



ARTÍCULO

Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas.

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*} & Koji Adachi²

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. madera999@yahoo.com

² Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.595>

Recibido: 23.11.2023; Aceptado 08.12.2023

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar las densidades, medir las velocidades de onda y calcular los módulos dinámicos en tres especies mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*; y tres especies japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*, para estimar la anisotropía entre las direcciones longitudinal y tangencial. La unidad experimental consistió en seis muestras de 35 placas de cada una de las especies estudiadas. Se determinó la densidad de la madera y se realizó pruebas de ondas de esfuerzo en las direcciones longitudinal y tangencial. Las variables de respuesta fueron: la densidad, la velocidad tangencial y la longitudinal, el módulo tangencial y el longitudinal. Las magnitudes de las densidades de las maderas mexicanas y japonesas se distribuyen y varían en rangos similares. Las velocidades y módulos dinámicos de las seis especies indican magnitudes diferentes según las direcciones tangencial y longitudinal. Estos resultados confirman la universalidad del carácter anisotrópico en el comportamiento mecánico de la madera, independientemente de la especie y origen geográfico. La velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad siguen un patrón anisotrópico que puede ser inferido con modelos teóricos y que se puede observar utilizando métodos no destructivos como las ondas de esfuerzo.

Palabras clave: *Cryptomeria japonica*, *Fagus crenata*, *Paulownia tomentosa*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus scytophylla*, *Tabebuia rosea*.

SUMMARY

The objective of the research was to determine densities and measure wave velocities and dynamic modules in three Mexican species: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*; and in three Japanese species: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* and *Fagus crenata*, to estimate anisotropy between the longitudinal and tangential directions. The experimental unit consisted of six samples of 35 plates corresponding to each of the six woods studied. Timber densities were determined, and stress wave tests were performed in the longitudinal and tangential directions. The response variables were density, tangential and longitudinal velocity, tangential and longitudinal modulus. The magnitudes of the densities of Mexican and Japanese woods are distributed and vary in similar ranges. The speeds and dynamic modules of the six species indicate different magnitudes according to the tangential and longitudinal directions. These results confirm the universality of the anisotropic character in the mechanical behavior of the wood, regardless of the species and geographical origin. The ultrasound velocity and the modulus of elasticity follow an anisotropic pattern that can be inferred with theoretical models and that can be observed using non-destructive methods such as stress waves.

Key words: *Cryptomeria japonica*, *Fagus crenata*, *Paulownia tomentosa*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus scytophylla*, *Tabebuia rosea*.

INTRODUCCIÓN

La magnitud del módulo de elasticidad y de la resistencia mecánica de la madera varía según las direcciones radial, tangencial y longitudinal, debido a que la madera es un material anisotrópico (Mascia & Vanalli, 2012). En una pieza de madera aserrada, estas direcciones son referidas al fuste del tronco de un árbol que puede ser modelado como un cilindro, lo que le confiere versatilidad para el diseño de productos no estructurales (muebles e instrumentos musicales). En productos estructurales (columnas y vigas), la colocación relativa de los elementos anatómicos de la madera, en diferentes combinaciones con sus direcciones de anisotropía, juega un papel importante para resistir solicitaciones de compresión y tensión (Breyer *et al.*, 2003). Por eso, en la fabricación de objetos de alto valor agregado, es necesario determinar sus características tecnológicas considerando el carácter anisotrópico (Nadir *et al.*, 2014). Esta caracterización encuentra también aplicación en el análisis numérico (Sonderregger *et al.*, 2013) y para la concepción de productos asistida por computador (Mackerle, 2005).

El comportamiento mecánico de la madera depende de su estructura anatómica (Guitard & Gachet, 2004; Hofstetter & Gamstedt, 2009) y de su composición química (Katz *et al.*, 2008; Longui *et al.*, 2012). Existe evidencia empírica de que la densidad es una propiedad común para predecir el módulo de elasticidad en muchas especies (Steiger & Arnold, 2009; Niklas & Spatz, 2010), aun cuando la densidad es independiente de la estructura anatómica de cada madera (Ziemińska *et al.*, 2015; Longo *et al.*, 2018) y del origen geográfico de crecimiento de la especie (Brémaud, 2012; Dlouhá *et al.*, 2012). Caso diferente es la velocidad de onda, mientras que De Oliveira & Sales (2006) refieren que esta aumenta proporcionalmente con la densidad, Del Menezzi *et al.* (2010) reportan bajas correlaciones entre ambas.

Las propiedades físicas de la madera están determinadas por cinco factores inherentes a su organización estructural (Tamarit & López, 2007; Richter, 2015; Ziemińska *et al.*, 2015; Rungwattana & Hietz, 2017; Vargas, 2017): (i) la cantidad de sustancia presente en la pared celular en un volumen dado; (ii) la cantidad de agua presente en la pared celular; (iii) la composición de los componentes primarios de la pared celular, así como la cantidad y naturaleza de las sustancias extraíbles presentes; (iv) el acomodo y orientación de los materiales de la pared celular en las células y en los tejidos; y (v) el tipo, tamaño, proporción y acomodo de las células que conforman el tejido leñoso. El primer factor se determina con el peso específico de la madera y proporciona el índice más útil para predecir el comportamiento físico de la madera. El segundo factor afecta el comportamiento físico de la madera, no solo a causa de que la adición de agua en la pared celular cambia su densidad y dimensiones, sino por el efecto de plasticidad y la transferencia de energía al interior de una pieza de madera. El tercer factor está relacionado con varias propiedades particulares de ciertos tipos de madera y la variación en el comportamiento cuantitativo esperado. Los dos últimos factores son la causa de grandes diferencias encontradas en la respuesta física de la madera con respecto a la orientación de la fibra o a la "dirección del grano", es decir, la propiedad de anisotropía de la madera.

La higroscopia y la heterogeneidad, además de su biodiversidad, originan una importante variedad de clases, tipos o calidades de madera, lo que dificulta el trabajo de ingeniería, que recomienda el empleo de materiales con características tecnológicas uniformes y estandarizadas (Smulski, 1997; Shmulsky y Jones, 2011; Felton *et al.*, 2017; Sandberg *et al.*, 2017). Como consecuencia, cuando se determina o define una cota mecánica, por ejemplo, el módulo de elasticidad, este parámetro debe ir acompañado por indicadores tales como el género y especie de que se trate, la densidad aparente y el contenido de humedad correspondiente.

El comportamiento mecánico de la madera denota un carácter anisotrópico (Xu *et al.*, 2014; Dackermann *et al.*, 2016; Malaga-Tobola *et al.*, 2019). Esta peculiaridad implica la variación en la magnitud de sus características de acuerdo con la dirección en las que se miden. De tal forma que se definen tres velocidades de onda según las diferentes direcciones del plano leñoso (Gonçalves *et al.*, 2014; Oh, 2017) y tres módulos dinámicos respectivos (Brémaud *et al.*, 2011; Se Golpayegani *et al.*, 2012).

Por otra parte, la estructura anatómica de la madera hace de ella un material heterogéneo, porque sus propiedades físicas son diferentes según el lugar del plano leñoso donde se evalúen (Guitard & Gachet, 2004). Esto hace que sea necesario observar la respuesta de piezas o probetas de madera con un volumen

elemental de materia con paralelepípedos con una geometría que mida al menos 0,02 m en cualquiera de sus aristas de la sección transversal (Hernández, 2007).

La hipótesis de trabajo de la investigación propone que las velocidades de onda y los módulos dinámicos presentan una anisotropía entre las direcciones longitudinal y tangencial, independientemente de la especie de que se trate. Para verificar este planteamiento teórico, el objetivo de la investigación fue determinar las densidades y medir las velocidades de onda y los módulos dinámicos, empleando ondas de esfuerzo, en tres especies mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*; y en tres especies japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*, para así estimar las anisotropías entre las direcciones longitudinal y tangencial. Sin embargo, la validez de la propuesta está restringida al caso de estudio. Con excepción de los trabajos realizados por Sotomayor & Villaseñor (2017), no se encontraron investigaciones orientadas al estudio de la anisotropía de la madera con datos derivados de pruebas de ondas de esfuerzo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon grupos de 35 placas de madera de tres especies mexicanas: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* y de tres especies japonesas: *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*. Sus dimensiones fueron 0,01 m de espesor por 0,15 m de ancho y 0,15 m de largo, alineadas a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso, respectivamente (Figura 1). Las placas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C (± 2 °C) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 5\%$) hasta que se equilibró su contenido de humedad. El contenido de humedad se determinó con el método de diferencias de peso, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad aparente de la madera se calculó con el cociente del peso de la madera y su volumen al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

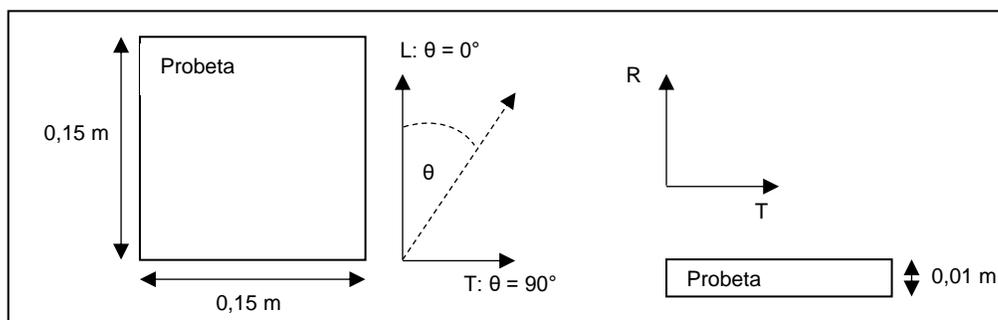


Figura 1. Referencial de las direcciones longitudinal (L) y tangencial (T). R = Dirección radial. Theta (θ) es el ángulo en el plano longitudinal-tangencial entre las direcciones L y T.

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda, entre dos posiciones en los extremos de las placas con el aparato *Metriguard*® (Figura 2). Una esfera de acero colocada en el péndulo del aparato impactó en un mecanismo de transmisión que induce una onda de esfuerzo, de tal forma que la onda se desplaza a través de la madera. La emisión y la recepción de la onda se registró utilizando acelerómetros colocados en los puntos de apoyo de la placa, localizados a 0,01 m de sus extremos. El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores de la velocidad de transmisión de la onda fue considerado para su análisis posterior.

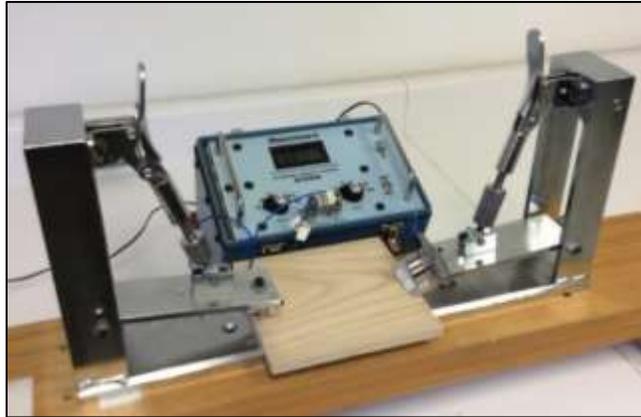


Figura 2. Pruebas de ondas de esfuerzo.

El módulo dinámico se determinó con la expresión (1) (Yu *et al.*, 2017), el subíndice *oe* se refiere a cálculos derivados de pruebas de ondas de esfuerzo:

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

Donde:

E_{oe} : Módulo dinámico (N/m²)

v_{oe} : Velocidad de onda (m/s)

ρ_{CH} : Densidad (Kg/ m³)

Diseño Experimental

La unidad experimental consistió en seis muestras de 35 placas correspondientes a cada una de las seis especies de madera estudiadas. La especie fue el factor de variación clasificado para seis niveles. El contenido de humedad se consideró una variable de referencia. Las variables de respuesta fueron la densidad, las velocidades tangencial y longitudinal, y los módulos tangencial y longitudinal. Para este tipo de variables se determinó los estadísticos: media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje. Con los cocientes entre los valores de las velocidades y los módulos medidos en las direcciones longitudinal y tangencial se calculó las anisotropías correspondientes al plano longitudinal-tangencial (Figura 1).

Se realizó pruebas de normalidad en las distribuciones de los datos de las muestras. El criterio de demarcación fue valores del sesgo estandarizado y del apuntamiento estandarizado al interior del intervalo [-2, +2]. Se practicó pruebas de hipótesis de verificación y de análisis de varianza con el criterio de demarcación para valores de $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$ para rechazar la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ y así aceptar una diferencia estadística que tuviera una significancia de 95%. Se realizó pruebas de rangos múltiples con el criterio de no aceptar diferencias estadísticamente significativas entre especies que comparten una misma columna de X.

Se evaluó las correlaciones lineales ($y = a x \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre las velocidades y los módulos como variables dependientes de las densidades. De igual forma, se evaluaron correlaciones polinomiales ($y = a x^2 \pm b x \pm c$) y sus coeficientes de determinación entre las velocidades de onda y los ángulos de anisotropía. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta (MA): $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con datos de la bibliografía.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidades

Las densidades corresponden a un contenido de humedad de 11% en promedio y variaron desde un mínimo de 266 Kg/m³ para *P. tomentosa* y un máximo para *Q. scytophylla* con 976 Kg/m³ (**Cuadro 1**). La bibliografía reporta valores de densidades parecidos a los de esta investigación tanto para las maderas mexicanas (Cordero & Boshier, 2003; Tamarit & López, 2007; Silva *et al.*, 2010; Ordóñez *et al.*, 2015; Sotomayor, 2015) como para las especies japonesas (Harada, 2001; Yamasaki *et al.*, 2017; Miyoshi *et al.*, 2018).

Los coeficientes de variación de las densidades son inversamente proporcionales a sus magnitudes (**Cuadro 1**). Este resultado es válido para las maderas mexicanas y japonesas y se observa también para los coeficientes de variación de las velocidades de onda y de los módulos dinámicos. Es decir, a mayor densidad de la madera, el coeficiente de estas variables tiende a disminuir.

Comparativamente, las magnitudes de las densidades de las maderas mexicanas y japonesas se distribuyen y varían en rangos similares, resultados que confirman la universalidad de esta característica de la madera, independientemente de la especie y origen geográfico. Particularmente, las densidades de *P. pseudostrobus* ($\rho_{CH} = 620$ Kg/m³, madera mexicana) y *F. crenata* ($\rho_{CH} = 629$ Kg/m³, madera japonesa) son similares.

Cuadro 1. Densidades, velocidades de onda, módulos dinámicos y anisotropías.

Especies mexicanas	ρ_{CH} (Kg/m ³)	v_{oe} T (m/s)	v_{oe} L (m/s)	L/T -	E_{oe} T (MN/m ²)	E_{oe} L (MN/m ²)	L/T -
<i>Pinus pseudostrobus</i>	620	935	3.236	3,5	557	6.477	11,6
	(17)	(8)	(6)	-	(30)	(18)	-
<i>Tabebuia rosea</i>	776	1.045	2.837	2,7	854	6.255	7,3
	(10)	(6)	(8)	-	(18)	(16)	-
<i>Quercus scytophylla</i>	976	1.031	2.999	2,9	1.040	8.797	8,5
	(3)	(5)	(5)	-	(9)	(10)	-
Especies japonesas							
<i>Paulownia tomentosa</i>	266	792	2.799	3,5	168	2.094	12,4
	(8)	(8)	(9)	-	(20)	(18)	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	421	526	2.864	5,4	118	3.476	29,5
	(5)	(9)	(7)	-	(22)	(17)	-
<i>Fagus crenata</i>	629	1.142	2.783	2,4	823	4.889	5,9
	(3)	(4)	(7)	-	(10)	(13)	-

ρ_{CH} = Densidad; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; L/T = Anisotropía; Coeficientes de variación entre paréntesis

Las pruebas de normalidad indican distribuciones normales para todas las densidades medidas en las seis especies (**Cuadro 2**). Igualmente, las pruebas de variación y análisis de verificación indican diferencias significativas entre las densidades de las seis especies. Solo para las densidades de *P. pseudostrobus* y *F. crenata* las pruebas de rangos múltiples indican que no existen entre ellas diferencias estadísticamente significativas (**Cuadro 3**).

Cuadro 2. Resultados de las pruebas de normalidad y de hipótesis.

Especies	Pruebas de normalidad		Pruebas de hipótesis	
	SE	AE	Ver-var	Anova
	[-2, +2]	[-2, +2]	[P _(α = 0,05) < 0,5]	[P _(α = 0,05) < 0,5]
ρ_{CH}				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,269	-0,803	< 0,001*	< 0,001
<i>Tabebuia rosea</i>	-0,693	-0,895	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-1,752	0,577	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>	1,657	-0,456	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	0,184	-1,003	-	-
<i>Fagus crenata</i>	-0,337	-0,458	-	-
v_{oe} T				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,519	-0,149	< 0,001	< 0,001
<i>Tabebuia rosea</i>	1,332	-0,646	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>	0,671	0,744	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>	0,151	-0,985	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	1,649	-0,749	-	-
<i>Fagus crenata</i>	0,125	-1,226	-	-
v_{oe} L				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,539	-0,738	< 0,001	< 0,001
<i>Tabebuia rosea</i>	0,416	0,248	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-0,842	0,823	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>	0,151	-0,985	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	1,649	-0,749	-	-
<i>Fagus crenata</i>	0,125	-1,226	-	-
E_{oe} T				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0,210	-0,670	< 0,001	< 0,001
<i>Tabebuia rosea</i>	1,275	-0,136	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-0,783	-0,492	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>	1,451	-0,200	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	1,765	-0,516	-	-
<i>Fagus crenata</i>	0,064	-1,205	-	-
E_{oe} L				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0,999	-0,690	< 0,001	< 0,001
<i>Tabebuia rosea</i>	1,649	1,599	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-0,911	0,577	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>	0,940	1,581	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	0,554	-0,210	-	-
<i>Fagus crenata</i>	-0,959	0,113	-	-

ρ_{CH} = Densidad; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; *P_(α = 0,05) < 0,05: existe una diferencia estadísticamente significativa.

Cuadro 3. Resultados de las pruebas de rangos múltiples.

Especies		ρ_{CH}					
<i>Paulownia tomentosa</i>	X	-	-	-	-	-	
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	X	-	-	-	-	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	X [#]	-	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X [#]	-	-	-	
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	X	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	-	X	-	
Especies		$v_{oe} T$					
<i>Cryptomeria japonica</i>	X	-	-	-	-	-	
<i>Paulownia tomentosa</i>	-	X	-	-	-	-	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	X	-	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	X [#]	-	-	
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	X [#]	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	-	-	-	-	X	-	
Especies		$v_{oe} L$					
<i>Cryptomeria japonica</i>	X	-	-	-	-	-	
<i>Paulownia tomentosa</i>	-	X	-	-	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X	-	-	-	
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	X	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	-	X	-	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	-	-	-	X	
Especies		$E_{oe} T$					
<i>Cryptomeria japonica</i>	X [#]	-	-	-	-	-	
<i>Paulownia tomentosa</i>	X [#]	-	-	-	-	-	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	X	-	-	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X [#]	-	-	-	
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	X [#]	-	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	X	-	-	
Especies		$E_{oe} L$					
<i>Paulownia tomentosa</i>	X	-	-	-	-	-	
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	X	-	-	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X	-	-	-	
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	X [#]	-	-	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	-	X [#]	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	-	X	-	

ρ_{CH} = Densidad; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; #: No existen diferencias estadísticamente significativas entre especies que comparten una misma columna de X.

Velocidades de Onda

La velocidad tangencial mínima corresponde a *C. japonica* y la máxima a *F. crenata*. La velocidad longitudinal mínima corresponde a *P. tomentosa* y la máxima a *P. pseudostrobus* (**Cuadro 1**). Las magnitudes de las velocidades de esta investigación son próximas a las reportadas en la bibliografía tanto

para las maderas mexicanas (Sotomayor, 2019) como para las especies japonesas (Harada, 2001; Yamasaki *et al.*, 2017; Miyoshi *et al.*, 2018). De manera análoga a los coeficientes de variación de las densidades, los correspondientes a las velocidades tangenciales y longitudinales son inversamente proporcionales a sus magnitudes, tanto para las maderas mexicanas como para las japonesas (Cuadro 1). Las pruebas de normalidad indican distribuciones normales para todas las velocidades correspondientes a las seis especies (Cuadro 2). Al mismo tiempo, las pruebas de verificación y análisis de varianza indican diferencias significativas entre las velocidades de todas las maderas. Por su parte, las pruebas de rangos múltiples (Cuadro 3) indican similitudes en las medias de las velocidades tangenciales de *Q. scytophylla* y *T. rosea*, ambas maderas mexicanas.

La densidad es un predictor deficiente de la velocidad de onda. Las correlaciones entre la densidad, la velocidad tangencial y la longitudinal resultan en coeficientes de determinación muy débiles (Figura 3). Esto sugiere que la velocidad es independiente de la densidad de las maderas en estudio. Los resultados para la dirección longitudinal son parecidos a los reportados por Del Menezzi *et al.* (2010) quienes calculan coeficientes de determinación de 0,14 entre la velocidad de onda en la dirección longitudinal y la densidad. En cambio, los datos reportados por De Oliveira & Sales (2006) refieren que la velocidad aumenta proporcionalmente con la densidad, con coeficientes de determinación de 0,80. Para la dirección tangencial, no se encontró información para comparar con los resultados de esta investigación.

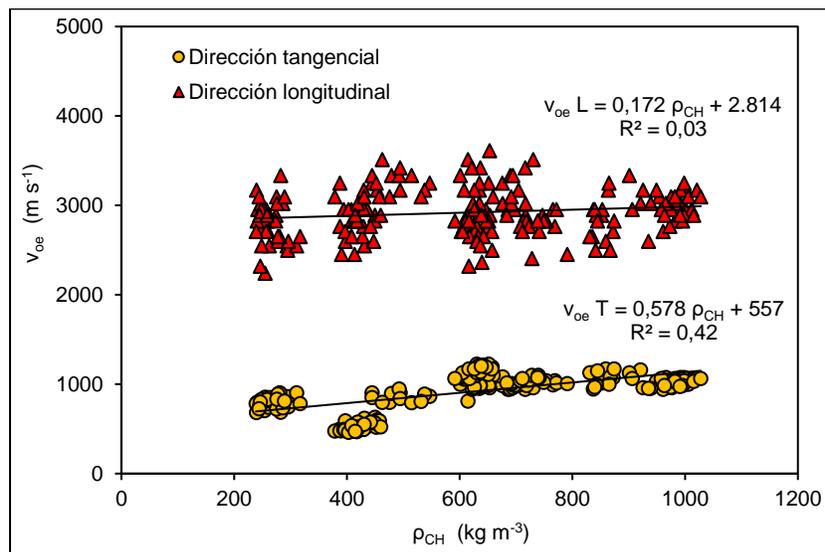


Figura 3. Correlaciones entre velocidades de onda (v_{oe}) y densidades (ρ_{CH}).

Las velocidades indican anisotropías entre las direcciones longitudinal y tangencial (Cuadro 1). La distancia entre los datos en la Figura 3 manifiesta la diferencia entre las magnitudes según la dirección de medición de las velocidades. Comparativamente con otras investigaciones (Sotomayor *et al.*, 2010a; 2010b; Sotomayor, 2015; Gonçalves *et al.*, 2014; Sotomayor & Villaseñor, 2016; 2017; Sotomayor, 2019), la anisotropía calculada con los datos de estos autores es en promedio $L/T = 3,5$, valor muy cercano al de esta investigación que es de $L/T = 3,4$. Este resultado verifica la primera parte de la hipótesis de esta investigación: las velocidades de onda de esfuerzo presentan una anisotropía entre las direcciones longitudinal y radial de la madera, independientemente de la especie de que se trate.

La Figura 4 muestra las variaciones de las velocidades de onda (v_{oe}) en función del ángulo theta (θ) entre las direcciones longitudinal ($L = 0^\circ$) y tangencial ($T = 90^\circ$). Estas curvas se calcularon utilizando la fórmula (2), tomada de Sotomayor y Villaseñor (2016).

$$v_{us} = \frac{v_{us} L + v_{us} T}{v_{us} L \sin^{1,665} \theta + v_{us} T \cos^{1,665} \theta} \quad (2)$$

Donde:

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

L: Dirección longitudinal

T: Dirección tangencial

θ : Ángulo entre las direcciones longitudinal y tangencial (°)

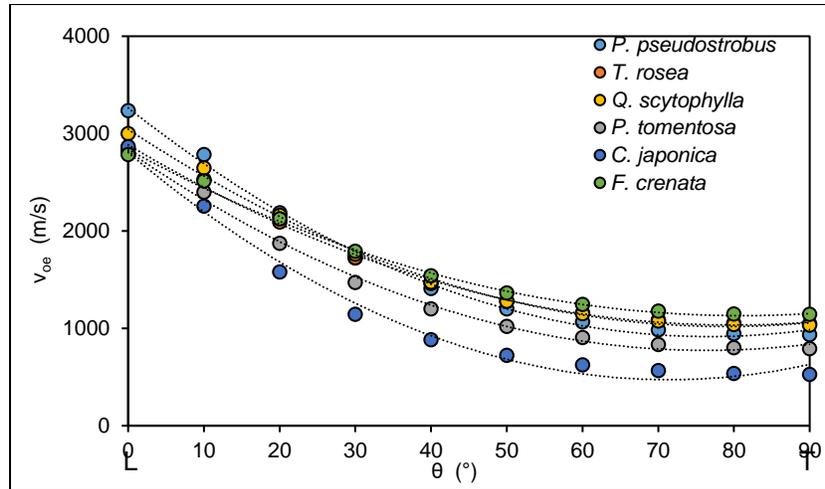


Figura 4. Variación de las velocidades de onda (v_{oe}) en función del ángulo theta (θ) entre las direcciones longitudinal ($L = 0^\circ$) y tangencial ($T = 90^\circ$).

A partir de la fórmula (2) se evaluaron correlaciones polinomiales ($y = a x^2 \pm b x \pm c$) y sus coeficientes de determinación entre las velocidades y los módulos en función de los ángulos theta formados entre las direcciones longitudinal y tangencial. Los valores de los exponentes en la fórmula (2), así como los resultados de las correlaciones, presentados en el **Cuadro 4**, son similares a la reportada por Kabir (2001).

Cuadro 4. Correlaciones entre las velocidades de onda y los ángulos de anisotropía.

Especies mexicanas	Velocidades de onda	R ²
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$v_{oe} = 0,3988 \theta^2 - 61,2 \theta + 3.264$	1,00
<i>Tabebuia rosea</i>	$v_{oe} = 0,2904 \theta^2 - 46,4 \theta + 2.885$	1,00
<i>Quercus scytophylla</i>	$v_{oe} = 0,3248 \theta^2 - 51,3 \theta + 3.045$	1,00
Especies japonesas	Velocidades de onda	R ²
<i>Paulownia tomentosa</i>	$v_{oe} = 0,3499 \theta^2 - 53,5 \theta + 2.820$	1,00
<i>Cryptomeria japonica</i>	$v_{oe} = 0,4572 \theta^2 - 65,3 \theta + 2.806$	0,99
<i>Fagus crenata</i>	$v_{oe} = 0,2598 \theta^2 - 42,1 \theta + 2.837$	1,00
Especies mexicanas	Módulos dinámicos	R ²
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$E_{oe} = 1,2627 \theta^2 - 175,2 \theta + 6.414$	0,98
<i>Tabebuia rosea</i>	$E_{oe} = 1,0130 \theta^2 - 151,6 \theta + 6.441$	0,99
<i>Quercus scytophylla</i>	$E_{oe} = 1,5258 \theta^2 - 222,2 \theta + 8.963$	0,99
Especies japonesas	Módulos dinámicos	R ²
<i>Paulownia tomentosa</i>	$E_{oe} = 0,4511 \theta^2 - 59,6 \theta + 1.977$	0,97
<i>Cryptomeria japonica</i>	$E_{oe} = 0,2411 \theta^2 - 50,3 \theta + 3.677$	0,98
<i>Fagus crenata</i>	$E_{oe} = 0,7013 \theta^2 - 109,9 \theta + 5.097$	0,99

v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; R^2 = Coeficiente de determinación; θ = Ángulo entre las direcciones longitudinal y tangencial.

Las relaciones de anisotropía L/T para las velocidades presentadas en el **Cuadro 1** son similares a las reportadas en la literatura internacional. [Gonçalves et al. \(2014\)](#) reportan anisotropías L/T de velocidades de ultrasonido para *Eucalyptus saligna* de 2,64, para *Apuleia leiocarpa* de 2,94 y para *Goupia glabra* de 2,47. Con el mismo método, [Dackermann et al. \(2016\)](#) reportan para *Eucalyptus maculata* anisotropías de 3,14 y para *Eucalyptus Microcorys* de 2,82. [Crespo et al. \(2017\)](#) reportan para *Eucalyptus globulus* anisotropías de 1,23. En el contexto mexicano, las relaciones de anisotropía L/T son similares a las reportadas por [Sotomayor & Villaseñor \(2017\)](#) para *Acer saccharum* cuyo valor de v_{oeL}/v_{oeT} es de 3,11 utilizando la misma instrumentación de esta investigación. En efecto, con excepción de *C. japonica*, se observa una tendencia de esta relación de anisotropía a disminuir a medida que la densidad de la madera aumenta. De tal forma, estos resultados confirman el carácter anisotrópico en las velocidades de onda observado con ultrasonido y reportado por [Sotomayor et al. \(2010a\)](#) para *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*, así como por [Sotomayor et al. \(2010b\)](#) para 152 maderas mexicanas.

Módulos Dinámicos

Los valores mínimo y máximo de los módulos tangenciales corresponden a *C. japonica* y *Q. scytophylla*. Los valores mínimos para los módulos longitudinales son para *P. tomentosa* y el máximo para *Q. scytophylla* (**Cuadro 1**). Los valores medios de los coeficientes de variación de los módulos tangenciales fluctúan desde un mínimo de 9% para *Q. scytophylla* hasta un máximo de 30% para *P. pseudostrobus*. Asimismo, para los módulos longitudinales, los coeficientes varían desde 10% para *Q. scytophylla* hasta 18% para *P. pseudostrobus* y *P. tomentosa* (**Cuadro 1**). Los resultados son similares a los reportados para estas maderas en [Sotomayor \(2015; 2019\)](#), [Harada \(2001\)](#), [Yamasaki et al. \(2017\)](#) y [Miyoshi et al. \(2018\)](#).

Las pruebas de normalidad indican distribuciones normales en todas las muestras con resultados de los módulos dinámicos (**Cuadro 2**). Conjuntamente, las pruebas de verificación y análisis de varianza señalan diferencias estadísticamente significativas entre los módulos dinámicos de las seis especies estudiadas. Por su parte, las pruebas de rangos múltiples asemejan, para la dirección tangencial, los pares de las especies *C. japonica*-*P. tomentosa* y *F. crenata*-*T. rosea*; y para la dirección longitudinal, con excepción de *T. rosea* y *P. pseudostrobus*, las pruebas de rangos múltiples diferencian las medias de los módulos dinámicos de las otras especies (**Cuadro 3**).

La densidad es un buen predictor del módulo dinámico. Los coeficientes de determinación para las direcciones longitudinal y tangencial son fuertes (**Figura 5**) y confirman el paradigma que establece que la densidad es la característica física de referencia para estimar el módulo de elasticidad ([Niklas & Spatz, 2010](#); [Dlouhá et al., 2012](#)), y en el caso de esta investigación, el módulo dinámico ([Del Menezzi et al., 2010](#); [Brémaud, 2012](#)).

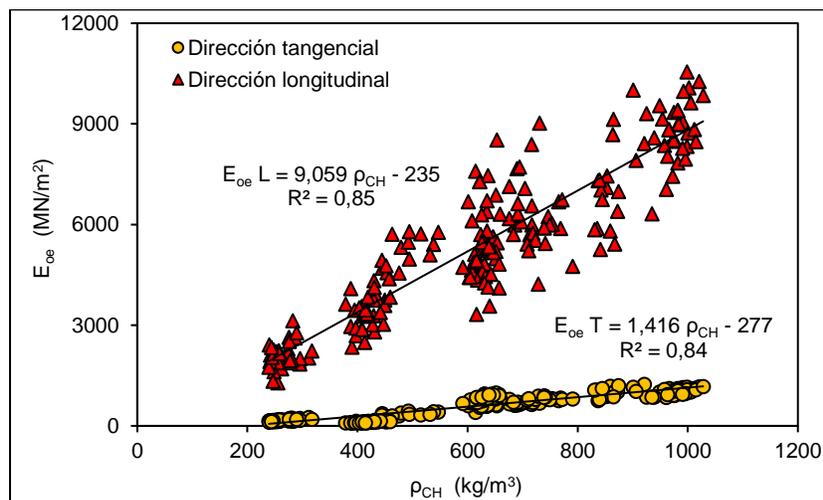


Figura 5. Correlaciones entre módulos dinámicos (E_{oe}) y densidades (ρ_{CH}).

Las tendencias de las correlaciones y sus coeficientes de determinación entre las velocidades (**Figura 3**), así como entre los módulos y las densidades (**Figura 4**), son similares a las reportadas por **Missanjo & Matsumura (2016)** para el módulo de elasticidad determinado en condiciones estáticas de madera de *Pinus kesija*: MOE = 43,95 p_{CH} - 12,58, R²= 0,62.

Por su parte, **Ponneth et al. (2014)** reportan para siete especies tropicales coeficientes de determinación de 0,14, correspondientes a correlaciones entre la velocidad de ondas de esfuerzo y la densidad, así como coeficientes de 0,48 entre el módulo dinámico y la densidad. Igualmente, **Del Menezzi et al. (2010)** reportan para seis maderas tropicales, referidas anteriormente en el análisis de velocidades de onda, coeficientes de determinación entre módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo y densidades de 0,88.

Los módulos dinámicos indican anisotropías entre las direcciones longitudinal y tangencial (**Cuadro 1**). Para el caso de las maderas mexicanas, *T. rosea* muestra el valor mínimo de 7,3 y *P. pseudostrobus* el máximo de 11,6. Entre las maderas japonesas, *F. crenata* tiene una anisotropía de 5,9 y *C. japonica* de 29,5.

Estos resultados son similares a los reportados por **Dackermann et al. (2016)** quienes presentan anisotropías L/T de módulos dinámicos determinados con ultrasonido para *Eucalyptus maculata* de 9,84 y para *Eucalyptus microcorys* de 7,97.

Por su parte, con el mismo método, **Gonçalves et al., (2014)** reportan anisotropías L/T para *Eucalyptus saligna* de 6,47, para *Apuleia leiocarpa* de 8,51 y para *Goupia glabra* de 2,47. Las relaciones de anisotropía L/T para los módulos dinámicos presentadas en el **Cuadro 1** son similares a las reportadas por **Sotomayor & Villaseñor (2017)** para *Acer saccharum* utilizando la misma instrumentación de esta investigación. El valor de E_{oeL} / E_{oeT} para *A. saccharum* es 9,79.

En los resultados de la presente investigación, con excepción de *T. rosea*, se observa que esta relación de anisotropía tiende a disminuir a medida que la densidad aumenta.

La **Figura 6** muestra las variaciones de módulos dinámicos en función del ángulo θ entre las direcciones longitudinal y tangencial. Estas curvas se calcularon utilizando los modelos propuestos por **Sotomayor & Villaseñor (2016)** con la fórmula **(3)**:

$$E_{us} = \frac{E_{us\ L} E_{us\ T}}{E_{us\ L} \sin^{2,111} \theta + E_{us\ T} \cos^{2,111} \theta} \quad (3)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico (N/m²)

L = Dirección longitudinal

T = Dirección tangencial

θ = Ángulo entre las direcciones longitudinal y tangencial (°)

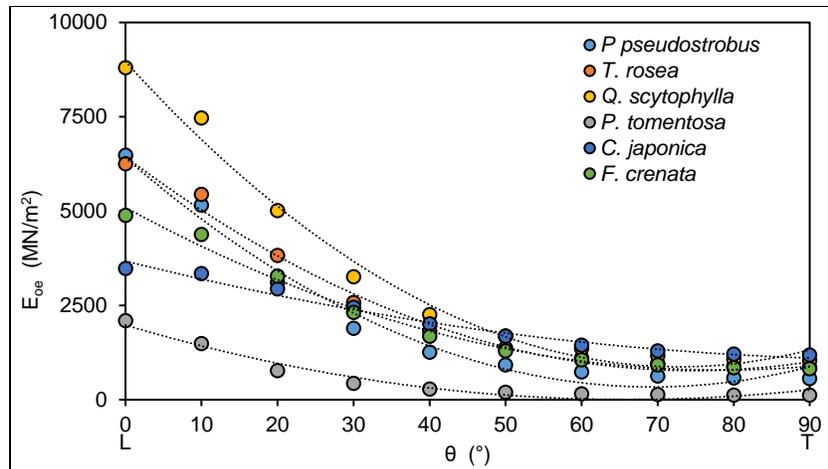


Figura 6. Variación de los módulos dinámicos (E_{oe}) en función del ángulo theta (θ) entre las direcciones longitudinal ($L = 0^\circ$) y tangencial ($T = 90^\circ$).

Los resultados anteriores confirman el carácter anisotrópico en los módulos dinámicos observado con ultrasonido y reportado por [Sotomayor et al. \(2010a\)](#) para *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei* y por [Sotomayor et al. \(2010b\)](#) para 152 maderas mexicanas. Así, este corolario verifica la segunda parte de la hipótesis de trabajo de esta investigación: los módulos dinámicos de la madera presentan una anisotropía entre las direcciones longitudinal y tangencial, independientemente de la especie de que se trate.

CONCLUSIONES

Las velocidades y módulos dinámicos de las seis especies evaluadas indican magnitudes diferentes según las direcciones tangencial y longitudinal, lo que verifica el carácter anisotrópico en el comportamiento mecánico de la madera. De tal forma que la anisotropía es una propiedad inherente al material y se puede observar utilizando métodos no destructivos como las ondas de esfuerzo. La velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad siguen un patrón anisotrópico, que puede ser inferido con modelos teóricos.

RECONOCIMIENTOS

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

REFERENCIAS

- Brémaud, I. (2012).** Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: biological and cultural diversity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1): 807-18. <https://doi.org/10.1121/1.3651233>
- Brémaud, I., Gril, J. & Thibaut, B. (2011).** Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45(4): 735-754. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8>
- Breyer, D.E., Fridley, K.J., Pollock, D.G. & Cobeen, K.E. (2003).** Design of wood structures. San Francisco, McGraw-Hill. 976 p.

- Cordero, J., & Boshier, D. (2003).** Árboles de Centroamérica. Turrialba, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1079 p.
- Crespo, G., Aira, J. R., Vázquez, C. & Guaita, M. (2017).** Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured via Conventional, Ultrasound and 3-D Digital Image Correlation Methods in *Eucalyptus globulus* Labill. *BioResources*, 12(2): 3728-3743. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3728-3743>
- Dackermann, U., Elsener, R., Li, J.C. & 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*, N°102. Pp: 963-976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>
- De Oliveira, F.G.R. & Sales, A. (2006).** Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18): 2443-2446. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- Del Menezzi, C.H.S., Silveira, R.R. & Sousa, M.R. (2010).** Predicting flexural properties of six Amazonian hardwoods using stress wave nondestructive method. *Acta Amazonica*, 40(2): 325-332. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000200011>
- Dlouhá, J., Alméras, T. & Clair, B. (2012).** Representativeness of wood biomechanical properties measured after storage in different conditions. *Trees*, 26(3): 695-703. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0636-9>
- Felton, A., Ranius, T., Roberge, J.M., Öhman, K., Lämås, T., Hynynen, J., Juutinen, A. et al. (2017).** Projecting biodiversity and wood production in future forest landscapes: 15 key modeling considerations. *Journal of Environmental Management*, N° 197. Pp: 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.001>
- Gonçalves, R., Trinca, A.J. & Pellis, B.P. (2014).** Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48(2): 269-287. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>
- Guitard, D. & Gachet, C. (2004).** Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. *Annals of Forest Science*, 61(2): 129-139. <https://doi.org/10.1051/forest:2004004>
- Harada, T. (2001).** Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test. *Fire and Materials*, 25(4): 161-167. <https://doi.org/10.1002/fam.766>
- Hernández, R.E. (2007).** Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Science and Technology*, 41(3): 249-265. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0114-5>
- Hofstetter, K. & Gamstedt, E. (2009).** Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review. *Holzforschung*, 63(2): 130-138. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.018>
- International Organization for Standardization (ISO). (2014a).** ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva, International Organization for Standardization. 4 p.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014b).** ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, International Organization for Standardization. 9 p.
- Katz, J.L., Spencer, P., Wang, Y., Misra, A., Marangos, O. & Friis, L. (2008).** On the anisotropic elastic properties of woods. *Journal of Materials Science*, 43(1): 139-145. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2121-9>
- Kabir, M.F. (2001).** Prediction of ultrasonic properties from grain angle. *Journal of the Institute of Wood Science*, 15(5): 235-246. En: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/2436>
- Longo, R., Laux, D., Pagano, S., Delaunay, T., Le Clézio, E. & Arnould, O. (2018).** Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): a comprehensive study. *Wood Science and Technology*, 52(2): 383-402. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0980-z>

- Longui, E.L., Brémaud, I., da Silva Júnior, F.G., Lombardi, D.R. & Alves, E.S. (2012). Relationship among extractives, lignin and holocellulose contents with performance index of seven wood species used for bows of string instruments. *IAWA Journal*, 33(2): 141-149. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000085>
- Mackerle, J. (2005). Finite element analyses in wood research: a bibliography. *Wood Science and Technology*, 39(7): 579-600. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0026-9>
- Malaga-Toboła, U., Łapka, M., Tabor, S., Nieslony, A. & Findura, P. (2019). Influence of wood anisotropy on its mechanical properties in relation to the scale effect. *International Agrophysics*, 33(3): 337-354. <https://doi.org/10.31545/intagr/110808>
- Mascia, N.T. & Vanalli, L. (2012). Evaluation of the coefficients of mutual influence of wood through off-axis compression tests. *Construction and Building Materials*, N° 30. Pp: 522-528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.048>
- Missanjo, E. & Matsumura, J. (2016). Wood Density and Mechanical Properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. *Forest*, 7(7): 1-12. <https://doi.org/10.3390/f7070135>
- Miyoshi, Y., Kojiro, K. & Furuta, Y. (2018). Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. *Journal of Wood Science*, 64(5): 509-514. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1730-z>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0842-4>
- Niklas, K.J. & Spatz, H.C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10): 1587-1594. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- Oh, S. (2017). Anisotropy of Softwood Structural Lumber Using the Elastic Modulus Determined by The Ultrasonic Nondestructive Method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 45(1): 20-27. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2017.45.1.20>
- Ordóñez Díaz, J.A.B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N.J., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M.J. & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, N°21. Pp: 77-126. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Ponnet, D., Elaveetil Vasu, A.E., Easwaran, J.C., Mohandass, A. & Chauhan, S.S. (2014). Destructive and non-destructive evaluation of seven hardwoods and analysis of data correlation. *Holzforschung*, 68(8): 951-956. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0193>
- Richter, C. (2015). *Wood Characteristics. Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation*. Heidelberg, Springer. 222 p.
- Rungwattana, K. & Hietz, P. (2017). Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics. *Functional Ecology*, 32(2): 260-272. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12970>
- Sandberg, D., Kutnar, A. & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies. A review. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, N° 10. Pp: 895-908. <https://doi.org/10.3832/ifer2380-010>
- Se Golpayegani, A., Thévenon, M.F., Gril, J., Masson, E. & Pourtahmasi, K. (2012). Toxicity potential in the extraneous compounds of white mulberry wood (*Morus alba*). *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 16(2): 227-238. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000018>
- Shmulsky, R. & Jones, P. D. (2011). *Forest products and Wood science. An introduction*. West Sussex, Wiley. 477 p.
- Silva Guzmán, J.A., Fuentes Talavera, F.J., Rodríguez Anda, R., Torres Andrade, P.A., Lomelí Ramírez, M.A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C. & Richter, H.G. (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. México, Comisión Nacional Forestal. 208 p.

- Smulski, S. (1997).** Engineered Wood Products: A Guide for Specifiers, Designers & Users. Madison, PFS Research Foundation. 356 p.
- Sonderegger, W., Martienssen, A., Nitsche, C., Ozyhar, T., Kaliske, M. & Niemz, P. (2013).** Investigations on the physical and mechanical behavior of sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.). European Journal of Wood and Wood Products, 71(1): 91-99. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0641-8>
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2015).** Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. https://www.researchgate.net/publication/276841418_Banco_FITECMA_de_caracteristicas_fisico-mecanicas_de_maderas_Mexicanas
- Sotomayor Castellanos, 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. https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera
- Sotomayor Castellanos, J.R., García Mariscal, J.L., Moya Lara, C.E. & Olgún Cerón, J.B. (2010a).** Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. Investigación e Ingeniería de la Madera, 6(3): 3-32. https://www.academia.edu/6528742/Higroscopía_y_anisotropía_de_la_madera_de_Pinus_michoacana_Pinus_douglasiana_y_Pinus_pringlei._Higocontracción_velocidad_del_ultrasonido_y_módulo_de_elasticidad_dinámico
- Sotomayor Castellanos, J.R., Guridi Gómez, LI. & García Moreno, T. (2010b).** 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, 6(1): 3-32. https://www.academia.edu/6528782/Características_acústicas_de_la_madera_de_152_especies_mexicanas._Velocidad_del_ultrasonido_módulo_de_elasticidad_índice_material_y_factor_de_calidad._Base_de_datos
- Sotomayor Castellanos, J.R. & Villaseñor Aguilar, J.M. (2017).** Determinación del módulo dinámico por ondas de esfuerzo en la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L. Ingeniería y Desarrollo, 35(2): 4012-416. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10168>
- Sotomayor Castellanos, J.R. & Villaseñor Aguilar, J.M. (2016).** Ultrasonido y anisotropía en madera de *Thuja plicata* y *Acer saccharum*. Maderas. Ciencia y Tecnología, 18(3): 467-476. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000042>
- Steiger, R. & Arnold, M. (2009).** Strength grading of Norway spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. Wood Science and Technology, 43(3-4): 259-278. <https://doi.org/10.1007/s002>
- Tamarit Urias, J.C. & López Torres, J.L. (2007).** Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Puebla, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 264 p.
- Tippner, J., Hrivnák, J. & Kloiber, M. (2016).** Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. BioResources, 11(1): 503-518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>
- Vargas, G. (2017).** Estrategias mecánicas de las plantas arborescentes: enseñanzas estructurales de los árboles. *Ingeniare*. Revista chilena de ingeniería, 25(3): 510-523. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000300510>
- Xu, W., Xu, G., Wang, L. & Yu L. (2014).** Propagation behavior of acoustic wave in wood. Journal of Forestry Research, 25(3): 671-676. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0506-6>
- Yamasaki, M., Tsuzuki, C., Sasaki, Y. & Onishi, Y. (2017).** Influence of moisture content on estimating young's modulus of full-scale timber using stress wave velocity. Journal of Wood Science, 63(3): 225-235. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1624-5>
- Yu, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z. & Fang, Y. (2017).** R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. Measurement, 95: 293-296. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.040>

Ziemińska, K., Westoby, M. & Wright, I. J. (2015). Broad anatomical variation within a narrow wood density range. A study of twig wood across 69 Australian angiosperms. PLoS ONE, 10(4): 1-25.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124892>