

Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México
javier.sotomayor@umich.mx

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar las densidades y los módulos de rigidez en tres maderas japonesas y tres maderas mexicanas. La unidad experimental consistió en 210 especímenes agrupados en muestras de treinta y cinco probetas de cada una de las seis especies. Se determinaron el contenido de humedad y la densidad, y se midieron las frecuencias naturales de vibración en pruebas de torsión dinámica. Las magnitudes de los módulos de rigidez son comparables con los de investigaciones anteriores. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades y los módulos de rigidez de las seis especies.

PALABRAS CLAVE

Contenido de humedad, densidad de la madera, resistencia mecánica, torsión dinámica.

ABSTRACT

The objective of the investigation was to determine the densities and stiffness modules in three Japanese woods and three Mexican woods. The experimental unit consisted of 210 specimens grouped in samples of thirty-five specimens of each of the six species. Moisture content and density were determined, and natural vibration frequencies were measured in dynamic torsion tests. The magnitudes of the modules of rigidity are comparable with those of previous investigations. However, there are statistically significant differences between the densities and modules of rigidity of the six species.

KEYWORDS

Moisture content, wood density, mechanical strength, dynamic torsion.

INTRODUCCIÓN

El módulo de rigidez expresa la capacidad para las pequeñas deformaciones angulares de una pieza de madera, cuando son provocadas por solicitaciones desalineadas, de tal forma que su rigidez explica la capacidad de deformación entre dos direcciones anisotrópicas de la madera. Este parámetro es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes; por ejemplo, en vigas que trabajan en flexión y en torsión, así como en conexiones entre elementos estructurales en edificaciones y en artículos de madera. En el mismo contexto, el aserrío de madera produce usualmente paralelepípedos para uso estructural, recortados en el plano radial-tangencial con al menos dos de sus caras mostrando planos longitudinales-tangenciales. De esta forma, cuando la madera está en servicio, trabaja como viga en flexión o como elemento resistente en productos compuestos de madera. El módulo de rigidez para el plano longitudinal-tangencial es el parámetro requerido para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.¹

Una de las tendencias contemporáneas en investigación en ciencias y tecnología de la madera es caracterizar el comportamiento mecánico de una especie en particular para sugerir su utilización en productos específicos de valor agregado. En este contexto, existen pocos estudios comparativos entre grupos de maderas de diferentes orígenes geográficos. La literatura sobre el tema de investigación es limitada cuanto al número de trabajos publicados recientemente. La tabla I presenta una selección de datos recolectados en la literatura de especies en orden alfabético con sus densidades y módulos de rigidez para el periodo comprendido entre 2003 y 2018.

Tabla I. Datos de la literatura sobre densidades y módulos de rigidez en diferentes especies de madera.

No.	Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)	Referencias
1	<i>Abies balsamea</i>	393	575	Hernández y Sotomayor (2014) ²
2	<i>Acosmium panamense</i>	1005	1622	Sotomayor (2018) ³
3	<i>Albizia plurijuga</i>	844	1792	Sotomayor (2018) ³
4	<i>Andira inermis</i>	716	1084	Sotomayor (2018) ³
5	<i>Cryptomeria japonica</i>	360	784	Anshari <i>et al.</i> (2011) ⁴
6	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	1511	Sotomayor (2018) ³
7	<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	Sotomayor (2016) ⁵
8	<i>Fagus crenata</i>	740	637	Naruse (2003) ⁶
9	<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar <i>et al.</i> (2013) ⁷
10	<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir <i>et al.</i> (2014) ⁸
11	<i>Juglans pyriformis</i>	810	1369	Sotomayor (2018) ³
12	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	716	1328	Sotomayor (2016) ⁵
13	<i>Pinus pseudostrabus</i>	540	922	Sotomayor (2015) ⁹
14	<i>Paulownia tomentosa</i>	300	703	Komán y Feher (2017) ¹⁰
15	<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz <i>et al.</i> (2014) ¹¹
16	<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang <i>et al.</i> (2018) ¹
17	<i>Picea sitchensis</i>	400	400	Yoshihara (2012) ¹²
18	<i>Piceea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013) ¹³
19	<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015) ¹⁴
20	<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015) ¹⁵
21	<i>Psidium sartorianum</i>	789	1067	Sotomayor (2018) ³
22	<i>Quercus scytophylla</i>	933	1294	Sotomayor (2015) ⁹
23	<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	Sotomayor (2016) ⁵
24	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	2320	Sotomayor (2018) ³
25	<i>Taxus baccata</i>	650	1650	Keunecke <i>et al.</i> (2007) ¹⁶
26	<i>Thuja plicata</i>	353	320	Sotomayor y Villaseñor (2016) ¹⁷

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez.

Los autores referidos en la tabla I emplean diferentes estrategias para determinar los módulos de rigidez en el plano longitudinal-tangencial (G_{LT}). Entre los métodos utilizados se pueden mencionar: las frecuencias de vibraciones torsionales en placas de madera posicionadas como vigas en voladizo;¹ los ensayos de compresión estática;² la utilización de vibraciones transversales;³ ensayos de compresión estática con diferentes contenidos de humedad de la madera;⁴ el estudio de placas de madera con frecuencias derivadas de vibraciones torsionales;^{5,15} pruebas de flexión estática con cuatro puntos, complementadas con métodos numéricos;⁶ uso de ultrasonido;⁷ pruebas de cortante estática;⁸ valores de módulos G_{TL} estimados a partir de modelos teóricos;⁹ pruebas de cortante estática;¹⁰ utilización de ultrasonido;^{11,16} empleo de placas de madera deformadas en torsión estática;¹² combinación de pruebas de flexión estática y dinámica con el método del elemento finito;¹³ ondas de esfuerzo;¹⁴ estudio de placas de madera con vibraciones torsionales en el plano tangencial- longitudinal.¹⁷ A manera de síntesis, en los trabajos citados se registra variabilidad en los resultados según la especie en estudio, así como la técnica empleada para la determinación de los módulos de rigidez. Además, se observa que sus magnitudes aumentan proporcionalmente a la densidad de las maderas.

Como hipótesis de trabajo, la investigación plantea que las magnitudes de los módulos de rigidez de tres maderas japonesas (*Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*), así como de tres maderas mexicanas (*Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*), son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar y comparar sus densidades y sus módulos de rigidez determinados experimentalmente con pruebas de torsión dinámica.

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se adquirieron probetas de madera de *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* en el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón. Igualmente, se prepararon probetas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México.

Las dimensiones de las probetas fueron 0.01 m de espesor por 0.15 m de ancho y 0.15 m de largo, alineadas de tal forma que las aristas correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento a una temperatura de 20°C (± 2°C) y a una humedad relativa del aire de 65 % (±5 %), hasta que la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio de 11 %.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó mediante la relación entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014.¹⁸ La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad, se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de ésta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014.¹⁹

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14²⁰ y siguen el procedimiento descrito en Sotomayor³ y Sotomayor y Villaseñor.¹⁷ La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz. La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo cual ocasionó vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial.

En conformidad con la norma ASTM E1876-15,²¹ en cada una de las 35 probetas de cada especie, se produjo un impacto empleando una esfera de acero de 0.005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0.01 m de longitud y de 0.002 m de espesor por 0.007 m de ancho. El impacto fue ejecutado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0.25 del ancho (b) y a 0.25 del largo (l) de cada espécimen (figura 1). Mediante el empleo de un aparato Grindosonic® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en el punto (s), en una posición simétrica respecto al punto de impacto. La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0.005 %. La frecuencia y el módulo de rigidez dinámico son rubricados con el subíndice "LT" para identificarlos como derivados de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

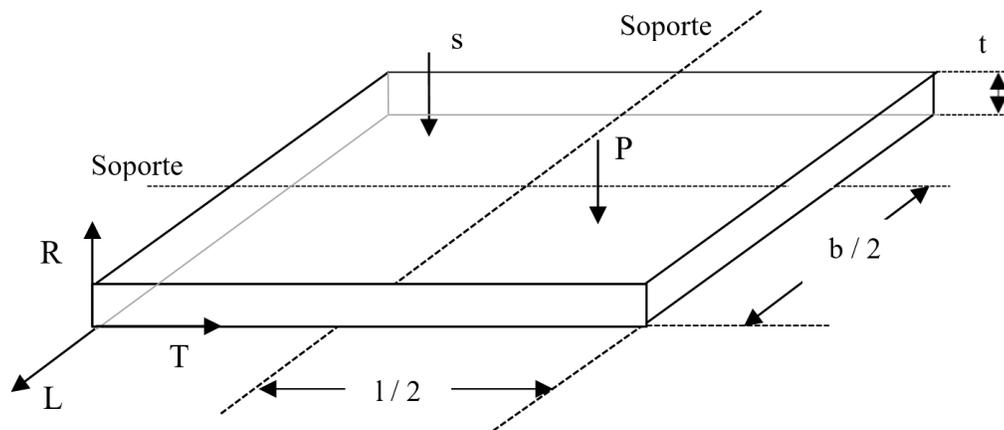


Fig. 1. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para ejecutar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho). Adaptado de la norma ASTM C1259-15.²⁰

El módulo de rigidez dinámico de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (1)²¹:

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

con

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4\left(\frac{t}{b}\right) - 2.52\left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0.21\left(\frac{t}{b}\right)^6}$$

$$A = \frac{0.5062 - 0.8776\left(\frac{b}{t}\right) + 0.3504\left(\frac{b}{t}\right)^2 - 0.0078\left(\frac{b}{t}\right)^3}{12.03\left(\frac{b}{t}\right) + 9.892\left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

Donde:

G_{LT} = Módulo de rigidez dinámico (N m⁻²)

f_{LT} = Frecuencia natural (Hz)

m = masa de la probeta (g)

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

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

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

A y B = Factores de ajuste geométrico

DISEÑO EXPERIMENTAL

La unidad experimental consistió en 210 especímenes agrupados en muestras de 35 probetas de cada una de las seis especies en estudio. Las variables de respuesta fueron la densidad y el módulo de rigidez. Se calcularon las medidas estadísticas de media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Asimismo, se realizaron pruebas de normalidad de las muestras. Los criterios de demarcación para aceptar una distribución normal fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]

Se realizaron pruebas de hipótesis de verificación de varianza (Ver-var) y de análisis de varianza (Anova) para un nivel de confianza de 95 %. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa fue los valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$. Se realizaron pruebas de rangos múltiples. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre los módulos de rigidez (G_{LT}) y las densidades (ρ_{CH}) para datos de esta investigación y de la literatura revisada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla II presenta las densidades y módulos de rigidez de tres maderas japonesas: *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*, así como de tres maderas mexicanas: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. La tabla III presenta los resultados, en las distribuciones de las muestras, de las pruebas estadísticas de normalidad, de verificación y análisis de varianza, así como de las pruebas de rangos múltiples.

Tabla II. Densidades y módulos de rigidez.

		ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)
Especies mexicanas			
<i>Pinus pseudostrobus</i>	μ	620	1141
	σ	105	281
<i>Tabebuia rosea</i>	μ	776	1563
	σ	81	299
<i>Quercus scytophylla</i>	μ	976	1204
	σ	30	96
Especies japonesas			
<i>Paulownia tomentosa</i>	μ	266	456
	σ	21	96
<i>Cryptomeria japonica</i>	μ	421	742
	σ	22	101
<i>Fagus crenata</i>	μ	629	1056
	σ	16	100

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar.

Tabla III. Resultados de las pruebas estadísticas.

Especies	Normalidad	SE	AE	Ver-var	Anova
				$P_{(\alpha = 0.5)}$	$P_{(\alpha = 0.5)}$
			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	-	-	
			G_{LT}		
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.769	-0.418	<0.001	<0.001	
<i>Tabebuia rosea</i>	0.250	-0.884	-	-	
<i>Quercus scytophylla</i>	1.351	0.743	-	-	
<i>Paulownia tomentosa</i>	1.519	-0.925	-	-	
<i>Cryptomeria japonica</i>	1.776	0.527	-	-	
<i>Fagus crenata</i>	0.289	-0.537	-	-	
Grupos Homogéneos 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
G_{LT}					
<i>Paulownia tomentosa</i>	X	-	-	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	X	-	-	-
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X	-	-
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	X	X	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	X	-
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	-	X

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; No existen diferencias estadísticamente significativas entre especies que comparten una misma columna de X.

Las pruebas de normalidad de las densidades y de los módulos de rigidez para las seis maderas indican que las distribuciones de sus muestras son normales (tabla III). Este resultado sugiere que las mediciones fueron uniformes. Por su parte, las pruebas de hipótesis advierten que existen diferencias estadísticamente significativas entre densidades y entre módulos de rigidez. En cambio, las pruebas de rangos múltiples específicamente muestran que no existen diferencias significativas entre las densidades de *P. pseudostrobus* y *F. crenata*. Para el caso de los módulos de rigidez, estas pruebas muestran que no existen diferencias significativas entre los de *F. crenata* y *P. pseudostrobus*, ni entre los de *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla*.

DENSIDADES

Las densidades observadas se sitúan en el intervalo de 266 kg m⁻³ para *P. tomentosa* hasta 976 kg m⁻³ para *Q. scytophylla* (tabla I). Los valores son similares a los reportados en la bibliografía para las maderas japonesas^{6,22-26} y para las maderas mexicanas.^{9, 27, 28} Las densidades de *F. crenata* y de *P. pseudostrobus* son similares; esta última es solamente 2 % mayor. Los coeficientes de variación para las seis especies fluctúan entre 3 % y 17 % y son semejantes a los reportados en la bibliografía para estas especies (figura 2).

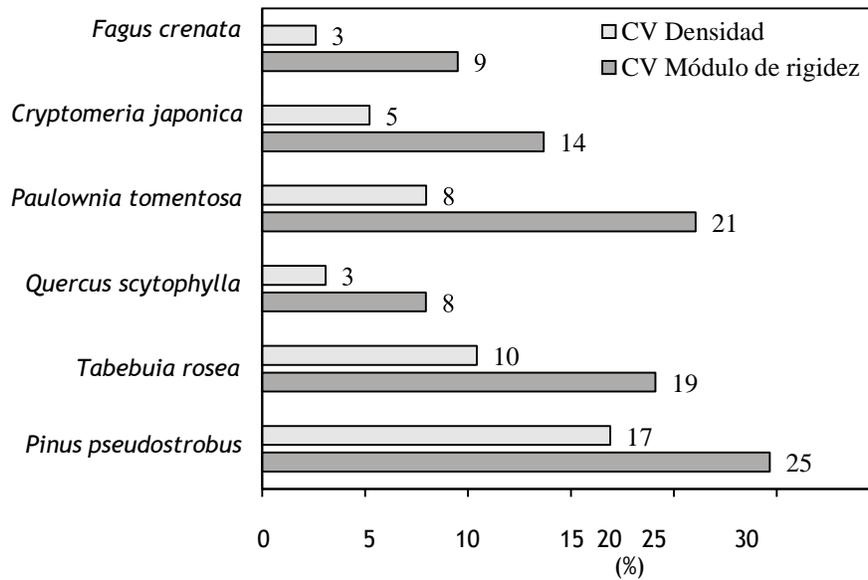


Fig. 2. Comparativo de los coeficientes de variación (CV).

MÓDULOS DE RIGIDEZ

Los módulos de rigidez de las maderas estudiadas en esta investigación son comparables con los de investigaciones anteriores (tabla I). Las magnitudes se sitúan en el intervalo que abarca desde un mínimo de 456 MN m^{-2} para *P. tomentosa* hasta un máximo de 1563 MN m^{-2} para *T. rosea* (tabla II). Sus coeficientes de variación oscilan desde 5 % en *C. japonica* hasta 25 % en *P. pseudostrobus* (figura 2).

Respecto a las maderas mexicanas, para *P. pseudostrobus* Sotomayor⁹ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 922 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 540 \text{ kg m}^{-3}$; para *T. rosea* Sotomayor⁵ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 879 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 592 \text{ kg m}^{-3}$; y para *Q. scytophylla* Sotomayor⁹ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 1294 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 933 \text{ kg m}^{-3}$. Respecto a las especies japonesas, Komán y Feher¹⁰ reportan para *P. tomentosa* una densidad $\rho_{CH} = 300 \text{ kg m}^{-3}$ y un módulo de rigidez de $G_{LT} = 703 \text{ MN m}^{-2}$; Anshari et al.⁴ reportan para *C. japonica* una densidad de $\rho_{CH} = 360 \text{ kg m}^{-3}$ correspondiente a un módulo de rigidez de $G_{LT} = 784 \text{ MN m}^{-2}$; y Naruse⁶ reporta para *F. crenata* una densidad $\rho_{CH} = 740 \text{ kg m}^{-3}$ y un módulo de rigidez $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$.

La figura 3 presenta dos correlaciones entre módulos de rigidez y densidades. La primera correlación se refiere a la de seis maderas de esta investigación. La segunda correlación representa el cálculo con datos de 26 especies recolectados en la bibliografía (tabla I). Se comparan las tendencias entre las correlaciones de los datos reportados.

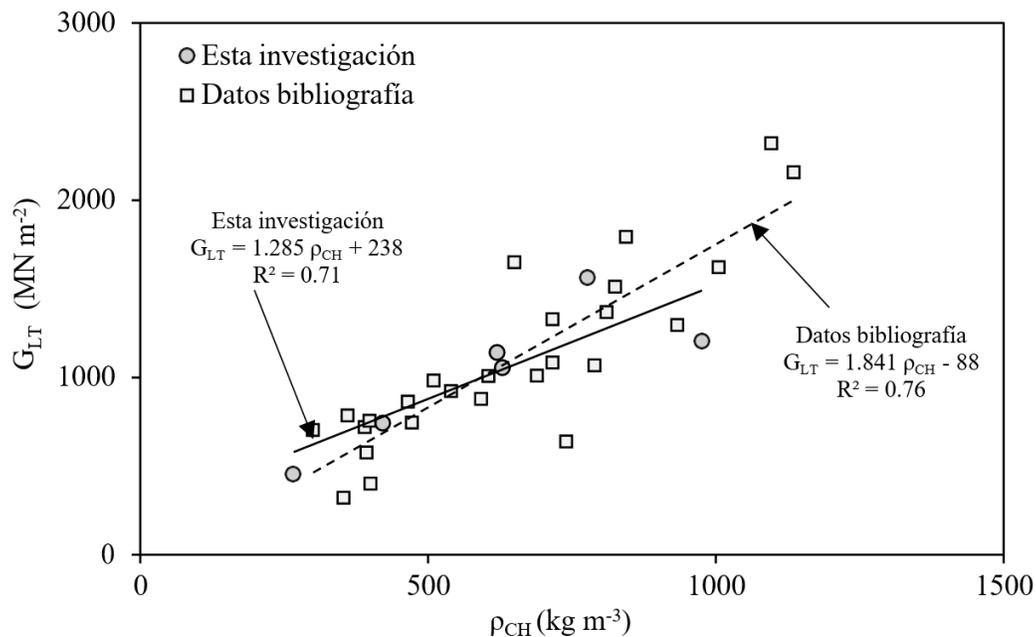


Fig. 3. Correlaciones entre los módulos de rigidez (G_{LT}) y las densidades (ρ_{CH}).

Se observa que las seis maderas de esta investigación presentan un fuerte coeficiente de determinación ($R^2 = 0.71$), aunque menor que el correspondiente a las maderas de la bibliografía, el cual también es importante ($R^2 = 0.76$). Estos resultados coinciden con las tendencias reportadas en la bibliografía^{3,5,29} para los módulos de rigidez y las densidades, y son análogos a los modelos de predicción para módulos de elasticidad y de ruptura publicados.^{30,31,32} Así se confirma el paradigma vigente en ciencias de la madera, el cual propone que la densidad de la madera es la característica física que predice su resistencia mecánica. Sin embargo, Olsson y Källsner¹³ de manera numérica y Guan et al.³³ experimentalmente, no reportan correlaciones estadísticas significativas entre densidades y módulos de rigidez determinados por vibraciones transversales de maderas de *Picea abies* y *Abies alba*.

El origen de las diferencias en magnitudes y relaciones entre el módulo de rigidez y la densidad de la madera puede ser explicado desde dos perspectivas. La primera es la influencia de la estructura material y el estado de la madera. Es decir, sus caracteres genéticos,^{34,35} su heterogeneidad anatómica,^{36,37} sus propiedades de anisotropía material,^{38,39} así como sus propiedades higroscópicas.^{40,41} Como resultado, la biodiversidad en las

especies de madera resulta en la combinación de estos factores y en su impacto en las mediciones para cada especie, individuo (árbol) y espécimen (probeta) observados. El segundo enfoque es considerar el tipo de sollicitación aplicada (axial, flexión, torsión),^{42,43} así como la velocidad de deformación (estática, dinámica).^{44,45}

CONCLUSIONES

Se determinaron las densidades y los módulos de rigidez con pruebas de torsión dinámica en tres maderas japonesas (*P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*), así como en tres maderas mexicanas (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*). Las magnitudes de los módulos de rigidez son comparables con las de investigaciones en otras especies. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas entre densidades y módulos de rigidez de las seis especies.

Los resultados sugieren que es conveniente caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera y debe llevarse a cabo con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. A partir de la obtención de observaciones estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten un comportamiento similar.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las maderas japonesas fueron proporcionadas por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

REFERENCIAS

1. Wang, Z., Xie, W., Wang, Z., y Cao, Y., “Strain method for synchronous dynamic measurement of elastic, shear modulus and Poisson’s ratio of wood and wood composites”, *Construction and Building Materials* 182, 608–619 (2018).
2. Hernández, S.A. y Sotomayor, J.R., “Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*”, *Madera y Bosques* 20(3), 113-123 (2014).
3. Sotomayor, J.R., “Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48), 1-23 (2018).
4. Anshari, B., Guan, Z.W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., y Komatsu, K., “Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar”, *Construction and Building Materials* 25(4), 1718-1725 (2011).
5. Sotomayor, J.R., “Módulos de rigidez dinámicos de siete maderas mexicanas determinados por vibraciones en torsión”, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2), 125-134 (2016).
6. Naruse, K., “Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests”, *Journal of Wood Science* 49(6), 479-484 (2003).
7. Ozyhar, T., Hering, S., Sanabria, S.J., y Niemz, P., “Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves”, *Wood Science and Technology* 47(2), 329- 341 (2013).
8. Nadir, Y., Nagarajan, P., y Midhun, A.J., “Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and Iosipescu shear test”, *European Journal of Wood and Wood Products* 72(6), 749-758 (2014).
9. Sotomayor, J.R., Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia (2015).
10. Komán, S. y Feher, S., “Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* wood planted in Hungaria”, *Wood Research* 62(2), 335-340 (2017).
11. Kránitz, K., Deublein, M., y Niemz, P., “Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices”, *Materials and Structures* 47(6), 925-936 (2014).
12. Yoshihara, H., “Shear modulus and shear strength evaluation of solid wood by a modified ISO 15310 square-plate twist method”, *Drvna Industrija* 63(1), 51-55 (2012).
13. Olsson, A. y Källsner, B., “Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis”, *Materials and Structures* 48(4), 977-985 (2013).

14. Cha, J.K., “Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests”, *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(1), 36-42 (2015).
15. Roohnia, M. y Kohantorabi, M., “Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood”, *BioResources* 10(3), 4867-4876 (2015).
16. Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteanu, K., Lüthi, T., y Niemz, P., “Determination of Young’s and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves”, *Wood Science and Technology* 41(4), 309-327 (2007).
17. Sotomayor, J.R. y Villaseñor, J. M., “Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L.”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 13(33), 20-28 (2016).
18. International Organization for Standardization. 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. International Organization for Standardization, Geneva (2014).
19. International Organization for Standardization. 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. International Organization for Standardization, Geneva (2014).
20. American Society for Testing and Materials (ASTM International). ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young’s modulus, shear modulus, and Poisson’s ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2015).
21. American Society for Testing and Materials (ASTM International). ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young’s modulus, shear modulus, and Poisson’s ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2015).
22. Harada, T., “Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test”, *Fire and Materials* 25(4), 161-167 (2001).
23. Kartal, S.N., Hwang, W., y Imamura, Y., “Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood”, *Journal of Materials Processing Technology* 198(1), 234-240 (2008).
24. Akyildiz, M.H. y Kol, H.S., “Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) Wood”, *Journal of Environmental Biology* 31(3), 351-555 (2010).
25. Kaygin, B., Kaplan, D., y Aydemir, D., “Paulownia Tree as an Alternative Raw Material for Pencil Manufacturing”, *BioResources* 10(2), 3426-3433 (2015).
26. Miyoshi, Y., Kojiro, K., y Furuta, Y., “Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension”, *Journal of Wood Science* 64(5), 509-514 (2018).
27. Silva, J.A., Fuentes, F.J., Rodríguez, R., Torres, P.A., Lomelí, M.A., Ramos, J., Waitkus, C. y Richter, H.G., *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*, Comisión Nacional Forestal, México (2010).
28. Tamarit, J.C. y López, J.L., *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México (2007).
29. Ehrhart, T. y Brandner, R., “Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft-and hardwood species”, *Engineering Structures* 172, 554-572 (2018).
30. Onoda, Y., Richards, A.E., y Westoby, M., “The relationship between stem biomechanics and wood density is modified by rainfall in 32 Australian woody plant species”, *The New Phytologist* 185(2), 493- 501 (2010).
31. Baar, J., Tippner, J., y Rademacher, P., “Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods”, *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(2), 239-252 (2015).
32. Guan, C., Zhang, H., Hunt, J.F., y Yan, H., “Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method”, *Construction and Building Materials* 121, 285-289 (2016).
33. Cavalli, A., Cibecchini, D., Goli, G., y Togni, M., “Shear modulus of old timber”, *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(2), 446-450 (2017).
34. Fernandes, C., Gaspar, M.J., Pires, J., Alves, A., Simões, R., Rodrigues, J.C., Silva, M.E., Carvalho, A., Brito, J.E., y Lousada, J.L., “Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal”, *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(4), 669-679 (2017).

35. Hayatgheibi, H., Fries, A., Kroon, J., y Wu, H.X., "Genetic analysis of lodgepole pine (*Pinus contorta*) solid-wood quality traits", *Canadian Journal of Forest Research* 47(10), 1303-1313 (2017).
36. Hofstetter, K., y Gamstedt, K., "Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review", *Holzforschung* 63(2), 130-138 (2009).
37. Uetimane Jr, E., y Ali, A.C., "Relationship between mechanical properties and selected anatomical features of Ntholo (*Pseudolachnostylis maprounaefolia*)", *Journal of Tropical Forest Science* 23(2), 166- 176 (2011).
38. Brémaud, I., Gril, J., y Thibaut, B., "Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data", *Wood Science and Technology* 45(4), 735-754, (2011).
39. Machado, J.S., Louzada, J.L., Santos, A. J.A., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R.M.S., y Pereira, H., "Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.)", *Materials and Design* 56, 975-980 (2014).
40. Jiang, J., Lu, J., y; Cai, Z., "The vibrational properties of Chinese fir wood during moisture sorption process", *BioResources* 7(3), 3585-3596 (2012).
41. Sheikh, A.A., y Stergios, A., "Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments", *Applied Acoustics* 140, 92-99 (2018).
42. Oberhofnerová, E., Arnetová, K., Holeček, T., Borůvka, V., y Bomba, J., "Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering", *BioResources* 11(2), 5155-5168 (2016).
43. Pierrejean, I., Mehinto, T., y Beauchene, J., "Comparative analysis of three different methods used to determine the elastic modulus for a choice of tropical Guianese wood species", *Pro Ligno* 13(1), 3-17 (2017).
44. Chauhan, S., y Sethy, A., "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 (2016).
45. Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., y Crews, K., "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 (2016).