

## Caracterización dinámica de la madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*

VILLASEÑOR-AGUILAR, José\*† y SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N. Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

Recibido Enero 12, 2015; Aceptado Mayo 19, 2015

### Resumen

La frecuencia natural de vibración, el módulo de elasticidad dinámico, el factor de calidad y el índice material de la madera, encuentran su utilidad como indicadores de calidad y parámetros de diseño. El objetivo de la investigación fue determinar estas características de la madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei* empleando vibraciones transversales. Las pruebas mecánicas consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular de 32 probetas normalizadas de cada especie. El experimento comparó las medias de la densidad, de la frecuencia natural, del módulo de elasticidad, del factor de calidad y del índice material como las variables de respuesta. La especie de madera fue considerada el factor de variación. Los resultados de las pruebas estadísticas demostraron que no hay diferencia significativa entre las medias de cada una de las dos muestras de datos, con excepción de la variable frecuencia natural. Así, se concluye que la madera de *F. americana* y *F. uhdei* pueden ser consideradas, con cierta reserva, como mecánicamente equivalentes.

**Frecuencia natural, el módulo de elasticidad dinámico, factor de calidad, índice material**

### Abstract

The natural frequency vibration, the dynamic modulus of elasticity, the quality factor and the wood material index, find their usefulness as quality indicators and design parameters. The goal of the research was to determine these characteristics in the *Fraxinus americana* and *Fraxinus uhdei* woods by means of using transversal vibrations. The mechanical tests consisted of measuring perpendicularly the natural frequency vibration of 32 standardized specimens of each wood species. The research compared the means of the density, the natural frequency, the modulus of elasticity, the quality factor and the material index as the response variables. The wood species was considered to be the variation factor. Results from the statistical analyses showed that there are not statistically significant differences within the means of the two data groups, with exception of the natural frequency variable. In this way it is concluded that the *F. americana* and *F. uhdei* woods can be considered with a certain reserve as mechanically equivalents.

**Natural frequency, modulus of elasticity, quality factor, acoustic impedance**

**Citación:** VILLASEÑOR-AGUILAR, José y SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier. Caracterización dinámica de la madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*. Revista de Aplicación Científica y Técnica 2015, 1-1: 43-53

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: osmavia@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los métodos de evaluación no destructivos que emplean la capacidad de la madera para almacenar y disipar energía para caracterizar su comportamiento mecánico han confirmado su utilidad para predecir, entre otros parámetros mecánicos del material, su frecuencia natural de vibración y el módulo de elasticidad dinámico.

Respecto a la utilización de tecnologías de carácter no destructivo y de su aplicación en el estudio de la madera Ilic (2001) realizaron pruebas de flexión en vibraciones transversales y de flexión estática sobre probetas normalizadas. Más información sobre la aplicación de métodos no destructivos en la caracterización mecánica de la madera se encuentra en Pellerin y Ross (2002).

El desarrollo de productos fabricados con madera, requiere además información normalizada y confiable de las propiedades de este material. Una de las características mecánicas más necesarias en Ingeniería de la madera es el módulo de elasticidad, el cual encuentra su utilidad como parámetro de diseño, cálculo e indicador de calidad.

El módulo de elasticidad dinámico de la madera es determinado empleando métodos de evaluación de carácter no destructivo, Una aplicación práctica es en la verificación de los métodos de laboratorio referentes a la calidad de resultados obtenidos en ensayos mecánicos, de acuerdo con el Manual de Construcción con Madera del Instituto Americano de Construcción con Madera (American Institute of Timber Construction, 2012).

La madera es un material ampliamente usado en Ingeniería que se comporta mecánicamente como un sólido elástico y que obedece las leyes de la Resistencia de Materiales. Sin embargo, los elementos estructurales de madera sometidos a cargas dinámicas como en el caso de impactos, vibraciones y sismos, sufren cargas más fuertes que las predichas por el diseño estructural tradicional (American Institute of Timber Construction, 2012). Este comportamiento depende, entre otros factores, de la intensidad y duración de la carga y de la rigidez del miembro estructural. Con el objeto de asegurar la fiabilidad de la estructura, es necesario anticipar un comportamiento conjunto que resulta de la respuesta elástica y dinámica de la madera.

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera en condiciones dinámicas y los métodos de laboratorio desarrollados son de carácter no destructivo y han utilizado la hipótesis fundamental en mecánica de la madera propuesta por Jayne (1959): la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella.

En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda mecánica denota su capacidad para disipar energía. Jayne propuso así la hipótesis de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía, están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera.

Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos como las correlaciones estadísticas. Esta proposición ha sido verificada experimentalmente en los trabajos de De Oliveira y Sales (2006) y de Chan et al. (2011).

Por otra parte, a partir de la teoría propuesta por Timoshenko et al. (1937), sobre la resistencia de materiales aplicada al estudio de vigas en Ingeniería, Hearmon (1966) estudió el comportamiento anisotrópico de la madera y la relación de esbeltez de las probetas en un ensayo de flexión en vibración transversal. A partir de sus resultados empíricos, el autor formuló el procedimiento experimental, utilizado posteriormente por diferentes autores en estudios sobre el comportamiento elástico de la madera. Sus valores de laboratorio del módulo de elasticidad para *Fraxinus excelsior* a un contenido de humedad del 12% determinado en un ensayo de flexión en vibración transversal fue de 14,000 MPa y para el módulo de elasticidad en flexión estática fue de 10,000 MPa, es decir una diferencia de 40%.

Con el propósito de confirmar la utilidad de la teoría de análisis de vigas, propuesta por Goens (1931) y Timoshenko et al. (1994), Perstorper (1992) comparó el módulo de elasticidad en vigas de dimensiones estructurales de *Picea excelsa*, aplicando ensayos de vibración transversal y de flexión estática.

Los resultados encontrados por Perstorper (1992) en *Picea excelsa* a un contenido de humedad del 12% para el módulo de elasticidad dinámico fue de 9,000 MPa y para el módulo de elasticidad estático fue de 8,000 MPa, es decir una diferencia del 12.5%. Además, el autor encontró regresiones entre los valores dinámicos y estáticos con coeficientes de correlación en promedio de 0.94, confirmando de esta manera la relación entre los dos parámetros calculados con métodos donde varía la velocidad de la aplicación de la carga.

Respecto a la utilización de tecnologías de carácter no destructivo y de su aplicación en el estudio de la madera, Görlacher (1984) realizó pruebas de flexión en vibración transversal sobre probetas normalizadas, utilizando la tecnología Grindosonic® y la metodología desarrollada anteriormente por Kollmann y Krech (1960) y Hearmon (1966). El autor comprobó la utilidad de este método experimental para la determinación del módulo de elasticidad en flexión transversal por vibración en la madera. Los datos del módulo de elasticidad dinámico de 15,000 MPa fueron superiores en 7% comparados al módulo de elasticidad estático de 14,000 MPa.

Haines et al. (1996) determinaron el módulo de elasticidad en flexión para un contenido de humedad del 12%, en vibración transversal para la madera de *Picea excelsa* que resultó en 11,000 MPa y *Abies amabilis* el cual fue de 13,000 MPa. Sus resultados demostraron que el módulo de elasticidad dinámico calculado para madera estructural fue 6% superior al módulo de elasticidad estático y para probetas de pequeñas dimensiones la diferencia respectiva fue de 3%. Los autores hacen notar que las propiedades visco elásticas de la madera influyen en la diferencia de valores entre los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos.

Por su parte, Ilic (2001) estudió la relación entre los valores dinámicos y estáticos provenientes de ensayos de flexión transversal en probetas de pequeñas dimensiones a un contenido de humedad del 12% de *Eucalyptus delegatensis* y encontró que el módulo de elasticidad dinámico de 16,000 MPa es mayor que el módulo de elasticidad estático de 14,000 MPa en 14 %.

De la revisión de autores sobre el tema en estudio se puede sintetizar que los métodos de flexión en vibración transversal y flexión estática se han utilizado con éxito para determinar el módulo de elasticidad de la madera, y que el valor dinámico es generalmente mayor al estático.

El factor de calidad (Radiation ratio R en Spycher et al. 2008) es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa, es decir, una vocación para “madera de resonancia”, de acuerdo con Müller (1986) y Ono y Norimoto (1983).

Un índice material es la combinación de las propiedades físico-químicas de un material, las cuales caracterizan su rendimiento para una aplicación específica. Un significativo índice material de una madera propone una mejor resistencia en relación a su densidad y una buena apreciación como material de ingeniería (Ashby, 2010). Por ejemplo, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material que relaciona su módulo de elasticidad con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos (Sotomayor-Castellanos et al. 2010).

El objetivo de la investigación fue determinar las características dinámicas y los indicadores de calidad de la madera de *F. americana* y *F. uhdei* empleando vibraciones transversales.

La investigación se fundamenta en la teoría de la resistencia de materiales y en la teoría de vibraciones. Además, la proposición se concreta a su comportamiento en solicitaciones de flexión dinámica en vibración transversal sobre apoyos simples, en condiciones de invariabilidad térmica y sin variación espacial del contenido de humedad en las probetas de la madera.

### **Materiales y métodos**

El material experimental consistió en madera de *Fraxinus americana* L. y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., recolectada en terrenos forestales de Estado de Michoacán, México. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería de la Madera, UMSNH. A partir de piezas de madera aserrada, para cada especie se prepararon 32 probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m x 0.32 m, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso, de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, 2014). La madera se almacenó durante 6 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa de 60% ( $\pm 2$  %), hasta que su peso fue constante.

### Contenido de humedad y densidad

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos con grupos complementarios de probetas. Para cada probeta se calculó la densidad correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas. Igualmente, se midió la frecuencia natural en vibraciones transversales. El análisis estadístico de los resultados se realizó con el programa de análisis estadístico *Statgraphics*®.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (Sotomayor-Castellanos y Ramírez-Pérez, 2013):

$$CH = \frac{P_{CH} - P_A}{P_A} (100) \quad (1)$$

Dónde:

CH = Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%)

$P_{CH}$  = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

$P_A$  = Peso de la probeta en estado anhidro:  
CH = 0% (kg)

La densidad de la madera se calculó con la fórmula (Fuentes-Salinas, 2000):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (2)$$

Dónde:

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$P_{CH}$  = Peso de la barra a un contenido de humedad CH (kg)

$V_{CH}$  = Volumen de la barra a un contenido de humedad CH ( $\text{m}^3$ )

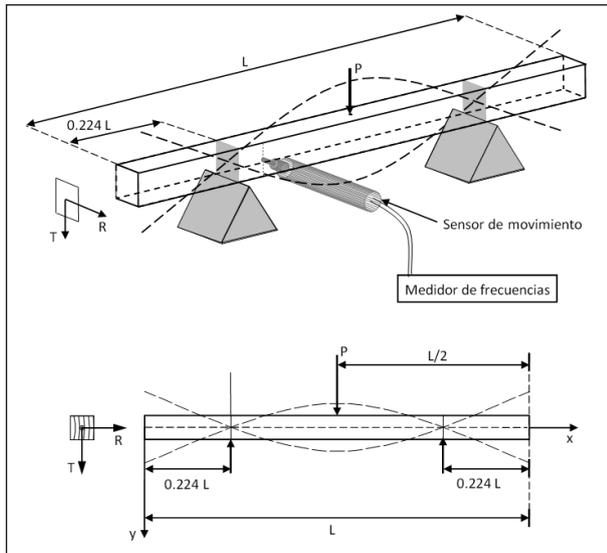
### Pruebas de vibraciones

Las pruebas de vibraciones transversales (vt) consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*®. La figura 1 muestra el montaje de laboratorio y el sensor con el cual se registró la vibración de la viga y se midió la frecuencia natural del sistema. La Figura 2 presenta la configuración de las pruebas de vibraciones transversales.

El impulso elástico inicial fue aplicado en el centro geométrico de la cara superior de la probeta, en la dirección transversal a la misma, apoyada sobre dos soportes rígidos de tipo simples a una distancia nodal de 0.224 L, siguiendo los protocolos de (Sotomayor-Castellanos et al. 2007).



**Figura 1** Dispositivo para pruebas no destructivas de vibraciones transversales y aparato *Grindosonic*® (Sotomayor-Castellanos et al. 2007).



**Figura 2** Configuración de las pruebas de vibraciones transversales. P = Impacto; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial (Sotomayor-Castellanos et al. 2007).

El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior. Durante la prueba se calculó el momento de inercia de la sección transversal de la probeta correspondiente al ensayo.

A partir de la ecuación de movimiento de una viga en vibraciones transversales:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left( m_l r^2 + \frac{EI m_l}{K' AG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_l^2 r^2}{K' AG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (1)$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad de la madera (Pa)

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m<sup>4</sup>)

m<sub>l</sub> = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg/m)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m<sup>2</sup>)

G = Módulo de Rigidez de la madera (Pa)

y = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m)

x = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m)

t = Tiempo (s)

K' = Factor de forma en cortante. (0.833 para probetas prismáticas)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m<sup>2</sup>), con:  $r = \sqrt{I/A}$

Se calculó el módulo de elasticidad en vibraciones transversales con la fórmula (Machek et al. 2001):

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_H}{m^4 r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K \right) \quad (2)$$

Dónde:

E<sub>vt</sub> = Módulo de elasticidad en vibraciones transversales (Pa)

L<sub>vt</sub> = Largo de la probeta (m)

l<sub>vt</sub> = Distancia entre apoyos (m)

f<sub>vt</sub> = Frecuencia natural de la probeta (Hz)

ρ<sub>H</sub> = Densidad de la madera a un contenido de humedad H (kg/m<sup>3</sup>)

m, K = Constantes adimensionales (12.65, 49.48)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m<sup>2</sup>)

Con:  $r = \sqrt{I/A}$

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m<sup>4</sup>)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m<sup>2</sup>)

El factor de calidad en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (Spycher et al. 2008):

$$F_{vt} = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_{CH}^3}} \quad (3)$$

Dónde:

$F_{vt}$  = Factor de calidad de la madera en vibraciones transversales ( $m^4/s \times kg$ )

$E_{vt}$  = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad H ( $kg/m^3$ )

El índice material en vibraciones transversales se calculó con la fórmula (Ashby, 2010):

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{CH}} \quad (4)$$

Dónde:

$I_{vt}$  = Índice material de la madera en vibraciones transversales ( $m^2/s^2$ )

$E_{vt}$  = Módulo de elasticidad de la madera en vibraciones transversales (Pa)

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $kg/m^3$ )

### Diseño experimental

Se diseñó un análisis siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012). Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics®*. El experimento comparó las medias de la densidad, de la frecuencia natural, del módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material de la madera como las variables de respuesta evaluadas para cada una de las especies de *F. americana* y *F. uhdei*. La especie de madera fue considerada el factor de variación.

El contenido de humedad de la madera se estima una variable fija. Se efectuaron 3 pruebas con 32 réplicas en cada especie. El promedio de las 3 pruebas se consideró como valor particular para cada probeta.

Suponiendo una distribución normal con media cero ( $\bar{x} = 0$ ) y varianza constante ( $\sigma^2$ ) e independientes entre sí, para cada prueba de diferencia de medias se verificó la hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ , y se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . El método empleado para discriminar entre las medias fue una prueba *t* de *student* con nivel de significancia de 95%.

### Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta la densidad, la frecuencia natural, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material de la madera de *F. americana* y *F. uhdei*.

La magnitud de los parámetros  $\rho_{CH}$ ,  $f_{vt}$ ,  $E_{vt}$ ,  $F_{vt}$  e  $I_{vt}$ , así como sus respectivos coeficientes de variación, indicados en la Tabla 1, son coherentes con la información para maderas mexicanas de densidad comparable, presentada por Silva-Guzmán et al. (2007), Tamarit-Urias y López-Torres (2007) y Sotomayor-Castellanos (2015).

Al mismo tiempo, sus valores numéricos son similares, resultado que dificulta su diferenciación como especies diferentes, de acuerdo con sus características físico-mecánicas. De tal forma, que es necesario realizar un análisis estadístico detallado.

	$\rho_{CH}$	$f_{vt}$	$E_{vt}$	$F_{vt}$	$I_{vt}$
	(kg/m <sup>3</sup> )	(Hz)	(MPa)	(m <sup>4</sup> /s x kg)	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
<i>Fraxinus americana</i>					
x	631	370	10,901	6.61	17.36
$\sigma$	34.14	24.64	1,840	0.85	3.22
CV	5.41	6.67	16.88	12.84	18.55
<i>Fraxinus uhdei</i>					
x	625	343	10,607	6.59	16.96
$\sigma$	29.72	16.68	1,268	0.44	1.77
CV	4.76	4.86	11.96	6.64	10.41

$\rho_{CH}$ : Densidad;  $f_{vt}$ : Frecuencia natural;  $E_{vt}$ : Módulo de elasticidad;  $F_{vt}$ : Factor de calidad;  $I_{vt}$ : Índice material; x = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%).

**Tabla 1** Características dinámicas.

La magnitud de los parámetros  $\rho_{CH}$ ,  $f_{vt}$ ,  $E_{vt}$ ,  $F_{vt}$  e  $I_{vt}$ , así como sus respectivos coeficientes de variación, indicados en la Tabla 1, son coherentes con la información para maderas mexicanas de densidad comparable, presentada por Silva-Guzmán et al. (2007), Tamarit-Urias y López-Torres (2007) y Sotomayor-Castellanos (2015). Al mismo tiempo, sus valores numéricos son similares, resultado que dificulta su diferenciación como especies diferentes, de acuerdo con sus características físico-mecánicas. De tal forma, que es necesario realizar un análisis estadístico detallado.

### Análisis estadístico

Las pruebas *t* de *student* para evaluar la hipótesis específica acerca de la diferencia entre las medias de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras y construida para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0, *versus* la hipótesis alterna de que la diferencia no es igual a 0, resultó, para todas las variables de respuesta y con excepción de la frecuencia natural, que el valor *P* calculado no es menor que 0.05, de tal forma, que no se puede rechazar la hipótesis nula (Tabla 2).

Parámetro	Valor <i>P</i>	Diferencia
$\rho_{CH}$	0.453388	nds
$f_{vt}$	0.00000433426	*
$E_{vt}$	0.459493	nds
$F_{vt}$	0.933833	nds
$I_{vt}$	0.542949	nds

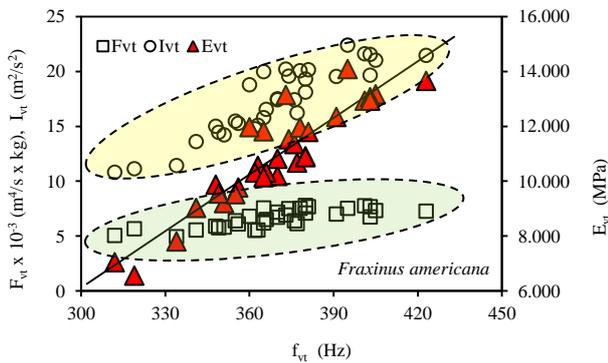
$\rho_{CH}$  = Densidad;  $f_{vt}$  = frecuencia natural;  $E_{vt}$  = Módulo de elasticidad;  $F_{vt}$  = Factor de calidad;  $I_{vt}$  = Índice material; \* = diferencia significativa para un nivel de confianza del 95%; nds = no diferencia significativa.

**Tabla 2** Pruebas de comparación de medias.

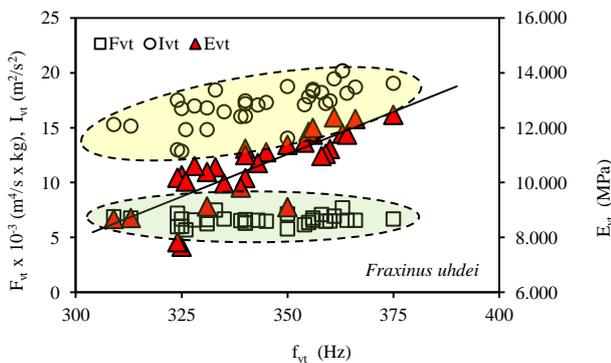
Estos resultados sugieren que para fines de cálculo y diseño estructural, las especies de *F. americana* y *F. uhdei*, pueden ser consideradas como equivalentes, ponderando siempre su contenido de humedad y el proceso de estabilización al cual fuesen sometidos para un empleo específico.

Para el caso específico de la frecuencia natural, esta variable resultó un buen predictor del módulo de elasticidad. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ), para correlaciones simples  $E_{vt} = f(f_{vt})$ , es superior para *F. americana* (Figura 3), en comparación con el de *F. uhdei* (Figura 4).

Para las dos especies, resultados similares fueron encontrados para la frecuencia natural como predictor del factor de calidad ( $F_{vt}$ ) y del índice material ( $I_{vt}$ ) (Figuras 3 y 4). En efecto, una vez que los valores del módulo de elasticidad de la madera son ponderados por su densidad, son los índices de calidad los que homogenizan criterios para la caracterización mecánica de la madera de acuerdo con Ashby (2010).



**Figura 3** Dispersión del factor de calidad ( $F_{vt}$ ) y del índice material ( $I_{vt}$ ) de la madera de *F. americana*, en función de la frecuencia natural ( $f_{vt}$ ) y la correlación entre el módulo de elasticidad ( $E_{vt}$ ) y la frecuencia natural ( $f_{vt}$ ):  $E_{vt} = 68.7 f_{vt} - 14,497$  con  $R^2 = 0.85$ .



**Figura 4** Dispersión del factor de calidad ( $F_{vt}$ ) y del índice material ( $I_{vt}$ ) de la madera de *F. uhdei*, en función de la frecuencia natural ( $f_{vt}$ ) y la correlación entre el módulo de elasticidad ( $E_{vt}$ ) y la frecuencia natural ( $f_{vt}$ ):  $E_{vt} = 61.87 f_{vt} - 10,617$  con  $R^2 = 0.66$

## Conclusiones

La densidad y la frecuencia de la madera de *F. americana* y *F. uhdei* son diferentes. Sin embargo, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y el índice material, pueden ser considerados, bajo cierta reserva, como mecánicamente equivalentes.

La frecuencia natural es predictor del factor de calidad y del índice material.

## Referencias

- American Institute of Timber Construction. (2012). Sixth Edition. *Timber Construction Manual*. John Wiley & Sons, Inc. USA. 904 p.
- Ashby, M.F. (2010). *Materials selection in mechanical design*. Fourth Edition. Butterworth Heinemann. England. 640 p.
- Chan, J.M., Walker, J.C. & Raymond, C.A. (2011). Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiata pine sapwood boards. *Wood Science and Technology*, 45, 609-626.
- De Oliveira, F.G.R., & Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97, 2443-2446.
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
- Goens, E. (1931). Determination of Young's modulus from flexural vibrations. *Annalen der Physik*, 11(6), 649-678.
- Görlacher, R. (1984). Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*, (42), 212-222.
- Gutiérrez-Pulido, H., & de la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México. McGraw Hill. 564 p.

- Haines, D.W., Leban, J.M., & Herbé, C. (1996). Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, (30), 253-263.
- Hearmon, R.F.S. (1966). Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products Journal*, 16(8), 29-40.
- Ilic, J. (2001). Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*, (59), 169-175.
- International Organization for Standardization. (ISO). (2014). ISO 13061-1:2014. Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- Jayne, B.A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9(11), 413-416.
- Kollmann, F. & Krech, H. (1960). Dynamische Messung der Elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. *Holz Roh-Werkstoff*, (18), 41-54.
- Machek, L., Militz, H., & Sierra-Alvarez, R. 2001. The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests. *Wood Science and Technology*, 34(6), 467-472.
- Müller, H.A. (1986). How violinmakers choose wood and what this procedure means from a physical point of view. Paper presented at Catgut Acoustical Society International Symposium on musical Acoustics. USA.
- Ono, T. & Norimoto, M. (1983). Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Japan Journal of Applied Physics*, 22(4), 611-614.
- Pellerin, R.F., & Ross, R.J. Editors. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. USA. 210 p.
- Perstorper, M. (1992). Predicting the stiffness of structural timber using dynamic modal tests. In Proceedings of IUFRO S5.02 Timber Engineering 1992 Conference. France. pp: 305-324.
- 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. Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal, México. 208 p.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 65 p.
- Sotomayor-Castellanos, J.R., & Ramírez-Pérez, M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-29.
- Sotomayor-Castellanos, J.R., Guridi-Gómez, L.I., & García-Moreno, T. (2010). 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.

Sotomayor-Castellanos, J.R., Villaseñor-Aguilar, J.M., & I. Aoi. (2007). Módulos de elasticidad evaluados por métodos no destructivos y ruptura de la madera de *Pinus douglasiana*: Vibraciones transversales, ultrasonido, ondas de esfuerzo y flexión estática. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 3(2), 3-17.

Spycher, M., Schwarze, F.W.M.R., & Steiger, R. (2008). Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*, 42, 325-342.

Tamarit-Urias, J.C., & López-Torres, J.L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. Libro técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México. 264 p.

Timoshenko, S. (1937). Second Edition. *Vibration problems in Engineering*. New York: D Van Nostrand Company. USA. 470 p