

Determinación del módulo dinámico por ondas de esfuerzo en la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L.

Dynamic modulus assessment by stress waves in *Acer saccharum* Marshall and *Thuja plicata* L. wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos*

José María Villaseñor Aguilar**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, México. Doctor en Ciencias de la Madera. *madera999@yahoo.com*

** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, México. Doctor en Ciencias de la Madera. *osmavia@yahoo.com.mx*

Correspondencia: Javier Ramón Sotomayor Castellanos. Teléfono (+52) (443) 3223500. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

Origen de subvenciones: La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

El objetivo de la investigación fue medir la velocidad de las ondas de esfuerzo en las direcciones longitudinal y tangencial en la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L., y en conjunto con la densidad de la madera, determinar el módulo de elasticidad dinámico. Para cada especie se prepararon 32 probetas *ad-doc* con un contenido de humedad promedio de 11% y se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo. El diseño experimental consistió en pruebas de normalidad y de diferencias de medias. Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera y para las direcciones longitudinal y tangencial, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo dinámico. La especie se consideró el factor de variación. El método de ondas de esfuerzo permitió la caracterización dinámica de la madera de *A. saccharum* y *T. plicata*. Se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre las variables de respuesta. La densidad de la madera de *A. saccharum* es mayor que la de *T. plicata*. En la dirección longitudinal, la velocidad y el módulo dinámico de *A. saccharum* son menores que los de *T. plicata*. En la dirección tangencial, la velocidad de *A. saccharum* es mayor que la de *T. plicata*. En contraste, el módulo dinámico es menor. En comparación con la dirección tangencial, la velocidad y el módulo son mayores en la dirección longitudinal en ambas especies.

Palabras clave: Anisotropía de la madera, caracterización dinámica, densidad de la madera, métodos no destructivos.

Abstract

The research goal was to assess the stress wave speed in the longitudinal and radial directions of *Acer saccharum* Marshall and *Thuja plicata* L. wood, and weighting this parameter with the wood density, to determine the dynamic modulus of elasticity. For each species, 32 *ad-doc* wood specimens were prepared with an average moisture content of 11 % in which stress waves tests were realized. The experimental design consisted in normality and difference of means tests. The response variables were the wood density, and for the longitudinal and tangential directions, the speed of the stress waves and the dynamic modulus. The wood species was considered the variation factor. The stress waves method allowed the dynamic characterization of *A. saccharum* and *T. plicata* wood. Significant statistical difference was found between the response variables. The density of *A. saccharum* wood is greater than the corresponding to *T. plicata* wood. In the longitudinal direction, the stress wave speed and dynamic modulus of *A. saccharum* wood are lower than the *T. plicata* ones. In the tangential direction, the stress wave speed of *A. saccharum* is bigger than the *T. plicata* wood. In contrast, the dynamic modulus is smaller. When compared to the tangential direction, the stress wave speed and dynamic modulus are bigger in the longitudinal direction for both species.

Keywords: Dynamic characterization, nondestructive tests, wood anisotropy, wood density.

Fecha de recepción: 19 de junio de 2016
Fecha de aceptación: 6 de marzo de 2017

I. INTRODUCCIÓN

La madera es un material anisotrópico, es decir, presenta diferencias en las magnitudes de sus propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a la dirección en la cual se miden. Estas direcciones son la longitudinal, radial y tangencial. La dirección longitudinal es la dirección del crecimiento del árbol, la dirección radial es la dirección que va del centro hacia la periferia del árbol mientras que la dirección tangencial es la dirección perpendicular tanto a la radial como a la longitudinal. Debido a esta propiedad de ortotropía, las piezas de madera deben orientarse para que su empleo sea eficiente.

La madera es muy resistente a fuerzas que producen flexión aplicadas perpendicularmente a su dirección longitudinal, mientras que es muy poco resistente a fuerzas aplicadas paralelamente a la dirección longitudinal. Por tanto, en todas las aplicaciones donde se usa madera es necesario orientar este material con respecto a las direcciones de crecimiento del árbol.

Los elementos estructurales de madera utilizados como vigas para la construcción, por ejemplo, siempre deben estar orientados de tal manera que los esfuerzos aplicados sean perpendiculares a la dirección longitudinal, mientras que si son utilizados como columnas, entonces la aplicación de los esfuerzos siempre debe ser paralela a la dirección longitudinal de la madera.

Para poder calcular eficientemente criterios de rigidez y de resistencia de la madera, como son el módulo de rigidez y el módulo de elasticidad, se requiere conocer las relaciones de anisotropía de la misma, es decir es necesario conocer cómo varía la rigidez y la resistencia de acuerdo a la dirección en la cual se están midiendo estas propiedades.

La ortotropía de la madera también es determinante cuando se utiliza para la construcción de instrumentos musicales, ya que el paso de las ondas mecánicas, ondas sonoras en este caso a través de la madera, depende totalmente de las propiedades físicas intrínsecas del material. Las maderas *Acer saccharum* y *Thuja plicata* son ampliamente utilizadas para la construcción de instrumentos musicales y dependiendo de sus propiedades acústicas de cada una de ellas, dos instrumentos construidos con estas maderas, sonarían diferente.

Los métodos para la evaluación de las cualidades mecánicas de la madera no destructivos, se caracterizan principalmente por no afectar la estructura física del material en estudio, por su rapidez y por su bajo costo. Entre estos métodos, las ondas de esfuerzo han demostrado habilidad para determinar la velocidad de onda y el módulo dinámico de la madera [1], [2].

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio recientemente desarrollados son de carácter no destructivo y han utilizado la hipótesis fundamental en mecánica de la madera sobre el hecho de que la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía. Por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía se manifiesta por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En cambio, la capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración denota su capacidad para disipar energía. De aquí se infiere que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía están controladas probablemente por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos, como las correlaciones estadísticas [3].

Varios investigadores han observado que la velocidad de las ondas de esfuerzo varía según la especie en estudio, su anisotropía y con el contenido de humedad de la madera. Entre otros autores se puede citar a [4], [2]. Entre sus principales conclusiones, estos autores reportan que existe una fuerte correlación entre el módulo dinámico obtenido a partir de la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo estático resultante de ensayos de flexión estática. Este corolario, valoriza la técnica dinámica para predecir valores que se pueden emplear en cálculo y diseño de productos y estructuras de madera.

El desarrollo de productos fabricados con madera, requiere información normalizada y confiable de las propiedades de este material. Una de las características mecánicas más necesarias en ingeniería de la madera es el módulo dinámico, el cual encuentra su utilidad como parámetro en el diseño de productos y de estructuras de madera.

El módulo dinámico determinado en condiciones dinámicas es un importante parámetro de referencia en la caracterización mecánica de especies forestales [4], [5]. Igualmente, la velocidad de onda en una madera, se aplica en el diseño de productos de madera con vocación para aplicaciones acústicas [6], [7].

En el contexto nacional, [8] reporta valores de la velocidad de ondas de esfuerzo y de sus módulos de elasticidad derivados para maderas mexicanas. La Tabla I, presenta resultados para seis especies, extraídos de esta referencia. Estas maderas están igualmente reportadas por [9] como empleadas en México en la elaboración de instrumentos musicales, particularmente de cuerda.

Tabla 1. Características físicas y mecánicas de maderas mexicanas [8]

No.	Especie	ρ_{CH} (kg/m ³)	CH (%)	v_{oe} (m/s)	E_{oe} (MPa)
1	<i>Gyrocarpus americanus</i>	407	10,53	3.729	5.701
2	<i>Abies religiosa</i>	417	10,25	4.685	9.011
3	<i>Cedrela odorata</i>	566	10,63	4.208	10.037
4	<i>Juglans pyriformis</i>	725	10,40	5.089	19.011
5	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	9,48	4.670	18.965
6	<i>Quercus spp</i>	902	10,00	3.462	11.053

ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; v_{oe} = Velocidad de ondas de esfuerzo;
 E_{oe} = Módulo dinámico.

Un análisis bibliográfico sobre la caracterización mecánica de *A. saccharum* y *T. plicata* constató la carencia de información sobre las ondas de esfuerzo aplicadas en el estudio de estas especies. Sin embargo, [10] menciona estas maderas como de uso generalizado en la elaboración de instrumentos musicales de cuerda. [11] señala estas especies para la fabricación de guitarras. [12] reportan para *A. saccharum* y *T. plicata* valores de su densidad y de su módulo dinámico determinados con vibraciones transversales. [13] y [14] reportan usos y características tecnológicas de estas maderas.

A manera de síntesis de los trabajos revisados, se puede colegir que las técnicas de carácter no destructivo son útiles para evaluar propiedades físicas de los árboles y de su madera. La mayoría de los trabajos de investigación que han utilizado este tipo de métodos de evaluación en el estudio de las características físico-mecánicas de la madera, se han orientado al estudio

de ultrasonido y de ondas de esfuerzo. Los objetivos de investigación han sido generalmente la búsqueda de relaciones de carácter estadístico entre velocidades de transmisión de ondas acústicas, de esfuerzo y/o de frecuencias de vibración y sus relaciones con propiedades de rigidez y de calidad tecnológica de la madera. Asimismo, en los trabajos contemporáneos relacionados con ondas de esfuerzo, los resultados han mostrado el potencial de estas técnicas para predecir con un buen grado de aproximación algunas características de la madera, por ejemplo, el módulo dinámico.

Este trabajo plantea como hipótesis de investigación que la razón de la resistencia mecánica longitudinal entre la resistencia mecánica tangencial-radial de una madera es independiente de la especie. Las resistencias mecánicas en cada dirección fueron determinadas mediante sus módulos de elasticidad dinámicos, y estos, a su vez, fueron determinados utilizando ondas de esfuerzo. Dos maderas que se emplean para el mismo fin fueron utilizadas para probar la hipótesis de investigación.

El objetivo de la investigación fue medir la velocidad de ondas de esfuerzo en la madera de *A. saccharum* y *T. plicata*, y en conjunto con la densidad de la madera, determinar el módulo dinámico. La velocidad y el módulo correspondiente fueron medidos en las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma que se determinaron igualmente las relaciones de anisotropía entre estas dos direcciones, de la velocidad y de los módulos.

II. METODOLOGÍA

Se recolectaron 20 piezas de madera de *Thuja plicata* y 20 de *Acer saccharum* Marshall, con dimensiones de 0,04 m. de espesor por 0,20 m de ancho y 0,4 m. de largo, alineadas de tal forma que las dimensiones correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera fue acondicionada durante cuatro años en una cámara con una temperatura de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante.

Las piezas de madera fueron recortadas en probetas de forma circular (Fig. 1). El diámetro de las probetas de *T. plicata* fue de 0,15 m. y el de *A. saccharum* fue de 0,125 m. El espesor fue de 0,015 m. para las probetas de las dos especies.

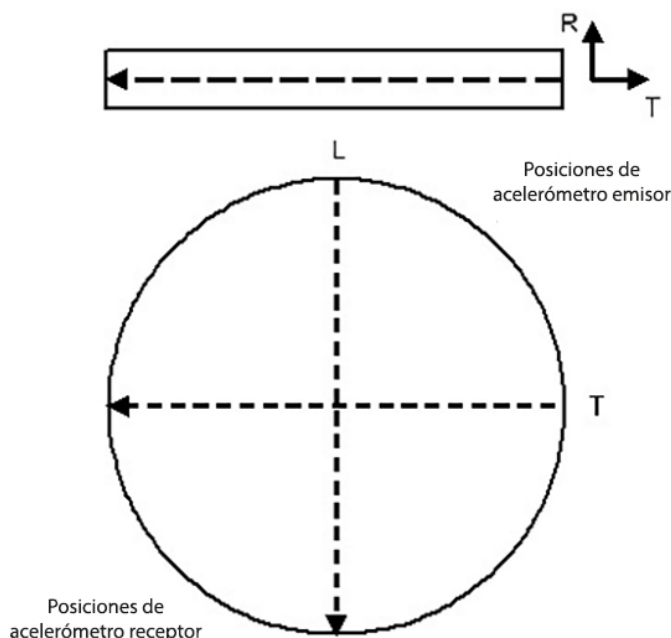


Figura 1. Diagrama de la probeta y direcciones de medición. : L = Dirección longitudinal ($\theta = 0^\circ$), T = Dirección tangencial ($\theta = 90^\circ$), R = Dirección radial. Las flechas discontinuas indican la dirección de las ondas de esfuerzo.

La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con la relación peso / volumen al momento del ensayo. La densidad básica (ρ_0) se determinó en un grupo complementario de probetas, recortadas de las mismas piezas de madera y con dimensiones de 0,015 m. por 0,015 m. por 0,04 m. El cálculo se efectuó con el cociente del peso de la madera en estado anhidro y su volumen en estado saturado, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [15]. El contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo se determinó con la relación peso al momento del ensayo en relación con el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [16].

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda, entre dos posiciones en los extremos del plano longitudinal-tangencial de las probetas (Fig. 1), empleando el aparato *Metriguard*® (Fig. 2).

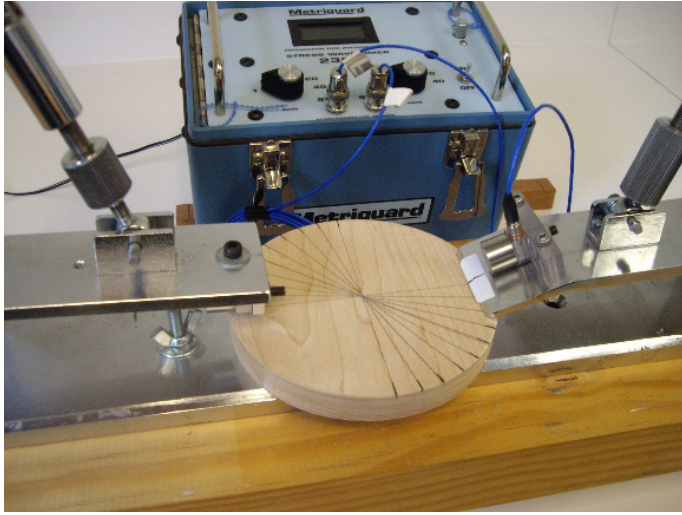


Figura 2. Pruebas de ondas de esfuerzo.

En el ensayo por ondas de esfuerzo se aplicó sistemáticamente un impacto elástico con la ayuda de una esfera de acero colocada en un péndulo. La esfera impacta un mecanismo de transmisión que induce una onda de esfuerzo en la probeta, de tal forma que la onda se desplaza a través de la madera. La emisión de la onda se registró utilizando un acelerómetro colocado en un punto de apoyo de la probeta. La recepción de la onda se registró con otro acelerómetro colocado en el punto de apoyo al lado opuesto de la probeta, tal como se ilustra en las Figs. 1 y 2. El aparato registró el tiempo de transmisión correspondiente a la distancia entre los puntos de apoyo, el cual se empleó para calcular la velocidad de transmisión de la onda en la madera. Los puntos de apoyo se localizaron a 10 mm. de los extremos de las probetas.

El módulo dinámico se calculó con la fórmula (1) propuesta por [2]:

$$E_{oe} = \rho_{CH} v_{oe}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{oe} = Módulo dinámico (Pa)

ρ_{CH} = Densidad (kg/m³)

v_{oe} = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

A. Diseño experimental

Se diseñaron dos experimentos, siguiendo las recomendaciones de [17]. Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera y la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo dinámico para las direcciones longitudinal y tangencial. La especie se consideró el factor de variación. Para cada variable de respuesta se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. El primer experimento consistió en pruebas de normalidad, en el que se calculó el apuntalamiento y el sesgo, para confirmar que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales. Cuando la prueba de normalidad verificó que los datos provenían de distribuciones normales, se procedió a realizar el segundo experimento que consistió en pruebas *t* de Student de diferencias de medias para un nivel de confianza de 95%. La hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$. Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para cada una de las dos especies en estudio. Se efectuaron pruebas con 32 réplicas (probetas por especie), totalizando 64 muestras observadas para cada una de las cinco variables de respuesta. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics®.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta las densidades, las velocidades de onda y los módulos dinámicos de *A. saccharum* y *T. plicata*. Los parámetros mecánicos corresponden a las direcciones longitudinal (L) y tangencial (T).

Tabla 2. Densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos

	CH	ρ_0	ρ_{CH}	$v_{oe} L$	$E_{oe} L$	$v_{oe} T$	$E_{oe} T$
	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m/s)	(MPa)	(m/s)	(MPa)
<i>Acer saccharum</i>							
x	10,39	612	676	3.056	6.558	989	695
σ	0,12	80,28	91,85	196,35	948,95	70,82	144,27
CV	1,15	13,12	13,59	6,43	14,47	7,16	20,77
<i>Thuja plicata</i>							
x	11,51	298	332	3.320	3.855	256	822
σ	0,14	15,18	20,30	207,53	617,76	154,31	251,79
CV	1,23	5,10	6,12	6,25	16,02	60,23	30,64

CH = Contenido de humedad; ρ_0 = Densidad básica; ρ_{CH} = Densidad a un contenido de humedad CH; v = velocidad de ondas de esfuerzo; E = módulo dinámico; oe = ondas de esfuerzo; L = Dirección longitudinal; T = Dirección tangencial; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Para todas las variables de respuesta de *A. saccharum* y de *T. plicata*, las pruebas de normalidad confirmaron que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales, por lo que los resultados de las pruebas de diferencias de medias subsecuentes no permitieron rechazar la hipótesis nula que postula la igualdad de medias. Las características densidad, velocidad de las ondas de esfuerzo y módulo dinámico de la madera de *A. saccharum* y *T. plicata* difieren entre ellas, tanto para la dirección longitudinal como para la tangencial.

Estos resultados sugieren que, desde el punto de vista de su caracterización mecánica, las dos maderas son diferenciables. En efecto, [11], [12] y [13], reportan que *A. saccharum* es una madera cuyo comportamiento mecánico puede ser tomado como referencia para fines de comparación de la calidad respecto a otras maderas. En contraste, *T. plicata*, es una madera con un comportamiento atípico. Sin embargo, ambas especies son de uso generalizado en productos de alto valor agregado [14].

A. Densidad

La densidad básica de *A. saccharum* es 105% mayor que la de *T. plicata* (Tabla 2). Para la densidad correspondiente a un contenido de humedad al momento del ensayo (ρ_{CH}), esta proporción es de 104%. De acuerdo con los criterios de clasificación propuestos por [18], la densidad básica de *A. saccharum* clasifica como Media, y la de *T. plicata* como Muy Baja.

El coeficiente de variación promedio de *A. saccharum* para las densidades básica y al momento del ensayo, es 140% mayor al de *T. plicata*. Durante la etapa experimental, se observó la diferencia de las estructuras macroanatómicas entre las dos especies. La madera de *A. saccharum* es más homogénea en comparación con la de *T. plicata*, que es más porosa. La diferencia y variación en densidades y en homogeneidad estructural permite diferenciar las dos especies.

B. Velocidad de las ondas de esfuerzo

La velocidad de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal en la madera de *A. saccharum*, es 8,6% menor que la correspondiente a *T. Plicata*. En contraste, la velocidad en la dirección tangencial de *A. saccharum* es 286% mayor que la de *T. plicata*. Los coeficientes de variación correspondientes a

las velocidades longitudinales de ambas especies y para la velocidad en la dirección tangencial, son similares y de la misma magnitud a los observados en otras maderas; estos coeficientes de variación calculados con 27 maderas angiospermas de clima templado, son para la velocidad longitudinal: 13%, y para la dirección tangencial: 7% [19]. Sin embargo, el coeficiente de variación de la velocidad de ondas de esfuerzo en la dirección tangencial de *T. plicata*, es alrededor de diez veces superior a los parámetros equivalentes reportados en la Tabla 2.

La Tabla 2 presenta también las velocidades de las ondas de esfuerzo y los módulos dinámicos correspondientes. Las magnitudes de los parámetros experimentales son similares a los reportados empleando técnicas de ultrasonido (us) en la dirección longitudinal de la madera por [10] para *A. saccharum*: $\rho_{12} = 760 \text{ kg/m}^3$, $v_{us} = 3.800 \text{ m/s}$ y $E_{us} = 11.000 \text{ MPa}$. Por su parte, [12] reportan para *T. plicata*: $\rho_{12} = 390 \text{ kg/m}^3$, $v_{us} = 4.416 \text{ m/s}$ y $E_{us} = 7.605 \text{ MPa}$, valores igualmente similares a los de las maderas de esta investigación, pero determinados con ondas de esfuerzo.

En la Fig. 3 se presenta el posicionamiento de la velocidad de ondas de esfuerzo y del módulo dinámico, ambos en la dirección longitudinal, de *A. saccharum* y *T. plicata*. Estos resultados se presentan en perspectiva con los datos de las seis especies mexicanas presentadas en la Tabla 1, maderas estudiadas también con ondas de esfuerzo y reportadas por [8]. Comparativamente con las especies ahí detalladas, la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo dinámico de *A. saccharum* y de *T. plicata* son bajos.

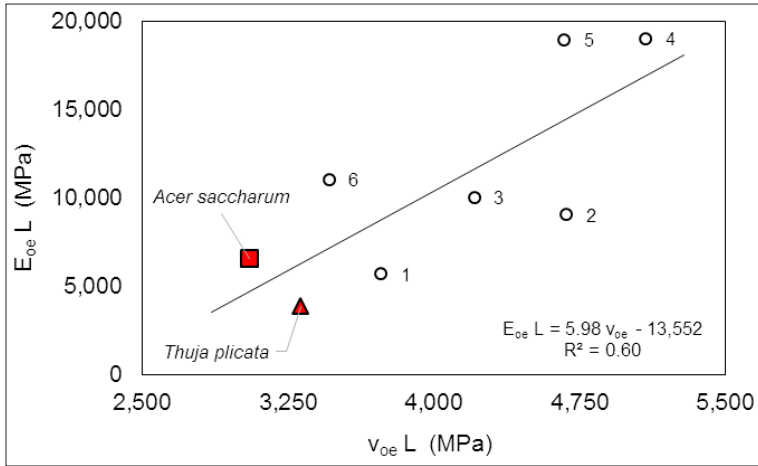


Figura 3. Dispersión del módulo dinámico (E_{oe}) en función de la velocidad de las ondas de esfuerzo (v_{oe}), ambas longitudinales, de *A. saccharum* y *T. plicata* y de seis especies mexicanas [8]. La numeración de los puntos en la figura corresponde a la lista de seis especies de la Tabla 1.

La velocidad de transmisión de una onda mecánica en la madera está fundamentada en la propiedad que tiene para almacenar y disipar energía. Cada especie de madera posee una densidad, una velocidad de onda y un módulo dinámico particulares. Estas características están relacionados con la composición química [20] y la morfología de cada madera [13]. Esta combinación de propiedades únicas de cada especie puede explicar la diferencia entre resultados.

C. Anisotropía

La Tabla 3 presenta las relaciones de anisotropía entra las direcciones longitudinal y tangencial. Estos resultados fueron calculados con los datos de las mediciones en cada una de las 32 probetas de cada especie estudiada.

Tabla 3. Relaciones de anisotropía

	$v_{oe} L / v_{oe} T$	$E_{oe} L / E_{oe} T$	$v_{oe} L / v_{oe} T$	$E_{oe} L / E_{oe} T$
	<i>Acer saccharum</i>		<i>Thuja plicata</i>	
x	3,11	9,79	18,49	5,11
σ	0,34	2,16	10,97	1,78
CV	11,06	22,01	59,30	34,75

v = Velocidad de onda; E = Módulo dinámico; oe = Ondas de esfuerzo; L = Longitudinal; T = Tangencial; x = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Las magnitudes de los parámetros según la dirección de observación denota el carácter anisotrópico de la madera. La anisotropía de la velocidad para las especies presentadas en la Tabla 3, explica que la velocidad es mínima en la dirección tangencial y máxima en la dirección longitudinal de la madera. Igualmente, el módulo dinámico en la dirección longitudinal es mayor al correspondiente a la dirección tangencial de las ondas de esfuerzo.

La relación de anisotropía de las velocidades del ultrasonido entre las direcciones longitudinal y tangencial ($v_{oe L} / v_{oe T}$), concuerdan con los reportados por [19]: 4,70 para maderas gimnospermas. De la misma manera, [21] reportan coeficientes de anisotropía para *Cryptomeria japonica* de 3,12 y para *Chamaecyparis obtusa* de 3,23 para mediciones en la madera con ultrasonido. Igualmente, [22] reportan para *Cupressus arizonica* relaciones de anisotropía L/T para la velocidad del ultrasonido de 2,5, con densidad de 450 kg/m³, y un contenido de humedad de 12%. Por su parte, [23] reportan para *Picea abies* una relación de anisotropía de la velocidad del ultrasonido entre las direcciones longitudinal y tangencial de 4,65. De acuerdo con [23], valores altos de esta propiedad se aprovechan como un criterio de selección para maderas con vocación para la fabricación de instrumentos musicales.

Las maderas de gimnospermas presentan relaciones de anisotropía mayores a las de especies angiospermas. [4] reportan para el módulo dinámico determinado con métodos dinámicos, relaciones de anisotropía para las direcciones longitudinal-tangencial de 18,5 para maderas de gimnospermas y de 15,4 para maderas de angiospermas.

IV. CONCLUSIONES

Las razones de la resistencia mecánica longitudinal entre la resistencia mecánica tangencial-radial de las maderas *A. saccharum* y *T. plicata* son diferentes entre sí. La razón de la madera *A. saccharum* es 92 %, mayor comparada con la razón de la madera *T. plicata*.

Para el caso de estudio, existe una diferencia significativa entre la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y del módulo dinámico. La densidad de la madera de *A. saccharum* es mayor que la de *T. plicata*. En la dirección longitudinal, la velocidad y el módulo dinámico de *A. saccharum* son menores que los de *T. plicata*. En la dirección tangencial, la velocidad de *A.*

saccharum en mayor que la de *T. plicata*. En contraste, el módulo dinámico es menor. En comparación con la dirección tangencial, la velocidad y el módulo son mayores en la dirección longitudinal en ambas especies.

REFERENCIAS

- [1] S. Kawamoto, R. S. Williams, "Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites - a review", *Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI: Forest Products Laboratory, 2002.
- [2] R. F. Pellerin, R. J. Ross, "Nondestructive evaluation of wood", *Peachtree Corners, GA.*, Forest Products Society, 2002.
- [3] J. R. Sotomayor Castellanos, J. M. Villaseñor Aguilar, "Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis* sp.", *Madera y Bosques*, vol. 12, no. 2, pp. 3-15, 2006.
- [4] I. Brémaud, J. Gril, B. Thibaut, "Anisotropy of wood vibrational properties: Dependence on grain angle and review of literature data", *Wood Science and Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 735-754, 2011. doi: 10.1007/s00226-010-0393-8.
- [5] G. Íñiguez, F. Arriaga, M. Esteban, R. Argüelles, "Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural", *Informes de la Construcción*, vol. 59, no. 506, pp. 97-105, 2007.
- [6] M. Spycher, F. W. M. R. Schwarze, R. Steiger, "Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties", *Wood Science and Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 325-342, 2008. doi: 10.1007/s00226-007-0170-5.
- [7] U. G. K. Wegst, "Bamboo and wood in musical instruments", *Annual Review of Materials Research*, vol. 38, no. 1, pp. 323-349, 2008. doi: 10.1146/annurev.matsci.38.060407.132459.
- [8] J. R. Sotomayor Castellanos, "*Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*", Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.3497.4884.
- [9] L. I. Guridi, A. García, "*Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho*", Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1997.
- [10] V. Bucur, *Acoustics of Wood*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [11] R. M. French, *Technology of the Guitar*. New York: Springer Science, 2012.

- [12] I. Brémaud, Y. El Kaïm, D. Guibal, M. Minato, B. Thibaut, J. Gril, "Characterization and categorization of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types", *Annals of Forest Science*, vol. 69, no. 3, pp. 373-386, 2012. doi: 10.1007/s13595-011-0166-z.
- [13] J. C. F. Walker, *Primary Wood Processing*. Dordrecht: Springer, 2006.
- [14] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*. Madison: Forest Products Laboratory, 2010.
- [15] *Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*, ISO 13061-2:2014.
- [16] *Physical and Mechanical Properties of Wood - Test Methods for Small Clear Wood Specimens - Part 1: Determination of Moisture Content for Physical and Mechanical Tests*, ISO 13061-1, 2014.
- [17] H. Gutiérrez, R. de la Vara, *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: Mc Graw Hill, 2012.
- [18] J. R. Sotomayor Castellanos, M. Ramírez Pérez, "Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación", *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 9, no. 3, pp. 3-29, 2013.
- [19] J. R., Sotomayor Castellanos, L. I. Guridi Gómez, T. García Moreno, "Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos", *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 6, no. 1, pp. 3-32, 2010.
- [20] D. Fengel, G. Wegener, *Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Remagen: Kessel Verlag, 2003.
- [21] M. Hasegawa, M. Takata, J. Matsumura, K. Oda, "Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood", *Ultrasonics*, vol. 51, no. 3, pp. 296-302, 2011. doi: 10.1016/j.ultras.2010.10.001.
- [22] M. Roohnia, A. Tajdini, N. Manouchehri, "Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy", *NDT & E International*, vol. 44, no. 1, pp. 13-20, 2011. doi: 10.1016/j.ndteint.2010.09.001.
- [23] V. Bucur, N. Declercq, "The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique", *Ultrasonics*, vol. 44, pp. 829-831, 2006. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.203.