

Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera  
de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L.

Javier-Ramón Sotomayor-Castellanos<sup>1</sup>  
José-María Villaseñor-Aguilar<sup>2</sup>

## Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar el módulo de rigidez y el módulo dinámico de la madera de *Thuja plicata* L. y *Acer saccharum* Marshall. Se prepararon probetas circulares para las pruebas de ultrasonido y de forma cuadrada para las pruebas de vibraciones en torsión. La densidad de la madera se determinó adaptando la norma ISO 13061-2:2014 y el contenido de humedad se determinó adaptando la norma ISO 13061-1:2014. Para determinar el módulo dinámico, se midió el tiempo de transmisión de las ondas de ultrasonido, para enseguida calcular la velocidad de transmisión del ultrasonido, entre dos posiciones en los extremos del plano longitudinal-tangencial de las probetas. Para determinar el módulo de rigidez, las pruebas de vibración en torsión adaptaron las normas ASTM

## Abstract

### **Rigidity and Dynamic Module of *Acer saccharum* Marshall and *Thuja plicata* L. woods.**

The research goal was to determine the modulus of rigidity and the dynamic modulus of the *Thuja plicata* and *Acer saccharum* woods. Circular specimens were prepared for the ultrasound tests and square specimens for the vibration in torsion tests. The wood density was calculated by following the ISO 130612: 2014 standard and the moisture content by following the ISO 130611: 2014 standard. To calculate the modulus of elasticity, the transmission time of the ultrasound waves between two positions at the ends of the longitudinal-tangential plane of the specimens was measured; subsequently the transmission speed of the ultrasound waves was calculated. To calculate the modulus of rigidity the

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México; [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

2. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México; [osmavia@yahoo.com.mx](mailto:osmavia@yahoo.com.mx)

Recibido: 03/11/2016  
Aceptado: 16/11/2016

C1259-14 y ASTM E1876-09. Después de verificarse la normalidad de las muestras mediante pruebas de sesgo y apuntalamiento, se diseñaron pruebas *t* de Student y se verificó una diferencia estadística entre las características físicas y mecánicas de *T. plicata* y de *A. saccharum*. Ambas especies presentan relaciones de anisotropía que confirman el carácter ortotrópico de la madera. Los módulos de rigidez y dinámicos de *A. saccharum* son más grandes que los de *T. plicata*.

**Palabras clave:** *Acer saccharum*, *Thuja plicata*, México, torsión, frecuencia natural, ultrasonido, módulo de rigidez, módulo dinámico, anisotropía.

## Introducción

Los módulos de rigidez y dinámico de la madera, determinados respectivamente a partir de la frecuencia natural de vibración y de la velocidad del ultrasonido, son, entre otros, parámetros importantes en la caracterización mecánica de este material. Esta valoración tecnológica de la madera, encuentra aplicación práctica en la fabricación de instrumentos musicales (Brénaud, El Kaïm, Guibal, Minato, Thibaut & Gril, 2012) y en productos de madera de alto valor agregado (Walker, 2006). Algunas de las funciones principales de los componentes de madera en un instrumento musical, son la radiación del sonido y la capacidad de deformación en condiciones de vibración (Roohnia, Tajdini & Manouchehri, 2011). De tal forma, que para la determinación de descriptores mecánicos de estos fenómenos, es recomendable el empleo de métodos dinámicos como el ultrasonido y las vibraciones (Se Golpayegani, Brénaud, Gril, Thevenon, Arnould & Pourtahmasi, 2012). Ahora bien, las aplicaciones principales de la madera como elemento constitutivo de productos de alta calidad, es en proyectos de diseño basados en el conocimiento de las características física y mecánicas de la madera. Por ejemplo, su densidad y su módulo de elasticidad (Ashby, 2011).

Desde un punto de vista analítico, la utilidad práctica de estos parámetros, es resumida, por una parte, en el hecho de que la frecuencia natural de vibración de una pieza de madera, es un descriptor de la señal acústica emitida y depende de la cantidad de masa y dimensiones de una pieza de madera (Bucur, 2006). Por otra, la velocidad del ultrasonido, una magnitud intensiva, explica la capacidad de la madera para transmitir una onda mecánica, en este caso una onda acústica. Este descriptor varía según la dirección de anisotropía de la madera, de su contenido de humedad y del método de determinación, pero sobre todo, de la especie en cuestión (Roohnia et al., 2011).

vibration in torsion tests followed the ASTM C125914 and the ASTM E1876-09 standards. Afterwards verifying the normality of the samples by means of its skewness and kurtosis parameters, *t Student* tests were designed and a statistical difference was verified between the *T. plicata* and the *A. saccharum* woods. Both species showed anisotropic relationships that corroborated the wood orthotropic behavior. The modulus of rigidity and the dynamic modulus of the *A. saccharum* are greater than the correspondents of the *T. plicata*.

**Keywords:** *Acer saccharum*, *Thuja plicata*, Mexico, torsion, natural frequency, ultrasound, modulus of rigidity, dynamic modulus, anisotropy.

Por su parte, el módulo de elasticidad indica la capacidad de una madera para almacenar energía y su capacidad de deformarse en el dominio de las pequeñas deformaciones (Walker, 2006). El módulo dinámico es, de igual forma, una magnitud intensiva de la madera y representa la cantidad de energía elástica que puede almacenar un volumen de madera. Esta propiedad depende entre otros factores, del contenido de humedad, de la anisotropía y del método de determinación (Bodig & Jayne, 1982). Igualmente y entre otros autores, Ilic (2003), reporta que este parámetro es función de la densidad de la madera. Una densidad baja, combinada con un alto módulo dinámico, son un buen criterio de selección de una madera con potencial para su incorporación como elemento constitutivo en un instrumento musical (Brénaud et al., 2012).

El módulo de rigidez expresa la capacidad para las pequeñas deformaciones angulares de una pieza de madera, cuando son provocadas por solicitaciones desalineadas, de tal forma que su rigidez explica la capacidad de deformación entre dos direcciones anisotrópicas de la madera (Bodig & Jayne, 1982).

Otro de los parámetros importantes en la caracterización acústica de una madera es su relación de anisotropía. Es decir, la diferencia de magnitud entre las propiedades mecánicas, según la dirección de observación o medición de que se trate. Para el caso de madera sólida, la madera se define como un material con anisotropías de tipo ortotrópico (Bodig & Jayne, 1982). Mientras más grande es la magnitud de la anisotropía entre las propiedades mecánicas de una madera, está en más apreciada por los fabricantes y usuarios de instrumentos musicales (Roohnia et al., 2011).

En resumen: un buen componente de madera para un instrumento musical requiere básicamente altos valores del módulo dinámico, bajos valores de densidad y altas relaciones de anisotropía (Se Golpayegani et al., 2012).

Las características físicas de la madera de *A. rubrum* y *T. plicata* están documentadas, entre otros autores, por Bucur (2006), quien menciona estas maderas como de uso generalizado en la elaboración de instrumentos musicales de cuerda. French (2012) señala estas especies en la fabricación de guitarras. Brémaud et al. (2012), reportan para *A. saccharum* y *T. plicata*, valores de su densidad y de su módulo dinámico determinados con vibraciones transversales. Walker (2006) y Forest Products Laboratory (2010) reportan empleos y características tecnológicas de estas maderas. Ahora bien, el análisis bibliográfico sobre la caracterización mecánica de *A. saccharum* y *T. plicata*, constató la carencia de información sobre pruebas de vibraciones en torsión y de ultrasonido, aplicadas en el estudio de estas especies.

Con el propósito de proporcionar al diseñador y al ingeniero datos de *T. plicata* y *A. saccharum*, para su aplicación en el diseño y cálculo de productos de madera, el objetivo de la investigación fue determinar los módulos de rigidez y dinámico de estas especies.

A manera de hipótesis de trabajo, la investigación propone que la densidad y los módulos de rigidez y dinámico de *T. plicata* y *A. saccharum*, son diferentes. La validez de esta propuesta, se restringe al estudio de una muestra de madera, representativa de las dos especies, y a los resultados obtenidos de pruebas dinámicas de torsión y de ultrasonido.

## Materiales y métodos

Se recolectaron 20 piezas de madera de *Acer saccharum* Marshall y 20 de *Thuja plicata* L., 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 4 años en una cámara con una temperatura de 20 °C ( $\pm 2$  °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %), hasta que su peso fue constante.

Para las pruebas de ultrasonido, las piezas de madera fueron recortadas en probetas de forma circular (Figura 1). El diámetro de las probetas de *A. saccharum* fue de 0,125 m y el de *T. plicata* fue de 0,15 m. El espesor fue de 0,015 m para las probetas de las dos especies. Después de efectuadas las pruebas de ultrasonido, para las pruebas de vibraciones en torsión, las probetas circulares, posteriormente fueron recortadas en probetas de forma cuadrada con dimensiones de 0,085 m de lado y espesor de 0,015 m (Figura 2).

La densidad de la madera ( $\rho_{CH}$ ), correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con la relación peso al momento del ensayo/volumen al momento del ensayo. La densidad básica ( $\rho_0$ ) se determinó en un grupo

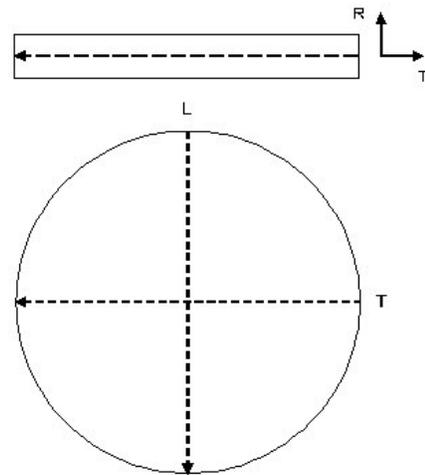


Figura 1. Diagrama de la probeta y direcciones de medición. L = Dirección longitudinal, T = Dirección tangencial, R = Dirección radial. Las flechas discontinuas indican la dirección del ultrasonido.

Figure 1. Test tube diagram and measurement direction. L = longitudinal direction, T = tangential direction, R = radial direction. Dashed arrows indicate ultrasound direction.

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 el volumen de ésta en estado saturado, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014a). El contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo se determinó con la relación peso al momento del ensayo en relación al peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (ISO, 2014b).

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir la velocidad de transmisión del ultrasonido, entre dos posiciones en los extremos del plano longitudinal-tangencial de las probetas (Figura 1), empleando el aparato *Sylvatest®*, con frecuencia de 22 KHz. En la primera posición se colocó el sensor emisor del ultrasonido y en la segunda, se colocó el sensor receptor. La primera medición se realizó en la dirección longitudinal (L) de la probeta. La segunda, se realizó en la dirección tangencial (T). La velocidad de onda se calculó con el cociente de la distancia entre los sensores emisor-receptor y el tiempo medido por el aparato. El módulo dinámico se calculó con la fórmula (1) propuesta por Pellerin & Ross (2002):

$$E_{US} = \rho_{CH} v_{US}^2$$

Donde:

$E_{us}$  = Módulo de elasticidad dinámico (Pa)

$\rho_{CH}$  = Densidad ( $kg/m^3$ )

$v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido (m/s)

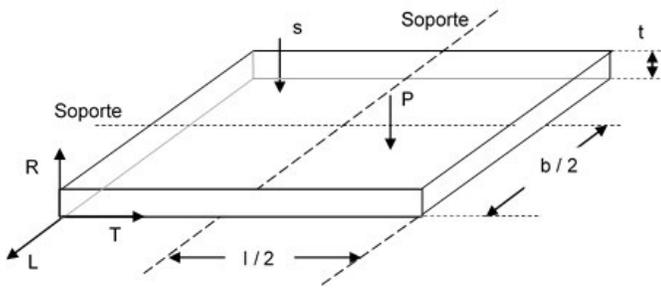


Figura 2. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho). Adaptado de la norma ASTM C1259 (ASTM International, 2014).

Figure 2. Diagram of vibration in twist test. P: position to apply the impact; s: position to measure the natural frequency; R: radial direction (t: thickness); T: tangential direction (l: large); L: longitudinal direction (b: width).

El módulo de elasticidad dinámico es rubricado con el subíndice “us” para identificarlo como derivado de pruebas de ultrasonido.

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14 (ASTM International, 2014). La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz. La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo que ocasionó vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma, que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial, conforme al modelo elástico propuesto por Sotomayor-Castellanos & Hernández-Maldonado (2012).

De acuerdo con la norma ASTM E1876-09 (ASTM International, 2009), se aplicó un impacto empleando una esfera de acero de 0,005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0,01 m de longitud y de 0,002 m de espesor por 0,007 m de ancho. El impacto fue aplicado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0,25 del ancho b y a 0,25 del largo l de cada espécimen (Figura 2). Empleando el aparato Grindosonic®, se registró el movimiento de la probeta en el punto s, en una posición simétrica respecto al punto de impacto. La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual a su vez, es convertida en la frecuencia natural f del sistema, con una precisión de lectura de 0,005 %.

El módulo de rigidez dinámico de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (2) (ASTM International, 2014):

$$G_{LT} = \frac{4 l m f_{LT}^2}{b t} \left( \frac{B}{(1 + A)} \right)$$

CON:

$$A = \frac{0,5062 - 0,8776 \left( \frac{b}{t} \right) + 0,3504 \left( \frac{b}{t} \right)^2 - 0,0078 \left( \frac{b}{t} \right)^3}{12,03 \left( \frac{b}{t} \right) + 9,892 \left( \frac{b}{t} \right)^2}$$

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left( \frac{t}{b} \right) - 2,52 \left( \frac{t}{b} \right)^2 + 0,21 \left( \frac{t}{b} \right)^6}$$

Donde:

$G_{LT}$  = Módulo de rigidez dinámico (Pa)

$f_{LT}$  = Frecuencia natural (Hz)

m = masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m)

t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m)

A y B = Factores de ajuste geométrico

El módulo de rigidez dinámico es rubricado con el subíndice “LT” para identificarlo como derivado de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

## Diseño experimental

Se diseñaron dos experimentos siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido & de la Vara (2012). Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera ( $\rho_{CH}$ ), la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal ( $v_{us L}$ ), la velocidad del ultrasonido en la dirección tangencial ( $v_{us T}$ ), el módulo dinámico longitudinal ( $E_{us L}$ ), el módulo dinámico tangencial ( $E_{us T}$ ), la frecuencia natural ( $f_{LT}$ ) y el módulo de rigidez en el plano longitudinal-tangencial ( $G_{LT}$ ). La especie se consideró el factor de variación. Para cada variable de respuesta se calcularon la media ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV).

Para confirmar que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales, el primer experimento consistió en pruebas de normalidad para cada variable, calculando el apuntalamiento y el sesgo, ambos con un rango permitido de -1 a +2,

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 se contrastó con la hipótesis alterna. Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para cada una de las dos especies en estudio. La comparación se orientó en pares de muestras independientes correspondientes a variables similares, pero de diferente especie.

Adicionalmente, se calculó para las dos especies, las relaciones de anisotropía entre las direcciones longitudinal y tangencial para las variables de respuesta  $v_{us}$  y  $E_{us}$ .

Se efectuaron pruebas con 32 réplicas (probetas por especie), totalizando 64 muestras observadas para cada una de las siete variables de respuesta. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics®*.

## Resultados y discusión

### Características físicas y mecánicas

El Cuadro 1 presenta las características físicas y mecánicas de la madera de *A. saccharum* y *T. plicata*. Los valores promedio de las características dinámicas, su desviación estándar y coeficiente de variación, son similares a los reportados por Bucur (2006). Las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos longitudinales de las dos especies fueron mayores que las velocidades y módulos dinámicos tangenciales, resultado que confirma el carácter anisotrópico de la madera (Bodig & Jayne, 1982).

La velocidad del ultrasonido y la densidad de la madera son parámetros medidos directamente en la probeta de madera, mientras que el módulo dinámico es calculado a partir de estos. La densidad es un descriptor de la estructura celular, expresada particularmente como porosidad. Sin embargo, las ondas de ultrasonido viajan a través de las paredes celulares de los diferentes tipos y orientaciones que constituyen tejidos celulares que conforman a su vez el plano leñoso. La magnitud de los resultados derivados de las pruebas de ultrasonido, son similares a los reportados en la bibliografía (Bucur, 2006, Kránitz, Deublein & Niemz, 2014).

Estas estructuras anatómicas son particulares a cada especie y resultan en la propiedad para transmitir una onda sonora. Esta propiedad varía entonces de acuerdo al acomodo del tejido celular en la madera. En la dirección longitudinal, el sonido se transmite empleando las paredes de los elementos tubulares en su dirección longitudinal. En cambio, en la dirección radial, el ultrasonido necesita pasar a través de las capas que forman un anillo de crecimiento y los elementos de rayo que están orientados en la dirección radial. Probablemente, estas razones dan como resultado, que la velocidad del ultrasonido de *A. saccharum* es mayor que la de *T. plicata*.

Las frecuencias naturales y los módulos de rigidez de *A. saccharum* fueron mayores que los correspondientes a *T. plicata*, resultado que confirma la diferencia de módulos de rigidez entre estas especies reportada por Brémaud et al. (2012). Un razonamiento análogo al de las pruebas de ultrasonido puede ser aplicado para las pruebas de torsión: las vibraciones ponen en movimiento los tejidos celulares, y debido al complejo acomodo y variabilidad en escala local de estos, cada probeta observada reporta una frecuencia natural diferente, que resulta en coeficientes de variación importantes.

Günay & Orçan (2007) reportan valores promedio del módulo de rigidez para el plano longitudinal-tangencial, en madera con un contenido de humedad promedio de 6 %, para *Pinus* spp. de 2 630 MPa, para *Castanea* spp. de 880 MPa y para *Fagus* spp. de 1870 MPa. Los coeficientes de variación reportados por estos autores son del mismo orden que los calculados para *A. saccharum* y *T. plicata*. Cualitativamente, los resultados del cuadro 1, concuerdan con los de estos autores: La respuesta de la madera solicitada en torsión es flexible. Su comportamiento es afectado por la estructura anatómica del material.

Cuadro 1. Características físicas y mecánicas de *A. saccharum* y *T. plicata*.

Table 1. Physic and mechanic features of *A. saccharum* and *T. plicata*.

	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{US} L$ (m/s)	$E_{US} L$ (MPa)	$v_{US} T$ (m/s)	$E_{US} T$ (MPa)	$f_{LT}$ Hz	$G_{LT}$ (MPa)
<i>Acer saccharum</i>							
$\bar{X}$	688	5 918	24 686	1 371	1 337	2 464	1 119
$\sigma$	65	602	5 172	103	280	165	198
CV	9,49	10,17	20,95	7,49	20,96	6,71	17,72
<i>Thuja plicata</i>							
$\bar{X}$	353	5 610	11 126	1 198	530	1 808	320
$\sigma$	33	643	2 766	314	286	449	135
CV	9,49	11,46	24,86	26,22	54,02	24,85	42,33

$\rho_{CH}$  = Densidad;  $v_{US}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{US}$  = Módulo dinámico;  $f_{LT}$  = Frecuencia natural;  $G_{LT}$  = Módulo de rigidez; R = Radial; T = Tangencial; L = Longitudinal;  $\bar{X}$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.

Cuadro 2. Valores de sesgo y apuntalamiento de *A. saccharum* y *T. picata*.

Table 2. Skew and shoring values of *A. saccharum* and *T. picata*.

	<i>Acer saccharum</i>		<i>Tuja plicata</i>	
	Sesgo	Apuntalamiento	Sesgo	Apuntalamiento
$\rho_{CH}$	-0,630	-0,872	0,617	1,823
$V_{US} L$	-0,106	-0,149	-0,149	-0,491
$V_{US} T$	-1,704	0,827	1,917	-0,311
$E_{US} L$	0,987	-0,087	-0,305	-0,373
$E_{US} T$	-1,161	-0,061	1,673	0,843
$f_{LT}$	0,265	0,923	-1,076	-1,395
$G_{LT}$	-1,219	-0,066	-0,543	-1,040

$\rho_{CH}$  = Densidad;  $V_{US}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{US}$  = Módulo dinámico;  $f_{LT}$  = Frecuencia natural;  $G_{LT}$  = Módulo de rigidez; L = Longitudinal; T = Tangencial.

Las pruebas de sesgo y apuntalamiento verificaron que las muestras de todas las variables provienen de distribuciones normales (Cuadro 2). En efecto, durante las pruebas de laboratorio se observó una repetitividad importante en los parámetros medidos. De tal forma, que este resultado permite validar los datos.

Para todas las variables, las pruebas de diferencia de medias resultaron en valores P ( $\alpha = 0,05$ ) menores que 0,05 (Cuadro 3), de tal forma, que se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna para las variables en estudio. Es decir, entre las maderas de *T. plicata* y *A. saccharum* existe una diferencia significativa de densidades, velocidades del ultrasonido longitudinal y tangencial, frecuencias naturales y módulos de rigidez y dinámico.

### Relaciones de anisotropía

El Cuadro 4 presenta las relaciones de anisotropía para las direcciones longitudinal y tangencial. Los resultados son comparables con los de maderas empleadas en usos acústicos reportados por Bucur (2006) y con los reportados para maderas mexicanas por Sotomayor-Castellanos (2015). Una relación de anisotropía importante en una madera denota una vocación para ser utilizada en elementos de resonancia (Obataya, Ono & Norimoto, 2000).

### Posicionamiento de *Thuja plicata* y *Acer saccharum*

Con el objeto de posicionar los resultados de *T. plicata* y *A. saccharum*, con respecto a las características de otras maderas, la Figura 3 presenta la dispersión del módulo dinámico en la dirección longitudinal en función de la densidad. Además, para comparación, en la figura se presentan los datos de 23 especies mexicanas, determinados con ultrasonido y reportados por Sotomayor-Castellanos (2015). Los datos de las especies están relacionados en el Cuadro 5.

La densidad y el módulo de rigidez de *A. saccharum* y *T.*

*plicata* posicionan comparativamente a estas especies, en los extremos del intervalo que relaciona el módulo de rigidez y la densidad de las maderas de referencia. Este posicionamiento es conforme al formalismo en ciencias de la madera que a mayor densidad, mayor será su módulo de elasticidad. En este caso, la madera de *A. saccharum* es 250 % más elástica que la de *T. plicata*. Por tanto, los resultados de las especies aquí estudiadas, verifican porque son preferidas como maderas con calidad acústica.

Para situar en un contexto más amplio los resultados de *A. saccharum* y *T. plicata*, la figura 4 presenta la dispersión del módulo de rigidez, en función de la densidad de *A. saccharum* y *T. plicata* y se complementa para comparación con datos de referencias de siete maderas. Los autores, especies y datos de la Figura 4 son relacionados en el Cuadro 6. Estas especies están reportadas como empleadas para la fabricación de instrumentos musicales, o al menos, con buenas características tecnológicas para su uso en funciones acústicas.

En la figura 4 se presenta la línea discontinua que indica la tendencia general de la dispersión  $G_{LT} = f(\rho_{CH})$ . Para las maderas empleadas en funciones acústicas, el módulo de rigidez  $G_{LT}$  aumente con la densidad, hasta un máximo aproximado de 600 kg/m<sup>3</sup>. Con excepción de *T. baccata*. A partir de este punto, el módulo de rigidez tiende a disminuir. De manera que una densidad más alta, no garantiza un módulo de rigidez proporcionalmente mayor. Con todo, en este aspecto la madera de *A. saccharum* se posiciona favorablemente.

Ahora bien, si se conjugan los argumentos derivados de la interpretación, por una parte, de la Figura 3, referente al posicionamiento de *A. saccharum* y *T. plicata*, en perspectiva con los valores de 23 especies mexicanas, y por otra, del análisis de la Figura 4, relativo al posicionamiento de las maderas en cuestión, respecto a los datos bibliográficos igualmente, de maderas que

Cuadro 3. Valores P ( $\alpha = 0.05$ ) de las pruebas de diferencias de medias de *A. saccharum* y *T. picata*.

Table 3. P values ( $\alpha = 0.05$ ) for variance in measurement test of *A. saccharum* and *T. picata*.

		<i>Acer saccharum</i>					
		$\rho_{CH}$	$V_{US} L$	$E_{US} L$	$V_{US} T$	$E_{US} T$	$G_{LT}$
<i>Thuja plicata</i>	$\rho_{CH}$	< 0,0001					
	$V_{US} L$	0,0052					
	$E_{US} L$	< 0,0001					
	$V_{US} T$	0,0043					
	$E_{US} T$	< 0,0001					
	$G_{LT}$	< 0,0001					

$\rho_{CH}$  = Densidad;  $V_{US}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{US}$  = Módulo dinámico; L = Longitudinal; T = Tangencial; P < 0,05: Diferencia significativa para un nivel de confianza de 95 %.

Cuadro 4. Relaciones de anisotropía para las direcciones longitudinal y tangencial de *A. saccharum* y *T. picata*.

Table 4. Anisotropy relations for longitudinal and tangential directions of *A. saccharum* and *T. picata*.

	$V_{US} L/T$	$E_{US} L/T$	$V_{US} L/T$	$E_{US} L/T$
	<i>Acer saccharum</i>		<i>Thuja picata</i>	
$\bar{X}$	4,35	19,23	4,97	26,52

$V_{US}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{US}$  = Módulo dinámico; L/T = Longitudinal/Tangencial;  $\bar{X}$  = Media.

Cuadro 5. Datos de 23 especies mexicanas (Sotomayor-Castellanos, 2015).

Table 5. Data of 23 Mexican species (Sotomayor-Castellanos, 2015).

No.	Especie	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{US} L$ (MPa)
1	<i>Spathodea campalunata</i>	338	4 646
2	<i>Gyrocarpus americana</i>	391	7 884
3	<i>Abies religiosa</i>	399	14 942
4	<i>Tilia mexicana</i>	442	11 968
5	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	448	6 845
6	<i>Cupressus lindleyi</i>	486	11 111
7	<i>Cedrela odorata</i>	517	9 226
8	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	11 674
9	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	10 935
10	<i>Dalbergia paloescrito</i>	624	13 879
11	<i>Tabebuia rosea</i>	635	14 421
12	<i>Fagus mexicana</i>	642	13 854
13	<i>Andira inermis</i>	716	12 528
14	<i>Psidium sartorianum</i>	789	12 214
15	<i>Juglans pyriformis</i>	810	16 999
16	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	19 533
17	<i>Albizia plurijuga</i>	844	20 254
18	<i>Quercus spp.</i>	847	23 448
19	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	974	20 442
20	<i>Cordia elaeagnoides</i>	992	21 610
21	<i>Acosmium panamense</i>	1 005	20 889
22	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1 096	21 518
23	<i>Dalbergia granadillo</i>	1 147	22 821

$\rho_{CH}$  = Densidad;  $E_{US}$  = Módulo dinámico.

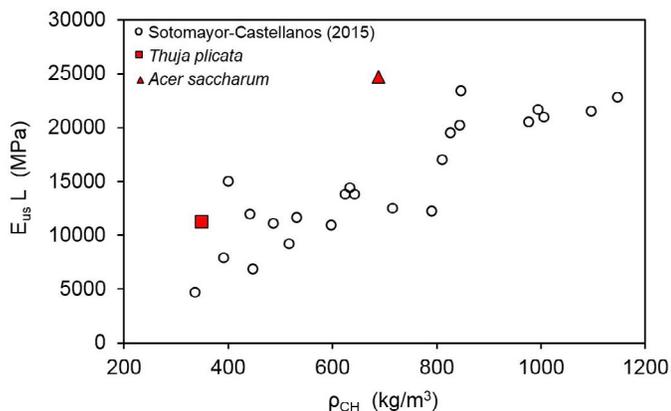


Figura 3. Dispersión del módulo dinámico longitudinal ( $E_{us} L$ ) en función de la densidad ( $\rho_{CH}$ ). Los valores de Sotomayor-Castellanos (2015), se refieren a 23 especies mexicanas (Cuadro 5).

Figure 3. Pattern of dynamic longitudinal module ( $E_{us} L$ ) depending on the density ( $\rho_{CH}$ ). Values of Sotomayor-Castellanos (2015) are referring to 23 Mexican species (Table 5).

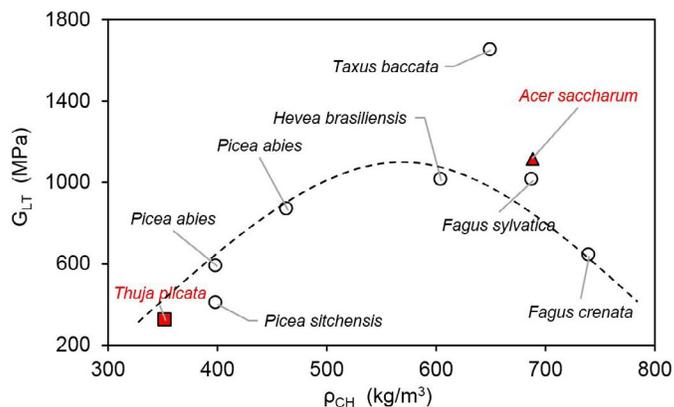


Figura 4. Dispersión del módulo de rigidez ( $G_{LT}$ ) en función de la densidad ( $\rho_{CH}$ ) de *A. saccharum* y *T. plicata* y datos de referencias bibliográficas de siete maderas (Cuadro 6). La línea discontinua indica la tendencia general de la dispersión  $G_{LT} = f(\rho_{CH})$ .

Figure 4. Pattern of rigidity modulus ( $G_{LT}$ ) depending on the density ( $\rho_{CH}$ ) of *A. saccharum* and *T. plicata* and bibliographic references for seven woods (Table 7). Dashed line indicates pattern general trend  $G_{LT} = f(\rho_{CH})$ .

Cuadro 6. Autores, especies y datos de la Figura 4.

Table 6. Authors, species and data of Figure 4.

Autor	Especie	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$G_{LT}$ MPa
Keunecke et al. (2007)	<i>Picea abies</i>	400	587
Yoshihara (2012b)	<i>Picea sitchensis</i>	400	400
Kránitz et al. (2014)	<i>Picea abies</i>	465	863
Nadir et al. (2014)	<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1 008
Keunecke et al. (2007)	<i>Taxus baccata</i>	650	1 650
Ozyhar et al. (2013)	<i>Fagus sylvatica</i>	689	1 010
Naruse (2003)	<i>Fagus crenata</i>	740	637

$\rho_{CH}$  = Densidad;  $G_{LT}$  = Módulo de rigidez.

son empleadas en aplicaciones acústicas, se induce que probablemente se puede relacionar la densidad de la madera, el módulo de rigidez y el módulo dinámico, como indicadores de calidad para maderas con vocación para la elaboración de instrumentos musicales.

## Conclusiones

Se determinaron el módulo de rigidez y el módulo dinámico de *A. saccharum* y de *T. plicata* empleando pruebas de carácter no destructivo. Para el caso del módulo de rigidez, las pruebas de torsión dinámica fueron efectivas. Igualmente, para la determinación del módulo dinámico, la técnica de ultrasonido se encontró rápida y eficiente.

La densidad de la madera de *A. saccharum* es 95 % mayor que la de *T. plicata*. Igualmente, la madera de *A. saccharum* es más flexible que la de *T. plicata*. Este

corolario es cierto tanto para los módulos de rigidez, como para los módulos dinámicos. Estos resultados permiten verificar la hipótesis de trabajo: la densidad y los módulos en cuestión, de *T. plicata* y *A. saccharum*, son diferentes.

El valor promedio del módulo de rigidez para las dos especies en estudio, es similar al de maderas reportado para en la bibliografía. Ambas especies presentan relaciones de anisotropía que confirman el carácter ortotrópico de la madera. El módulo dinámico de *A. saccharum* es más grande que el de *T. plicata*.

## Referencias

Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. Burlington: Elsevier.

- ASTM International. (2014). ASTM C1259-14. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA: Autor. doi: 10.1520/C1259
- ASTM International. (2009). ASTM E1876-09. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA: Autor. doi: 10.1520/E1876-09
- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Brémaud, I., El Kaïm, Y., Guibal, D., Minato, M., Thibaut, B. & Gril, J. (2012). Characterization and categorization of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science*, 69(3), 373-386. doi: 10.1007/s13595-011-0166-z
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood*. Berlin: Springer-Verlag.
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook-Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison: Autor.
- French, R. M. (2012). *Technology of the guitar*. New York: Springer Science.
- Günay, E & Orçan, Y. (2007). Experimental investigation of the mechanical behavior of solid and tubular wood species under torsional loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31(2), 89-118.
- Gutiérrez-Pulido, H. & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3), 167-172. doi: 10.1007/s00107-003-0367-8
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 13061-2:2014a. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland: Autor.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 13061-1:2014b. 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 Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland: Autor.
- Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteau, K., Lüthi, T. & Niemz, P. (2007). Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, 41(4):309-327. doi: 10.1007/s00226-006-0107-4
- 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. doi: 10.1617/s11527-013-0103-8
- Nadir, Y., Nagarajan, P. & Midhun, A. J. (2014). Measuring elastic constants of Hevea brasiliensis using compression and Iosipescu shear test. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(6), 749-758. doi: 10.1007/s00107-014-0842-4
- Naruse, K. (2003). Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *Journal of Wood Science*, 49(6), 479-484. doi: 10.1007/s10086-003-0515-0
- Obataya E., Ono T. & Norimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science*, 35(12), 2993-3001. doi: 10.1023/A:1004782827844
- Ozyhar, T., Hering, S., Sanabria, S. J. & Niemz, P. (2013). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, 47(2), 329-341. doi: 10.1007/s00226-012-0499-2
- Pellerin, R. F. & Ross, R. J. (Ed.). (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison: Forest Products Society.
- Roohnia, M., Tajdini, A. & Manouchehri, N. (2011). Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. *NDT & E International*, 44(1), 13-20. doi: 10.1016/j.ndteint.2010.09.001
- Se Golpayegani, A., Brémaud, I., Gril, J., Thevenon, M-F, Arnould, O. & Pourtahmasi, K. (2012). Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba*). *Journal of Wood Science*, 58(2), 153-162. doi: 10.1007/s10086-011-1225-7
- Sotomayor-Castellanos, J. R. & Hernández-Maldonado, S. A. (2012). Características elásticas de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 8(2), 3-78.
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. doi: 10.13140/RG.2.1.3497.4884
- Walker, J. C. F. (2006). *Primary Wood Processing. Principles and Practice*. Dordrecht: Springer.
- Yoshihara, H. (2012). Shear Modulus and Shear Strength Evaluation of Solid Wood by a Modified ISO 15310 Square-Plate Twist Method. *Drvna Industrija*, 63(1), 51-55. doi: 10.5552/drind.2012.1125