0.56 2	4725.91 6	110647.6 72	128007.065	146337.677
<i>Pinus ponderosa</i> Dougl. ex Laws	41.667	112.500	0.44 2	3562.53 2	87010.92 1	57201.953	65393.273
<i>Pinus reflex</i> Engelm	33.556	109.000	0.37 6	4644.71 0	73983.45 4	82674.489	94513.476
<i>Pinus coulteri</i> D. Don	33.222	110.000	0.43 8	4754.86 1	86202.56 0	100952.100	115408.441
<i>Pinus michoacana</i> var. <i>cortuna</i> Martínez	34.889	110.000	0.47 8	4435.32 5	94068.71 4	95855.208	109581.674
<i>Picea chihuahuana</i> Martínez.	35.556	114.500	0.42 9	4495.91 6	84398.46 4	88367.104	101021.273
<i>Abies durangensis</i> Martínez.	32.444	114.000	0.40 9	5099.20 1	80596.22 9	108552.189	124096.862
<i>Quercus axillaris</i> E.Fourn. ex Trel.	41.333	112.500	0.65 3	3600.53 8	128623.3 50	86372.237	98740.741
<i>Quercus skinneri</i> Benth.	36.556	112.000	0.69 1	4231.59 6	135954.5 67	126101.952	144159.751
<i>Quercus laurina</i> Humb et Bonpl.	37.667	113.500	0.78 6	4115.50 0	154639.1 63	135670.152	155098.117
<i>Quercus glabrescens</i> Benth.	40.222	113.000	0.87 9	3749.88 9	173136.6 88	126108.874	144167.665
<i>Quercus magnifolia</i> Née	39.333	111.500	0.99 7	3812.57 4	196239.9 34	147755.482	168914.067
<i>Quercus castanea</i> Née	36.444	111.500	0.88 0	4230.46 4	173155.5 12	160521.068	183507.685
<i>Quercus tuberculata</i> Liebm.	42.222	114.000	0.85 3	3547.62 0	167928.8 29	109476.022	125152.988
<i>Quercus peduncularis</i> Née	39.667	111.000	1.00 1	3752.70 5	197101.6 42	143780.054	164369.358
<i>Quercus obtusata</i> Humb. & Bonpl. (1809)	42.889	111.500	1.21 1	3399.29 8	238464.4 41	142732.136	163171.378
<i>Quercus affinis</i> Scheif. Hort	38.000	112.500	0.77 5	4030.52 5	152590.1 63	128401.264	146788.325
<i>Quercus glaucoides</i> M.	48.333	112.000	0.81 5	2928.46 2	160445.8 86	71273.381	81479.729

Martens & Galeotti							
<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	37.778	113.500	0.76 0	4098.98 6	149607.4 93	130204.429	148849.703
<i>Quercus insignes</i> Martens & Galeotti (1843)	38.667	113.500	0.86 6	3971.49 4	170537.5 07	139330.866	159283.046
<i>Quercus oleoides</i> Schltl. & Cham.	31.444	72.000	0.83 8	3371.34 8	165031.3 90	97161.292	111074.789

Tiempo (μ s), Longitud de la tableta (mm), Dn = Densidad normal (gcm^{-3}), V = Velocidad (m/s), MOE = Módulo de elasticidad (kgcm^{-2}). Fuente: elaboración propia,

CONCLUSIONES GENERALES

El empleo de ensayos no destructivos para determinar la calidad de piezas de madera de diferentes dimensiones presenta fuertes ventajas a comparación de los ensayos destructivos, pues a través de los primeros el material estudiado no sufre deformaciones, lo que permite continuar con su uso, otra ventaja es que resulta más sencillo hacer pruebas en campo o en la industria sin necesidad de cargar con equipos de altos costos o pesados, también con los ensayos no destructivos el estudio se vuelve más fácil y rápido, lo que hace posible el estudio de muchas especies a la vez.

La estimación de las propiedades mecánicas a partir de los modelos de regresión de Brown et al. (1952) y Sotomayor et al. (2003) aporta información sobre una gran cantidad de especies con potencial para ser aprovechadas en las diferentes ramas de la industria, de la misma forma, aporta valores de referencia que pueden ser utilizados en futuras investigaciones, pues al buscar información sobre las 149 especies se encontró poca (o nula en algunas especies) información existente.

El uso del equipo Microsecond Timer Fakopp aporta recomendaciones para futuras investigaciones, a partir de la experiencia obtenida durante el estudio, resaltando la importancia de controlar el mayor número de características en las piezas de madera a estudiar.

LITERATURA CITADA

- Acuña, L., Díez, M. R., & Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* Ait. *Boletín del CIDEU*, pp. 7-26. ISSN 1885-5237
- Alves, R. J., Magalhaes, M. D., & Carrasco, E. V. (2013). Determination of the transverse Young's modulus (TYM) of wood by means of an input power technique. *Construction and Building Materials*, (42), 11–21. ISSN: 0950-0618
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1992). Annual Book of ASTM Standards. *Construction section 4: Wood* (pp. 42-71) Philadelphia, USA.
- American Society for Testing and Materials. (1999). ASTM E1876-99. *Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration*. West Conshohocken, USA.
- American Society for Testing and Materials. (2000). Annual Book of ASTM Standards. *Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber, Section 4* (pp. 143-94). Philadelphia, USA.
- Andreini, V., Quiroga, M., & Rabolini, S. (2013). Determinación del módulo de elasticidad en vigas de álamo 2" x 3" mediante ensayos no destructivos. *Nota técnica N°4*.
- Baettig, P. R. (2001). Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 3(1-2), 44-51. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100005>
- Baradit, E., Niemz, P., & Fernández, P. A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2), 235-244. doi:10.4067/S0718-221X2013005000019
- Bárcenas P. G. (1995). Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la selva lacandona, Chis., México. *Madera y Bosques*, 1(1), 9-38.
- Basterra, L. A., Acuña, L., Casado, M., Ramón, C. G., & López, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a

la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la construcción*, 516(61), 21-36. doi: 10.3989/ic.09.016.

Borja, De la R. A., Machuca, V. R., Fuentes, S. M., Ayende, L. D., Fuentes, L. M., & Quintero, A. A. (2010). Caracterización tecnológica de la madera de *Juniperus flaccida* Var. Poblana Martínez. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 261-280.

Brown, H., Panshin, A., & Forsaith, C. (1952). *Textbook of Wood Technology, Volume II: The physical mechanical and chemical properties of the comercial Woods of the United States* (First edition). Mc Grow-Hill Book Company, New York, Toronto, London.

Carballo, C. J., Hermoso, P. E., & Díaz, B. R. (2009). Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, 6(17).

Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT). (1972). Notas técnicas 458, 459, 461, 462, 555, 464, 466, 742, y 743. Buenos Aires, Argentina.

Crespo, G. R., Jiménez, R. E., Suatunce, C. P., Law, B. G., & Sánchez, F. C. (2008). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. *Ciencia y Tecnología*, (1), 55-63.

Domingosa, F., Maia, J., Maia, O., & Schneidera, F. (2015). Microcontroller based control system for ultrasound NDT in Wood. *ScienceDirect*, (70), 428 – 432

Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, F., & Lasaygues, P. (2018). Effect of wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: a ray-tracing approach, *Ultrasonics*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.015>

Esteban, M., Argüelles, R., Arriaga, F., Iñiguez, G., & Bobadilla, I. (2007). Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España. *Informes de la Construcción*, (59), 15-27.

Guan, C., Liu, J., Zhang, H., Wang, X., & Zhou, L. (2019). Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-

lines using a vibration technique. *Construction and Building Materials*, (218), 64–72.
ISSN: 0950-0618

Íñiguez, G. G., Arriaga, M. F., Esteban, H. M., & Argüelles, A. R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la construcción*, 506(59), 97-105. ISSN: 0020-0883

Jamala, G.Y., Olubunmi, S.O., Mada, D. A., & Abraham, P. (2013). Physical and Mechanical Properties of Selected Wood Species in Tropical Rainforest Ecosystem, Ondo State, Nigeria. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 5(3), 29-33.

Jiao, J., Xia, Q., & Shi, F. (2019). Nondestructive inspection of a bricketimber structure in a modern architectural heritage building: Lecture hall of the Anyuan Miners' Club, China. *Frontiers of Architectural Research* (8), 348-358.

Labonnote, N., Ronnquist, A., & Malo, K. A. (2015). Prediction of material damping in timber floors, and subsequent evaluation of structural damping. *Materials and Structures*, 48(6), 1965-1975.

Machuca, V. R., Borja, De la R. A., Zamudio, S. F., & Bárcenas, P. G. (1999). Propiedades tecnológicas de la madera de *Quercus insignis* de Huatusco, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 5(2), 123-129.

Martínez, T. T., Borja, De la R. A., & Ávalos, R. M. (2001). Características tecnológicas de la madera de Sac-Chacah de Campeche en diferentes zonas del árbol. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(1), 91-97.

Mori, M., Hasegawa, M., Yoo, J., Kang, S., & Matsumura, J. (2016). Nondestructive evaluation of bending strength of wood with artificial holes by employing air-coupled ultrasonics. *Construction and Building Materials*, (110), 24–31. ISSN: 0950-0618

Nájera, L. J., Vargas, A. Z., Méndez, G. J., & Graciano, L. J. (2005). Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai*, 1(3), 559-576.

- Navarro, M. J., Borja, De la R. A., & Machuca, V. R. (2005). Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana Martínez*) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 73-82.
- O'Neill, H. (2004). Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. *Nota técnica (4)*. Editorial Montevideo.
- Quintero, R. H., Heano, C. E., Monroy, M., & Camargo, G. J. (2011). Métodos experimentales para la medición de las propiedades mecánicas de frutos y maderos. *Nota técnica N° 48*. ISSN 0122-1701
- Rodríguez, C., & Vergara, E. (2008). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis* crecido en el secano de la Región del Maule, Chile. *Bosque*, 29(3), 192-196.
- Ross R. J. (2015). *Nondestructive evaluation of wood* (Second edition). Madison, WI: U.S, United States Department of Agricultura (USDA).
- Sá Ribeiro, R. A., Sá Ribeiro, M. G., & Miranda, I. (2017). Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Construction and Building Materials*, (146), 38–42. ISSN: 0950-0618
- Sales, A., Candian, M., & Cardin, V. (2011). Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials* (25), 1450–1454. ISSN: 0950-0618
- Saporiti, M. J., Louzada, J. L., Santos, A., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R., & Pereira, H. (2014). Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials and Design*, (56), 975–980.
- Serna, M. Y., Borja, De la R. A., Fuentes, S. M., & Corona, A. A. (2011). Propiedades tecnológicas de la madera de algarrobo (*Hymenaea oblongifolia* Huber.), de Bagadó-Chocó, Colombia. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(3), 411-422.

- Sotomayor, C. J. & Bocanegra, O. S. (2011). Caracterización dinámica de la madera de *Abies sp.* por métodos no destructivos. *Investigación e ingeniería de la madera*, 1(7), 3-15.
- Sotomayor, C. J. & Villaseñor, A. J. (2016). Módulo de elasticidad, factor de calidad e índice material de vigas de madera de *Enterolobium cyclocarpum* determinado por vibraciones transversales. *Ingeniería*, 26(2), 37-49. ISSN: 1409-2441
- Sotomayor, C. J. (2018). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 48(9). doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.150>
- Sotomayor, C. J. (2018). Densidad y módulos dinámicos por vibraciones transversales de madera sólida y laminada de tres especies tropicales. *Tecnociencia*, 2(20), 71-90.
- Sotomayor, C. J., & López, G. V. (2019). Determinación experimental y verificación por el método del elemento finito de la frecuencia natural de vibración de barras de madera. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 76(27), 32-40. ISSN 1665-4412
- Sotomayor, C. J., Guridi, G. L., & García, M. T. (2010). Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Base de datos. *Investigación e ingeniería de la madera*, 1(6).
- Sotomayor, C. J., Herrera, F. M., & Cruz, L. J. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas [online]. Revisado en enero de 2020, en <http://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>
- Sotomayor, C. J., Villaseñor, A. J., & Aoi, H. (2007). Módulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y módulo de ruptura de la madera de *Pinus douglasiana*. *Investigación e Ingeniería de la madera*, 2(3).
- Téllez, S. C., Herrera, F. M., & Rutiaga, Q. J. (2009). Anatomía, física y mecánica de la madera de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (*Leguminosae*). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 15-21.

Tondon, A., Singhb, M., Sandhua, B. S., & Singha, B. (2017). Non-destructive study of wood using the Compton scattering technique. *Applied Radiation and Isotopes*, (129), 204–210.