



## Módulo dinámico longitudinal determinado por ultrasonido en madera de tres angiospermas sólida y laminada

### Longitudinal dynamic modulus determined through ultrasound in three angiosperm solid and laminated woods

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>a\*</sup>

#### RESUMEN

**Objetivo:** determinar el módulo dinámico por ultrasonido en especímenes de madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*.

**Método:** se prepararon 35 probetas de madera sólida y 35 de madera laminada, con el fin de determinar su contenido de humedad, las densidades aparentes, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos.

**Resultados:** las magnitudes son diferentes entre los dos tipos de probetas. Tanto para la madera sólida como la laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*, las densidades aparentes se incrementan, pero las velocidades del ultrasonido disminuyen.

**Limitaciones:** los resultados se circunscriben al caso de estudio para las maderas de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. Las conclusiones se refieren a las condiciones experimentales detalladas en esta investigación.

**Principales hallazgos:** los módulos dinámicos de la madera laminada se incrementan en comparación con los parámetros de la madera sólida de *E. cyclocarpum* y *T. rosea*, pero disminuyen para *J. pyriformis*.

#### ABSTRACT

**Purpose:** To determine the dynamic modulus through ultrasound in *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* and *Juglans pyriformis* wooden specimens.

**Methodology:** 35 solid wood and 35 laminated wood specimens were prepared in order to determine their moisture content, apparent densities, ultrasound speeds and dynamic modules.

**Results:** The magnitudes are different between the two types of specimens. For both solid and laminated wood from *E. cyclocarpum*, *T. rosea* and *J. pyriformis*, apparent densities increase but ultrasound speeds decrease.

**Limitations:** Results are limited to the case study for *E. cyclocarpum*, *T. rosea* and *J. pyriformis* woods. The conclusions refer to the experimental conditions detailed in this investigation.

**Findings:** The dynamic modules of the laminated wood increase in comparison to the parameters of *E. cyclocarpum* and *T. rosea* solid woods but decrease for *J. pyriformis*.

\*Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Recibido: 27 de diciembre de 2018;  
aceptado: 22 de octubre de 2019.



**Palabras clave:** densidad aparente, velocidad del ultrasonido, *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea*, *Juglans pyriformis*.



**Keywords:** Apparent density, ultrasound speed, *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea*, *Juglans pyriformis*.



Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación. CC-BY-NC-ND

## INTRODUCCIÓN

El módulo dinámico es el parámetro mecánico que caracteriza a un material para fines de diseño y cálculo ingenieril. En el caso de vigas de madera laminada, el módulo dinámico se determina principalmente con dos enfoques. El primero consiste en estudiar experimentalmente vigas laminadas con dimensiones reales de empleo, cuyos resultados pueden aplicarse inmediatamente al cálculo estructural (Klapálek, Melzerová y Plachý, 2016; Sanabria *et al.*, 2011). Una segunda perspectiva es realizar pruebas mecánicas con pequeñas probetas de madera laminada y, con los ajustes necesarios, extrapolar los resultados para fines prácticos (Corigliano *et al.*, 2017; Del Menezzi *et al.*, 2013). Este segundo enfoque reduce la diversidad de las mediciones ocasionada por la heterogeneidad material de la madera, que es más evidente en piezas de gran tamaño, en comparación con probetas de pequeñas dimensiones.

Usualmente, el módulo de elasticidad de piezas de madera sólida y/o laminada se determina en condiciones de carga casi estáticas (Burdurlu *et al.*, 2007; Sikora, McPolin y Harte, 2016; Teles *et al.*, 2013). Sin embargo, las pruebas de ultrasonido son tecnología de carácter no destructivo que permite medir la velocidad de onda a través de una probeta y, al ponderarla con la densidad aparente del material, es posible determinar el módulo dinámico (Bachtiar *et al.*, 2017; Teder *et al.*, 2012).

La densidad aparente de la madera ( $\rho_{CH}$ ) es un indicador de la cantidad de masa de una pieza de madera laminada con relación a su volumen (Costa, De Rezende y Rodrigues *et al.*, 2014; Williamson y Wiemann, 2010). Este parámetro correlaciona estadísticamente con su resistencia mecánica (Christoforo *et al.*, 2017). Por su parte, la velocidad del ultrasonido en la madera depende, entre otros factores, de las estructuras macro y microanatómicas de cada especie, así como del contenido de humedad de la madera (Baar, Tippner y Gryc, 2012).

Para la correcta interpretación de los resultados experimentales de probetas de madera laminada de pequeñas dimensiones, es conveniente compararlos con datos provenientes de probetas similares, pero elaborados con madera sólida (Yavari *et al.*, 2015). Más aún, para explicar mejor el fenómeno, es pertinente comparar resultados entre varias especies con diferentes densidades, pero en condiciones experimentales iguales (Ahmad

*et al.*, 2017). Estos argumentos guiaron la estrategia experimental de la presente investigación.

Las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (Zepeda *et al.*, 2017), *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Pineda, Valdez y Pérez, 2016) y *Juglans pyriformis* Liebm. (Acosta *et al.*, 2011) son maderas endémicas de México y Centroamérica (Cordero y Boshier, 2003; Guibal, Paradis y Cerre, 2017). Tamarit y López (2007), Silva *et al.* (2010) y Sotomayor (2015) han proporcionado información sobre sus características tecnológicas.

Referente a su caracterización mecánica, para la madera sólida de *E. cyclocarpum*, con densidad aparente de 448 kg m<sup>-3</sup>, Sotomayor (2019) informa que el valor del módulo dinámico por ultrasonido es de 6 845 MN m<sup>-2</sup>, por ondas de esfuerzo de 5 179 MN m<sup>-2</sup> y por vibraciones transversales de 6 224 MN m<sup>-2</sup>. Igualmente, refiere que los valores del módulo de elasticidad en flexión estática son de 5 854 MN m<sup>-2</sup>. En el mismo sentido, para la madera sólida de *T. rosea*, con densidad aparente de 624 kg m<sup>-3</sup>, Sotomayor (2019) señala que el módulo dinámico por ultrasonido es de 1 4149 MN m<sup>-2</sup>, por ondas de esfuerzo de 8 751 MN m<sup>-2</sup> y por vibraciones transversales de 10 660 MN m<sup>-2</sup>. Asimismo, indica que los valores del módulo de elasticidad en flexión estática son de 10 323 MN m<sup>-2</sup>. Para la madera sólida de *J. pyriformis*, con densidad aparente de 761 kg m<sup>-3</sup>, Sotomayor (2019) reporta que el módulo dinámico por ultrasonido de 15 155 MN m<sup>-2</sup>, por ondas de esfuerzo es de 13 367 MN m<sup>-2</sup> y por vibraciones transversales de 12 187 MN m<sup>-2</sup>. Además, establece valores del módulo de elasticidad en flexión estática de 12 194 MN m<sup>-2</sup>.

Respecto a madera laminada de estas especies, Sotomayor (2018a) presenta módulos dinámicos por vibraciones transversales para *E. cyclocarpum* ( $\rho_{CH} = 501$  kg m<sup>-3</sup>) de 8 085 MN m<sup>-2</sup>, para *T. rosea* ( $\rho_{CH} = 626$  kg m<sup>-3</sup>) de 13 469 MN m<sup>-2</sup> y para *J. pyriformis* ( $\rho_{CH} = 740$  kg m<sup>-3</sup>) de 9 449 MN m<sup>-2</sup>. Paralelamente, Sotomayor (2018b) reporta módulos dinámicos determinados con vibraciones longitudinales para *E. cyclocarpum* de 6 170 MN m<sup>-2</sup>, para *T. rosea* de 13 080 MN m<sup>-2</sup> y para *J. pyriformis* de 10 769 MN m<sup>-2</sup>. Igualmente, y utilizando ondas de esfuerzo, Sotomayor (en prensa) señala que los módulos dinámicos para *E. cyclocarpum* son de 4 925 MN m<sup>-2</sup>, para *T. rosea* de 10 442 MN m<sup>-2</sup> y para

*J. pyriformis* de 8 321 MN m<sup>2</sup>. Asimismo, pero con ensayos de flexión estática, Sotomayor *et al.* (2019) reportan módulos de elasticidad para *E. cyclocarpum* de 5 423 MN m<sup>2</sup>, para *T. rosea* de 10 821 MN m<sup>2</sup> y para *J. pyriformis* de 9 133 MN m<sup>2</sup>. Sin embargo, durante la revisión de bibliografía, no se encontró información acerca de que el módulo dinámico longitudinal haya sido determinado con ultrasonido en madera laminada con las especies en estudio.

A manera de síntesis, se puede argumentar que los trabajos citados muestran la variabilidad en los resultados según la especie en estudio, así como la técnica empleada para la determinación de los módulos dinámicos y estáticos. De esto deriva que los resultados deben ser interpretados especie por especie y parámetro por parámetro.

Respecto a la caracterización de maderas laminadas elaboradas con otras especies, existe evidencia empírica de que la densidad aparente y el módulo dinámico de la madera laminada de una misma especie son mayores comparativamente a los de la madera sólida (Del Menezzi *et al.*, 2013). Sin embargo, esta aseveración difiere con otras investigaciones (Komariah *et al.*, 2015). En el mismo contexto, la literatura reporta, por un lado, que la velocidad de onda se correlaciona bien con la densidad de la madera (De Borst, Bader y Wikete, 2012; De Oliveira y Sales, 2006), resultados que son contradictorios con otras investigaciones (Baar *et al.*, 2012; Ponneth *et al.*, 2014; Sotelo *et al.*, 2017).

La presente investigación parte de la propuesta de Hanhijärvi, Ranta-Maunus y Turk (2005):

El fundamento teórico para determinar el módulo dinámico de la madera empleando métodos no destructivos, es la existencia de una relación entre este parámetro y uno o más indicadores de predicción. Esta correspondencia debe describirse matemáticamente. La relación exacta (determinista) no puede formularse debido a la complejidad de la madera. Empero, puede establecerse a partir de observaciones empíricas, es decir, de resultados experimentales y aplicando métodos estadísticos, generalmente el análisis de regresión (p. 21).

Así, la hipótesis de esta investigación propone que la densidad aparente y el módulo dinámico de la made-

ra laminada se incrementan en comparación con estos mismos parámetros de la madera sólida aun cuando sean de la misma especie. Esta hipótesis es verificable si se miden las densidades aparentes y las velocidades del ultrasonido en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida y laminada fabricadas con la misma especie. Por tanto, el objetivo de la investigación fue determinar el módulo dinámico por ultrasonido en probetas de madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*.

## METODOLOGÍA

### Diseño experimental

Se recolectaron piezas comerciales de madera aserrada de las especies *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis* en aserraderos del estado de Michoacán. Para las pruebas de ultrasonido, se prepararon dos grupos, el primero de madera sólida y el segundo de madera laminada. Se efectuaron pruebas con 35 réplicas (probetas por especie), recortadas al azar de las piezas de madera aserrada, para obtener 105 observaciones para cada una de las variables. Para su análisis se observaron los resultados especie por especie, como muestras independientes.

La elaboración de madera laminada se consideró como el tratamiento y factor de variación. De esa forma, se definieron dos niveles (estados de la madera): madera sólida (MS), y madera laminada (ML). Las variables de respuesta para MS y ML fueron la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ), la velocidad del ultrasonido ( $v_{us}$ ) y el módulo dinámico ( $E_{us}$ ). Las dimensiones de las probetas y el contenido de humedad se consideraron factores controlables y con variación mínima, de tal forma que no intervienen en el fenómeno observado. La variabilidad en la estructura anatómica y el adhesivo se consideraron factores que tampoco influyeron en el fenómeno.

Para todas las variables se calcularon la media ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación ( $CV = \sigma / \bar{x}$ ). Asimismo, se realizaron pruebas de normalidad en la distribución de los datos de cada muestra. El criterio de demarcación fue aceptar los valores calculados del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2].

Una vez confirmada la normalidad, el experimento consistió en la verificación de la varianza (Ver-var) y su análisis (Anova). Cuando no se verificó la normalidad de las muestras, se procedió a realizar pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis (K-W) de diferencia de medianas. Todas las pruebas se realizaron para un nivel del 95 % de confianza. El criterio de demarcación para las pruebas Ver-var, Anova y K-W fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa con un valor  $P < .05$ .

No obstante que el número de probetas por cada muestra fue de 35, cantidad suficiente para considerar la teoría de las grandes muestras en el análisis, se calculó *a posteriori* el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas. El número de probetas (réplicas) se calculó con la fórmula (1) (Gutiérrez y De la Vara, 2012):

$$n = \frac{2 \sigma^2}{e^2} \quad (1)$$

Donde:

- n = Tamaño de la muestra
- $\sigma$  = Desviación estándar
- e = Error de estimación aceptable

Un segundo enfoque en la estrategia experimental fue considerar como una sola muestra los 175 resultados de las variables de respuesta de las tres especies. Así, se determinaron las regresiones lineales ( $y = ax \pm b$ ) y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ), para la velocidad del ultrasonido ( $v_{us}$ ) y el módulo dinámico ( $E_{us}$ ) como variables dependientes de la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ).

Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones lineales fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner, Hrivnák y Kloiber (2016): correlación muy alta:  $1 \geq R^2 \geq .9$ ; correlación alta:  $.9 > R^2 \geq .7$ ; correlación media:  $.7 > R^2 \geq .4$ ; correlación baja:  $.4 > R^2 \geq .2$ ; y correlación nula:  $R^2 < .2$ .

### Materiales

Las probetas de madera sólida se prepararon siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 3129:2012 (Organización Internacional de Normalización [ISO, por sus siglas en inglés], 2012). Las dimensiones de estas fueron

de 0.02 m x 0.02 m de sección transversal, por 0.40 m de longitud; orientadas respectivamente en las direcciones de anisotropía del plano leñoso. Las probetas fueron almacenadas durante dos años en una cámara con una temperatura de 20°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2\%$ ), hasta lograr un peso constante.

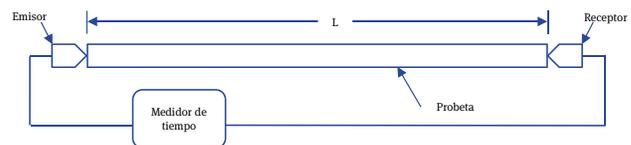
Las probetas de madera laminada fueron elaboradas con cinco laminas adheridas con pegamento de acetato de vinilo (2,5 kg m<sup>2</sup>). El tiempo de prensado fue de cuarenta y ocho horas en ambiente de laboratorio ( $T = 20^\circ\text{C}$  y humedad del aire = 65 %). Una vez fabricadas las probetas laminadas se almacenaron durante noventa días en la cámara de acondicionamiento con las condiciones antes citadas de temperatura y de humedad relativa del aire, hasta que alcanzaron un peso constante.

Después de efectuar las pruebas de ultrasonido, de cada uno de los extremos de las probetas, se recortó un segmento para los cálculos de contenido de humedad y de la densidad aparente. La madera de las probetas no contenía defectos de crecimiento ni duramen. Las dimensiones de estas probetas fueron de 0.02 m x 0.02 m de sección transversal, por 0.06 m de longitud. El contenido de humedad de la madera se calculó por el método de diferencia de pesos, según establece la norma ISO 13061-1: 2014 (ISO, 2014a). La densidad aparente de la madera al momento del ensayo se determinó con la relación peso/volumen de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014b).

### Métodos

La velocidad del ultrasonido se calculó con el cociente entre la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión medido con el aparato *Sylvatest*® (figura 1). Los parámetros definidos a continuación tienen el subíndice “us”, para representar que son parámetros derivados de pruebas de ultrasonido.

**Figura 1. Pruebas de ultrasonido. L = Longitud de la probeta**



Fuente: elaboración propia.

El módulo dinámico se calculó con la fórmula (2) (Pellerin y Ross, 2002):

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

Donde:

$E_{us}$  = Módulo dinámico (N m<sup>-2</sup>)

$v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido (m s<sup>-1</sup>)

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente a un contenido de humedad CH (kg m<sup>-3</sup>)

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Contenido de humedad

La tabla 1 presenta los contenidos de humedad de la madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. El contenido de humedad promedio de la madera fue de 10 %, con un mínimo de 9.3 % y un máximo de 10.8 %. Llana *et al.* (2014), empleando el mismo aparato utilizado en esta investigación (*Sylvatest*®), reportan un factor de corrección en la disminución de la velocidad del ultrasonido que varía entre 0.08 % y 0.53 %, por cada por ciento del contenido de humedad de la madera, siempre abajo del punto de saturación de la fibra. De tal forma, para fines prácticos, en esta investigación se considera que la madera estuvo seca y que la variación de su contenido de humedad no intervino de manera significativa en los resultados.

**Tabla 1. Contenidos de humedad**

	<i>E. cyclocarpum</i>		<i>T. rosea</i>		<i>J. pyriformis</i>	
	MS	ML	MS	ML	MS	ML
$\bar{x}$	10.78	10.49	10.74	9.66	9.28	9.46
$\sigma$	0.66	0.67	0.49	0.64	0.81	0.97
CV	6.1	6.4	4.6	6.6	8.7	10.3

Nota: MS = Madera sólida; ML = Madera laminada;  $\bar{x}$  = Media en porcentaje;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación porcentual.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 2 presenta las densidades aparentes, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. También, presenta las diferencias aritméticas entre los resultados correspondientes a la madera laminada y a la madera sólida.

**Tabla 2. Densidad aparente, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico**

	Madera sólida			Madera laminada			Diferencias		
	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$v_{us}$ (m s <sup>-1</sup> )	$E_{us}$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$v_{us}$ (m s <sup>-1</sup> )	$E_{us}$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\Delta\rho_{CH}$ (%)	$\Delta v_{us}$ (%)	$\Delta E_{us}$ (%)
<i>E. cyclocarpum</i>									
$\bar{x}$	456	3940	7083	501.1	3852	7452	+9.9	-2.2	+5.2
$\sigma$	47.2	163	921	38.4	205	1008	-	-	-
CV	10.4	4.1	13.0	7.7	5.3	13.5	-26.0	+29.3	+3.8
<i>T. rosea</i>									
$\bar{x}$	621	4966	15294	693	4936	16891	+11.6	-0.6	+10.4
$\sigma$	44.7	283	1440	51.7	116	1490	-	-	-
CV	7.2	5.7	9.4	7.5	2.4	8.8	+4.2	-57.9	-6.4
<i>J. pyriformis</i>									
$\bar{x}$	695	4380	13371	740	4189	13041	+6.5	-4.4	-2.5
$\sigma$	57.5	273	1989	51.5	205	1744	-	-	-
CV	8.3	6.2	14.9	7.0	4.9	13.4	-15.7	-21.0	-10.1

Nota:  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{us}$  = Módulo dinámico;  $\Delta$  = Diferencia aritmética;  $\bar{x}$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación porcentual.

Fuente: elaboración propia.

### Análisis estadístico

La tabla 3 presenta los resultados del análisis estadístico. Para las 18 muestras analizadas, con excepción de la velocidad del ultrasonido para la madera sólida y laminada de *J. pyriformis*, las pruebas de normalidad, de verificación de varianza y de análisis de varianza resultaron con valores fuera de los rangos para el criterio de demarcación [-2, +2] propuesto por el diseño experimental. En consecuencia, el análisis estadístico está sustentado en los resultados de las pruebas de diferencias de medianas.

**Tabla 3. Resultados del análisis estadístico**

	Madera sólida		Madera laminada		Ver-var	Anova	K-W
	SE	AE	SE	AE			
	$\rho_{CH}$						
<i>E. cyclocarpum</i>	1.7544	0.8555	-2.0437	2.2252	-	-	< .001*
<i>T. rosea</i>	-3.2589	3.5700	4.2022	4.6152	-	-	< .001*
<i>J. pyriformis</i>	3.6258	2.8539	1.3242	-0.3560	-	-	< .001*
	$v_{us}$						
<i>E. cyclocarpum</i>	-1.9744	0.9313	5.3059	9.5751	-	-	< .001*
<i>T. rosea</i>	-1.9911	1.6119	-0.8947	-0.3023	.0028*	-	.1731
<i>J. pyriformis</i>	0.9811	0.1495	-0.9441	0.0271	.2646	.0015*	-
	$E_{us}$						
<i>E. cyclocarpum</i>	0.5943	-0.2608	5.1421	10.0781	-	-	.1168
<i>T. rosea</i>	-3.3588	3.9311	3.4116	3.7879	-	-	.0001*
<i>J. pyriformis</i>	1.6031	-0.2609	0.8769	0.4501	-	-	.7378

Nota:  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{us}$  = Módulo dinámico; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; \*P < .05; Existe una diferencia estadísticamente significativa.

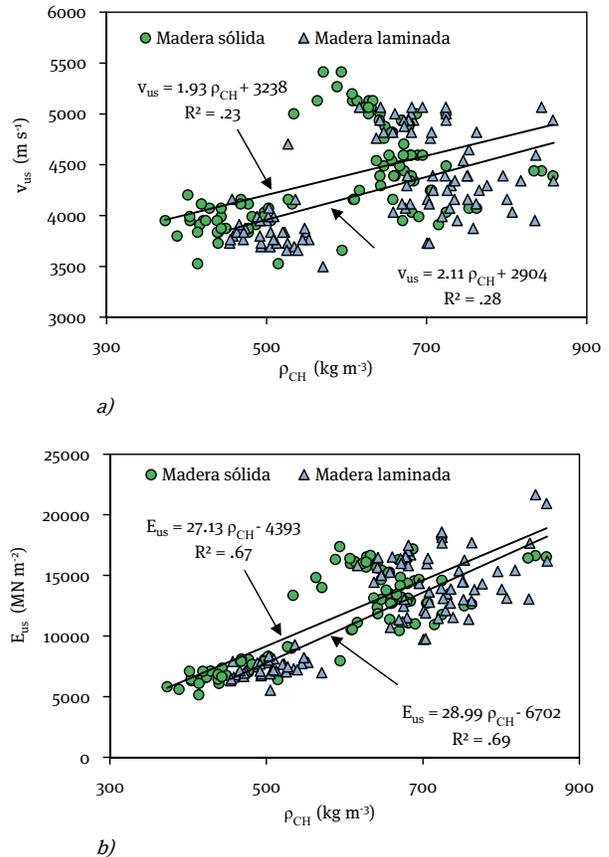
Fuente: elaboración propia.

La anomalía en las distribuciones o la dispersión numérica en las magnitudes, correspondientes a las mediciones de cada una de las muestras, puede atribuirse a varios factores. Respecto a la madera sólida, posiblemente influyó la variabilidad natural y heterogeneidad en la estructura micro y macro-anatómica entre las diferentes probetas.

Para la madera laminada, el ultrasonido inducido por el aparato *Sylvatest*® en la dirección longitudinal de la madera, que coincide con la longitud de las probetas, se transmitió al azar a través de la sección transversal, la cual está formada por cinco tabletas de madera sólida y cuatro planos de adhesivo. En consecuencia, la transmisión y medición del tiempo de transmisión posiblemente no fue uniforme, aunque uno de los objetivos del laminado es disminuir la homogeneidad natural del plano leñoso.

Este fenómeno se exhibe de forma gráfica en la figura 2a. Las correlaciones de las velocidades del ultrasonido de la madera sólida y laminada, en función de la densidad aparente, producen coeficientes de determinación con calificación de correlación baja ( $.4 > R^2 \geq .2$ ), de acuerdo al diseño experimental de esta investigación.

**Figura 2. Correlaciones y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para madera sólida y laminada entre: a) velocidades del ultrasonido ( $v_{us}$ ) y b) módulos dinámicos ( $E_{us}$ ), ambos en función de las densidades aparentes ( $\rho_{CH}$ )**



Fuente: elaboración propia.

Este resultado es semejante para la madera sólida y para la laminada. Para el caso de la madera sólida, es similar al reportado por Chauhan y Sethy (2016) quienes concluyen que la velocidad de onda en la dirección longitudinal de la madera y su densidad aparente ( $CH = 12\%$ ) son parámetros independientes ( $R^2 = -.04$ ). Su caso de estudio se hizo con probetas de pequeñas dimensiones, de ocho especies tropicales y con un amplio espectro de densidades aparentes ( $357 \text{ kg m}^{-3}$  (*Mesopsis emmini*) <  $\rho_{CH}$  <  $726 \text{ kg m}^{-3}$  (*Eucalyptus hybrid*)).

Sin ir más lejos, Baar *et al.* (2012) sugieren que la velocidad del ultrasonido en la madera puede ser modificada, entre otros factores, por la estructura anatómica particular del plano leñoso de cada especie, por la temperatura y por el contenido de humedad al momento del ensayo, así como por el carácter anisotrópico material

de la madera. A continuación, Baar *et al.* (2012) reportan coeficientes de determinación  $R^2 \leq .15$ , entre la velocidad del ultrasonido y la densidad aparente al investigar cinco maderas con densidades aparentes entre  $765 \text{ kg m}^{-3}$  y  $856 \text{ kg m}^{-3}$  con un contenido de humedad del 8 %. Los autores concluyen que no es recomendable tratar de predecir la velocidad del ultrasonido en la madera solo en función de la densidad.

Los resultados de esta investigación coinciden con el argumento anterior. Sin embargo, una vez ponderadas las velocidades con las densidades aparentes (figura 2b), los módulos dinámicos resultan con coeficientes de determinación que los califican como de correlación media ( $.7 > R^2 \geq .4$ ), de acuerdo a los criterios propuestos en el diseño experimental.

A manera de comparación con resultados de otros autores, Chauhan y Sethy (2016) reportan un coeficiente de determinación  $R^2 = .73$ , entre el módulo dinámico determinado con ultrasonido y la densidad aparente de madera sólida (CH = 12 %) de ocho especies tropicales con densidades que varía entre  $357 \text{ kg m}^{-3}$  (*Mesopsis emmini*) y  $726 \text{ kg m}^{-3}$  (*Eucalyptus hybrid*). Si bien los resultados de esta investigación siguen la tendencia reportada en la bibliografía, autores como Tippner *et al.* (2016) constatan que los resultados varían según el aparato con el que se calculan las velocidades del ultrasonido y, en consecuencia, los módulos dinámicos resultantes difieren entre especies y reportes de investigación.

En síntesis, los coeficientes de determinación de esta investigación entre la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico, ambos en función de la densidad aparente, muestran valores congruentes si se comparan con resultados de referencias recientes (Ahmad *et al.*, 2017; Baar *et al.*, 2012; Dackermann, Elsener, Li y Crews *et al.*, 2016; Del Menezzi *et al.*, 2013; De Souza, Del Menezzi y Bortoletto, 2011; Hasegawa *et al.*, 2011; Hassan, Horáček y Tippner, 2013; Kránitz, Deublein y Niemz, 2014; Tippner *et al.*, 2016).

## Densidad aparente

La densidad aparente de la madera sólida varió de  $456 \text{ kg m}^{-3}$  mínima para *E. cyclocarpum*, hasta máxima de  $695 \text{ kg m}^{-3}$  de *J. pyriiformis* (tabla 2). Las magnitudes de este parámetro no difieren considerablemente de los valores reportados en la literatura por Sotomayor (2015).

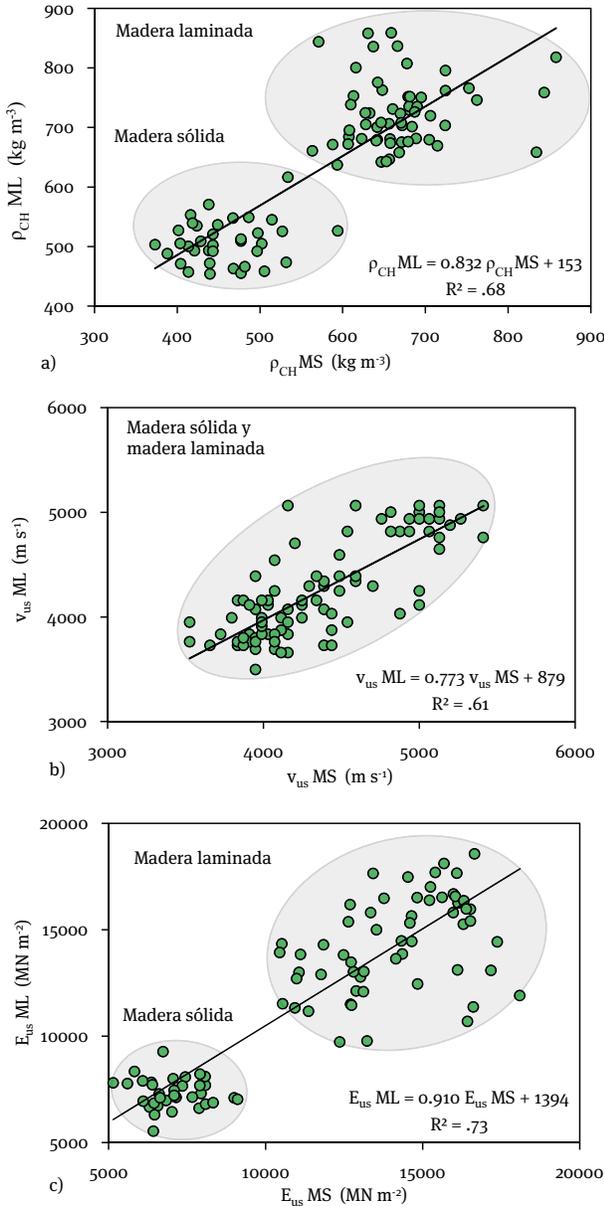
Ahora bien, la densidad aparente de la madera laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriiformis* aumenta respecto a la densidad aparente de la madera sólida. Para la madera laminada, se observa una diferencia promedio para las tres especies de 9.3 % con relación a la madera sólida.

El aumento de la densidad aparente ha sido reportado por Komariah *et al.* (2015) y Yavari *et al.* (2015), quienes encontraron que la densidad aparente de la madera laminada aumenta, comparativamente a la de la madera sólida, empleando en su elaboración la misma especie. Este aumento se obtiene por la masa de pegamento incorporado en la madera laminada y por el efecto del prensado aplicado a las láminas de la madera, que compacta la probeta y de esta manera su relación peso/volumen se incrementa.

La figura 3a muestra la correlación y el coeficiente de determinación de las densidades aparentes entre la madera laminada en función de la madera sólida. En esta figura se diferencian dos nubes de datos correspondientes a los de la madera sólida y laminada. Por razones de escala, en esta figura no se distinguen los 105 puntos experimentales. Estos resultados confirman el fenómeno observado con una correlación media ( $.7 > R^2 \geq .4$ ) de acuerdo con Tippner *et al.* (2016).

Por otra parte, el coeficiente de variación aumenta para *E. cyclocarpum* y *J. pyriiformis*, pero disminuye para *T. rosea*. Con todo, para las tres especies no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las densidades aparentes de la madera laminada y la de la madera sólida (tabla 3). Sin embargo, la comparación de medianas fue necesaria debido a la distribución no homogénea de las seis muestras de la densidad aparente, tres de madera sólida y tres de madera laminada.

**Figura 3. Correlaciones y coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) entre madera laminada en función de madera sólida de: a) densidades aparentes (ρ<sub>CH</sub>), b) velocidades del ultrasonido (v<sub>us</sub>), y c) módulos dinámicos (E<sub>us</sub>)**



Fuente: elaboración propia.

### Velocidad del ultrasonido

La velocidad del ultrasonido de la madera laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis* disminuye en compa-

ración con la de la madera sólida. El coeficiente de variación aumenta para *E. cyclocarpum* pero disminuye para *T. rosea* y *J. pyriformis*. Las velocidades del ultrasonido de *E. cyclocarpum* y *J. pyriformis* mostraron diferencias estadísticamente significativas entre la madera laminada y la madera sólida. En contraste, las velocidades del ultrasonido de *T. rosea* no fueron diferentes entre sí.

Sin embargo, la correlación de las velocidades del ultrasonido entre la madera sólida y laminada, resulta con una correlación media ( $.7 > R^2 \geq .4$ ) de acuerdo con los valores del coeficiente de determinación propuestos por el diseño experimental. En la figura 3b, los valores se confunden en una sola nube y es difícil distinguir los correspondientes a la madera sólida o a la madera laminada.

### Módulo dinámico

Los valores combinados de módulos dinámicos, tanto de la madera sólida como de la madera laminada de las tres especies, correlacionan entre sí con un coeficiente de determinación con calificación alta ( $.9 > R^2 \geq .7$ ) de acuerdo a los criterios propuestos en el diseño experimental. En la figura 3c se distinguen dos nubes correspondientes a los datos de la madera sólida y a los de la madera laminada. Estos resultados sugieren que el procedimiento de laminado de la madera tiende, de manera general, a incrementar la magnitud de los módulos dinámicos de la madera laminada, en comparación con los de la madera sólida.

Empero, si se analizan los resultados especie por especie, los corolarios cambian. En efecto, el módulo dinámico de la madera laminada de *E. cyclocarpum* y *T. rosea* aumenta mientras que el de *J. pyriformis* disminuye en comparación con el de la madera sólida. El coeficiente de variación para *E. cyclocarpum* aumenta, pero el de *T. rosea* y *J. pyriformis* disminuyen. Además, los módulos dinámicos de *T. rosea* mostraron diferencias estadísticamente significativas entre la madera laminada y la sólida. En cambio, los módulos dinámicos de *E. cyclocarpum* y *J. pyriformis* no se diferenciaron entre ellos.

La calidad de un procedimiento de caracterización mecánica de la madera está delimitada principalmente por dos factores. El primero es la precisión del parámetro medido para explicar el parámetro dependiente; esta capacidad es cuantificada por medio del coeficiente de

determinación ( $R^2$ ) derivado del análisis de regresión. El segundo factor es el error introducido en la predicción del parámetro, el cual puede ser valorado por el coeficiente de variación (cv) de las mediciones. Si el análisis de regresión entre dos parámetros, o en su caso dos variables, se deriva de mediciones realizadas en las mismas condiciones experimentales y con el mismo aparato, el efecto del error de medición y del coeficiente de variación ya está incluido en el valor de  $R^2$  (Hanhijärvi *et al.*, 2005).

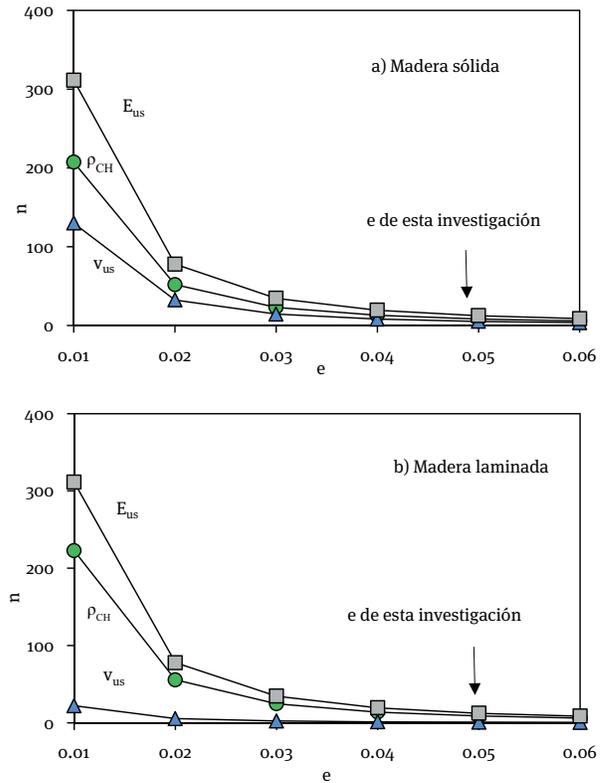
Retomando el argumento anterior, las propiedades de la madera sólida se reflejan de manera razonable en la madera laminada debido a que los coeficientes de determinación son moderados tanto entre la madera laminada y la sólida (figura 3), como entre las densidades aparentes y las velocidades del ultrasonido

Para las tres variables ( $\rho_{CH}$ ,  $v_{us}$  y  $E_{us}$ ) las tendencias son positivas. Sin embargo, para la densidad aparente y el módulo dinámico, se distinguen dos nubes correspondientes a la madera sólida y a la madera laminada. En cambio, para la velocidad del ultrasonido, los valores correspondientes a la madera sólida y a la madera laminada se confunden. Estos resultados coinciden con los del análisis estadístico y describen los datos de la tabla 3.

### Verificación del tamaño de la muestra

Los resultados del análisis estadístico sugieren la intervención de factores que aumentaron la variabilidad de las magnitudes de las mediciones. Para verificar si el número de probetas observadas fue suficiente para validar el análisis estadístico, la figura 4 presenta dos ejemplos de la convergencia del tamaño de la muestra de *E. cyclocarpum*: a) para madera sólida y b) para madera laminada. Los datos en los gráficos representan el número de probetas necesarias (n), en función del error de estimación aceptable (e) que es la magnitud relativa del parámetro en cuestión y que se acepta como error (fórmula 1).

**Figura 4. Convergencia del tamaño de la muestra (n) en función del error de estimación aceptable (e). Ejemplo para *E. cyclocarpum*: a) madera sólida y b) madera laminada**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las convergencias para *E. cyclocarpum* (figura 4) son similares a los obtenidos para *T. rosea* y *J. pyriformis*. La tabla 4 presenta los resultados del cálculo *a posteriori* del tamaño de la muestra para la madera sólida y laminada de las tres especies para un error de estimación aceptable de 0.05. A pesar de la variabilidad en las mediciones, el tamaño de la muestra necesario para todas las muestras fue menor que 35 (tabla 4), cantidad de probetas observadas en esta investigación. Este resultado verifica que el tamaño de la muestra fue suficiente.

**Tabla 4. Tamaño de la muestra**

Variable	<i>E. cyclocarpum</i>		<i>T. rosea</i>		<i>J. pyriformis</i>	
	MS (n)	ML (n)	MS (n)	ML (n)	MS (n)	ML (n)
$\rho_{CH}$	17	9	8	9	11	8
$v_{us}$	3	5	5	1	6	4
$E_{us}$	27	10	14	12	35	29

Nota: MS = Madera sólida; ML = Madera laminada;  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $v_{us}$  = Velocidad del ultrasonido;  $E_{us}$  = Módulo dinámico. n = Tamaño de la muestra para un error de estimación de 0.05.

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIÓN

Se determinó el módulo dinámico por ultrasonido en probetas de madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. Las magnitudes de las densidades aparentes, de las velocidades del ultrasonido y de los módulos dinámicos son diferentes entre la madera sólida y laminada. Las magnitudes de estos parámetros son similares a los reportados en la bibliografía y sus variaciones son aceptables comparativamente a los resultados con otras especies de madera.

Las densidades aparentes se incrementan para la madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. En contraste, las velocidades del ultrasonido disminuyen igualmente para las tres especies. Por su parte, los módulos dinámicos de la madera laminada se incrementan en comparación con estos mismos parámetros de la madera sólida para *E. cyclocarpum* y *T. rosea*, pero disminuyen para *J. pyriformis*.

La densidad aparente y la velocidad del ultrasonido de la madera sólida presentan correlaciones medias con los parámetros correspondientes a la madera laminada. Sin embargo, el módulo dinámico de la madera sólida presenta una correlación alta con respecto al módulo dinámico de la madera laminada.

Los resultados se circunscriben al caso de estudio para las maderas de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*. De igual forma, las conclusiones se refieren a las condiciones experimentales detalladas en esta investigación.

## REFERENCIAS

- Acosta, C. C., Luna, M., Noa, J. C., Galindo, J., Vázquez, S. M., Morales, Z., y Iglesias, L. G. (2011). Caracterización morfológica y dasométrica de la especie amenazada *Juglans pyriformis* Liebm. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 59-67.
- Ahmad, Z., Lum, W. C., Lee, S. H., Razlan, M. A., y Wan M.W.H. (2017). Mechanical properties of finger jointed beams fabricated from eight Malaysian hardwood species. *Construction and Building Materials*, 145, 464-473. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016>
- Baar, J., Tippner, J., y Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 767-769.
- Bachtiar, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., y Niemz, P. (2017). Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques. *Wood Science and Technology*, 51(1), 47-67. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0851-z>
- Burdurlu, E., Kilic, M., Ilce, A. C., y Uzunkavak, O. (2007). The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.). *Construction and Building Materials*, 21(8), 1720-1725.
- Chauhan, S., y 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. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000034>
- Christoforo, A. L., Aftimus, B. H., Panzera, T. H., Machado, G., y Lahr, F. A. (2017). Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrina* wood specie. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 37(2), 376-384. Recu-

- perado de <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n2p376-384/2017>
- Cordero, J., y Boshier, D. H. (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Corigliano, P., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Maugeri, N., y Marinò, A. (2017). Experimental and theoretical analyses of Iroko wood laminates. *Composites Part B: Engineering*, 112, 251-264. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.049>
- Costa, V. E., De Rezende, M. A., y Rodrigues, V. A. (2014). Conversion between basic density and apparent density at any moisture content in *Eucalyptus grandis*. *Holzforschung*, 68(8), 981-986.
- Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., y Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Construction and Building Materials*, 102, 963-976. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>
- De Borst, K., Bader, T. K., y Wikete, C. (2012). Microstructure–stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species. *Journal of Structural Biology*, 177(2), 532-542. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2011.10.010>
- De Oliveira, F. G., y Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18), 2443-2446. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- De Souza, F., Del Menezzi, C. H., y Bortoletto, G. (2011). Material properties and nondestructive evaluation of laminated veneer lumber (LVL) made from *Pinus oocarpa* and *P. kesiya*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(2), 183-192. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0415-0>
- Del Menezzi, C. H., Mendes, L., De Souza, M., y Bortoletto, G. (2013). Effect of Nondestructive Evaluation of Veneers on the Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) from a Tropical Species. *Forests*, 4(2), 270-278. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/f4020270>
- Guibal, D., Paradis, S., y Cerre, J.C. (2017). *Tropical Timber Atlas*. J. Gerard (Coord.). Versailles, Francia: Éditions Quae.
- Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., y Turk, G. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques: Report of the Combigrade-project - Phase 1*. Finlandia: VTT Publications.
- Hasegawa, M., Takata, M., Matsumura, J., y Oda, K. (2011). Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51(3), 296-302. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.10.001>
- Hassan, K. T. S., Horáček, P., y Tippner, J. (2013). Evaluation of Stiffness and Strength of Scots Pine Wood Using Resonance Frequency and Ultrasonic Techniques. *BioResources*, 8(2), 1634-1645.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2012). *Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2014a). *Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). *Wood. Determination of density for physical and mechanical tests*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- Klapálek, P., Melzerová L., y Plachý T. (2016). Pulse Method used for Non-destructive Assessment of Glued Laminated Timber Beams. *Applied Mechanics and Materials*, 827, 231-234.
- Komariah, R. N., Hadi, Y. S., Massijaya, M. Y., y Suryana, J. (2015). Physical-Mechanical Properties of Glued Laminated Timber Made from Tropical Small-Diameter Logs Grown in Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 43(2), 156-167.
- Kránitz, K., Deublein, M., y 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. Recuperado de <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>

- Llana, D. F., Iñiguez-Gonzalez, G., Arriaga, F., y Niemz, P. (2014). Influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in scots pine wood. *Wood Research*, 59(5), 769-780.
- Pellerin, R. F., y Ross, R. J. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison, Wisconsin: Forest Products Society.
- Pineda, E., Valdez, J. I., y Pérez, C. (2016). Crecimiento en diámetro y fenología de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en Costa Grande, Guerrero, México. *Acta Universitaria*, 26(4), 19-28. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.15174/au.2016.914>
- Ponneth, D., Vasu, A. E., Easwaran, J. C., Mohandass, A., y Chauhan, S.S. (2014). Destructive and non-destructive evaluation of seven hardwoods and analysis of data correlation. *Holzforschung*, 68(8), 951-956.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., y Sennhauser, U. (2011). Air-coupled ultrasound inspection of glued laminated timber. *Holzforschung*, 65(3), 377-387.
- Sikora, K. S., McPolin, D. O., y Harte, A. M. (2016). Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT), panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials*, 116, 141-150. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>
- Silva, J. A., Fuentes, F. J., Rodríguez R., Torres, P. A., Lomelí, M. A., Ramos, J., ... y Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal.
- Sotelo, C., Weber, J. C., Garcia, R. A., Silva, D. A., y Muñiz, G. I. B. (2017). Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanianecozones of Mali. *Trees*, 31(3), 833-849.
- Sotomayor, J. R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, J. R. (2018a). Densidad y módulos dinámicos por vibraciones transversales de madera sólida y laminada de tres especies tropicales. *Tecnocien- cia*, 20(2), 71-90.
- Sotomayor, J. R. (2018b). Determinación del módulo dinámico longitudinal en madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 14(3), 24-54.
- Sotomayor, J. R. (2019). Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 15(1), 4-64.
- Sotomayor, J. R. (en prensa). *Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de la madera laminada de tres especies angiospermas*. *Ciência da Madeira* (Brazilian Journal of Wood Science).
- Sotomayor, J. R., Adachi, K., Iida, R., y Hayashi, T. (2019). Módulos de elasticidad y de ruptura de madera laminada de tres especies tropicales. *Acta Universitaria*, 29, 1-15. Recuperado de <https://doi.org/10.15174/au.2019.2178>
- Tamarit, J. C., y López, J. L. (2007). *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Teder, M., Pilt, K., Miljan, M., Pallav, V., y Miljan, J. (2012). Investigation of the physical-mechanical properties of timber using ultrasound examination. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(6), 795-801. Recuperado de <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.736233>
- Teles, R. F., Del Menezzi, C. H. S., De Souza, F., y De Souza, M. (2013). Theoretical and experimental deflections of glued laminated timber beams made from a tropical hardwood. *Wood Material Science & Engineering*, 8(2), 89-94. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.700644>
- Tippner, J., Hrivnák, J., y Kloiber, M. (2016). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1), 503-518.
- Williamson, G. B., y Wiemann, M. C. (2010). Measuring wood specific gravity...Correctly. *American Journal of Botany*, 97(3), 519-524. Recuperado de <https://doi.org/10.3732/ajb.0900243>
- Yavari, Al., Hemmasi, A., Roohnia, M., y Marušák, R. (2015). Dynamic Young's Modulus of Scarf- and Finger-Jointed Beams using Longitudinal Vibra-

tion Method. *BioResources*, 10(4), 6886-6895.

Zepeda, C., Burrola, C., White, L., y Rodríguez, C. (2017). Especies leñosas útiles de la selva baja caducifolia en la Sierra de Nanchititla, México. *Madera y Bosques*, 23(3), 101-119. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.2331426>

## NOTAS DE AUTOR

<sup>a</sup> Profesor-Investigador en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. Su línea de investigación es la caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Correo electrónico: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

Últimas publicaciones:

- Sotomayor, J. R., Adachi, K., Iida, R., y Hayashi, T. (2019). Módulos de elasticidad y de ruptura de madera laminada de tres especies tropicales. *Acta Universitaria*, 29, 1-15.
- Sotomayor, J. R. (2019). Módulo de elasticidad dinámico, factor de calidad e índice material de 25 maderas. Determinación por vibraciones transversales. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(2), 280-287.
- Sotomayor, J. R., y López, 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*, 27(76), 32-40.