

Características acústicas de la madera de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*

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

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

Recibido Enero 6, 2015; Aceptado Junio 10, 2015

Resumen

La densidad, la velocidad del ultrasonido, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y la impedancia acústica, son los parámetros más significativos para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. El objetivo de esta investigación fue determinar las características acústicas de las maderas de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*, realizando pruebas de ultrasonido. El experimento comparó las medias de la densidad, velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, coeficiente de radiación acústica y la impedancia acústica, como las variables de respuesta. La especie fue considerada el factor de variación. Los principales resultados son: la densidad de las dos especies es diferente. La velocidad del ultrasonido, de *S. humilis*, es menor comparativamente con la de *A. acuminata*. Los módulos de elasticidad son numéricamente similares. La velocidad es un predictor del módulo de elasticidad. Los descriptores impedancia acústica y coeficiente de radiación se distinguen bien entre sí siendo mayores los de *S. humilis*, que los de *A. acuminata*.

Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, factor de calidad, impedancia acústica

Abstract

The density, the ultrasound speed, the modulus of elasticity, the quality factor and the acoustic impedance, are the more significant parameters to determine the wood quality for acoustic applications. The goal of the present research was to determine the wood acoustic characteristics of *Swietenia humilis* and *Alnus acuminata* by means of using ultrasonic testing. The research compared the means of the density, the ultrasound speed, the modulus of elasticity, the coefficient of acoustic radiation and the acoustic impedance as the response variables. The wood species was considered to be the variation factor. The main results are: the wood density of the two species is different, the ultrasound speed of the *S. humilis* is slower compared to the ultrasound speed of the *A. acuminata*. The moduli of elasticity are numerically similar, the speed is a good predictor of the modulus of elasticity. The acoustic impedance and the coefficient of radiation descriptors are well distinguished within them, being greater those of *S. humilis* than of *A. acuminata*.

Ultrasound speed, modulus of elasticity, quality factor, acoustic impedance

Citación: SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier y VILLASEÑOR-AGUILAR, José. Características acústicas de la madera de *Swietenia humilis* y *Alnus acuminata*. Revista de Aplicación Científica y Técnica 2015, 1-1: 28-33

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: madera999@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Para una adecuada evaluación de la madera en aplicaciones acústicas, por ejemplo su calidad de tono para instrumentos musicales, son necesarios entre otros parámetros, la densidad, la velocidad del ultrasonido, el módulo de elasticidad, el factor de calidad y la impedancia acústica (Wegst, 2008 y Spycher et al. 2008).

La velocidad del ultrasonido y el módulo de elasticidad derivado, son parámetros de utilidad en la clasificación mecánica de la madera para usos específicos (Bucur, 2006). El coeficiente de radiación acústica (R) (Spycher et al., 2008) y la impedancia acústica (z) (Wegst, 2008) son los parámetros más significativos para la determinación de la calidad de la madera para aplicaciones acústicas. Valores altos de R y z en una madera, indican una buena calidad acústica comparativa, es decir, una vocación para “madera de resonancia” (Bucur, 2006).

La madera es un componente que compete con otros materiales y tecnologías propias de la industria de fabricación de instrumentos musicales. Con el objeto de mejorar la productividad industrial, es necesario el conocimiento fundamental de los atributos relativos a su aptitud para fabricar con este material. Igualmente, es recomendable contar con información técnica de materiales para su incorporación en el proceso de elaboración de artículos donde las características acústicas son relevantes, por ejemplo, la incorporación de la madera en elementos estructurales con funciones aislantes de ruido.

La caracterización mecánica-acústica de la madera ha sido posible gracias a la aplicación de métodos de evaluación de carácter no destructivo en el estudio de especies con vocación acústica y constructiva (Bucur, 2006; Pellerin y Ross, 2002). Particularmente, la técnica que utiliza ondas mecánicas para determinar la velocidad del ultrasonido en la madera y así estimar su módulo de elasticidad, está documentada recientemente, entre otros, por Sandoz et al. (2000).

En México existen publicaciones que proponen maderas mexicanas para su estudio y promoción en aplicaciones acústicas. Entre otros autores se pueden citar: Gutiérrez-Carvajal y Dorantes-López (2007) y Tamarit-Urias y López-Torres (2007). Para recomendar el uso y/o la promoción de ciertas especies mexicanas, los trabajos citados parten del análisis de la estructura anatómica de las maderas. Como complemento, los autores retoman la opinión de fabricantes de instrumentos musicales.

El objetivo de esta investigación fue determinar las características acústicas de las maderas de *S. humilis* y *A. acuminata*, realizando pruebas de ultrasonido en la dirección longitudinal del plano leñoso. Los parámetros estudiados son: densidad, velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, coeficiente de radiación acústica y la impedancia acústica.

Materiales y métodos

Se recolectó madera de las especies *Swietenia humilis* Zucc. y *Alnus acuminata* arguta (Schlecht.) Furlow, en el Estado de Michoacán, México y se recortaron barras de 0.05 m x 0.05 m x 0.5 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, correspondientes al plano leñoso.

La madera se acondicionó en una cámara cerrada con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y con una humedad relativa del aire de 65 % (± 3 %) durante 48 meses, hasta que el peso de la madera fue constante. Posteriormente, para cada especie, se recortaron 17 probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m x 0.50 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Para el caso de la madera de *S. humilis*, la longitud de las probetas fue de 0.32 m.

Pruebas de ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido (us) consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa a lo largo de la probeta (Dirección longitudinal) con el aparato *Sylvatest*[®] (Figura 1) posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas desarrollado por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2011). De esta forma, se midió el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal. Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión del ultrasonido, se calculó la velocidad de transmisión del ultrasonido.

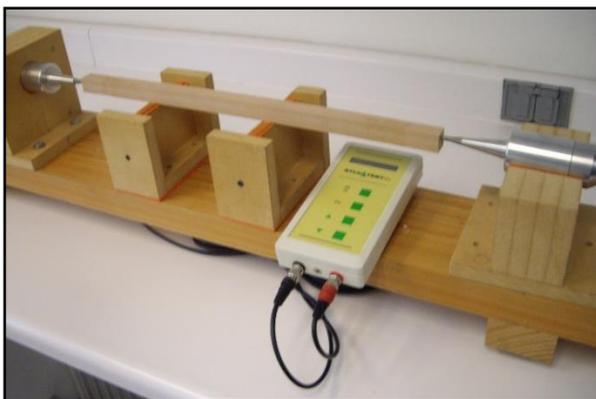


Figura 1 Dispositivo para pruebas de ultrasonido y aparato *Sylvatest*[®]. (Sotomayor-Castellanos *et al.*, 2011).

A partir de la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

Dónde:

u = Vector desplazamiento.

x = Coordenada espacial.

t = Coordenada temporal.

v = Velocidad de onda

Se calculó el módulo de elasticidad con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

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

Dónde:

E_{us} = Módulo de elasticidad por ultrasonido (Pa)

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

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

La impedancia acústica en ultrasonido se calculó con la fórmula (Wegst, 2008):

$$z_{us} = V_{us} \rho_{CH} \quad (3)$$

Dónde:

z_{us} = Impedancia acústica ($\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$)

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

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

El coeficiente de radiación acústica se calculó con la fórmula (Wegst, 2008):

$$R_{us} = \sqrt{\frac{E_{us}}{\rho_{CH}^3}} \quad (4)$$

Dónde:

R_{us} = Coeficiente de radiación acústica de la madera por ultrasonido ($\text{m}^4/\text{s} \cdot \text{kg}$)

E_{us} = Módulo de elasticidad de la madera (Pa)

ρ_{CH} = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH (kg/m^3).

El contenido de humedad (CH) de la madera se determinó por el método de diferencia de pesos, con un grupo complementario de probetas. El contenido de humedad promedio fue de 10.65%. En cada prueba de ultrasonido se midieron las dimensiones radial, tangencial y longitudinal y el peso de cada probeta. De esta forma se calculó el volumen de la probeta y la densidad de la madera correspondiente al momento del ensayo (ρ_{CH}).

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, velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, coeficiente de radiación acústica y la impedancia acústica, como las variables de respuesta evaluadas para cada una de las dos especies de madera. La especie de madera fue considerada el factor de variación. El contenido de humedad de la madera se considera una variable fija. Se efectuaron 3 pruebas con 17 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 (σ^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 de *Fisher* con una diferencia mínima significativa de 95%.

Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta la densidad, la velocidad del ultrasonido, el módulo de elasticidad, la impedancia acústica y el coeficiente de radiación de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*.

	ρ_{CH}	V_{us}	E_{us}	z_{us}^*	R_{us}
	kg/m ³	m/s	MPa	kg/s • m ²	m ⁴ /s kg
<i>Swietenia humilis</i>					
\bar{x}	757	4,135	12,998	3,122	5.49
σ	31.3	403	2,347	258	0.68
CV	4.14	9.76	18.06	8.26	12.38
<i>Alnus acuminata</i>					
\bar{x}	567	4,778	12,969	2,705	8.45
σ	22.7	318	1,584	177	0.76
CV	4.00	6.67	12.21	6.53	8.93

ρ_{CH} : Densidad; v_{us} : Velocidad del ultrasonido; E_{us} : Módulo de elasticidad; z_{us} : Impedancia acústica; R_{us} : Coeficiente de radiación; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%); * 10^{-3} .

Tabla 1 Características acústicas.

La densidad de las dos especies es diferente. Su clasificación es media para *S. humilis* y alta para *A. acuminata*, de acuerdo con Sotomayor-Castellanos y Ramírez-Pérez (2013). Respecto a la velocidad del ultrasonido, es menor la de *S. humilis*, comparativamente con la de *A. acuminata*. Los módulos de elasticidad son numéricamente similares. Las velocidades y los módulos correlacionan bien (Figura 2), siendo la velocidad un buen predictor del módulo de elasticidad.

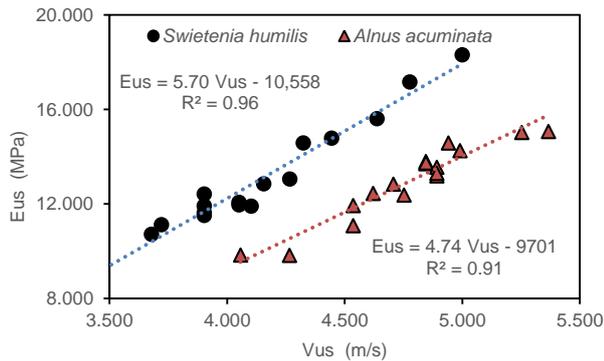


Figura 2 Correlación entre el módulo de elasticidad por ultrasonido (E_{us}) y la velocidad del ultrasonido (V_{us}).

Estos resultados son comparables con los determinados por Sotomayor-Castellanos et al. (2010). Para *S. humilis* con un contenido de humedad de 10.7% y con densidad de 705 kg/m^3 , determinaron una velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal de $4,991 \text{ m/s}$ y un módulo de elasticidad de $15,970 \text{ MPa}$; y para *A. acuminata*, con densidad de 496 kg/m^3 y un contenido de humedad de 10.7%, una velocidad del ultrasonido de $5,234 \text{ m/s}$ y un módulo de elasticidad de $25,319 \text{ MPa}$. La desigualdad entre los valores de Sotomayor-Castellanos et al. (2010) y los de esta investigación, pueden ser explicados entre otros factores por el hecho de que los autores citados examinaron madera de probetas de xiloteca, madera de excelente calidad que se encuentra difícilmente en el mercado. En comparación esta investigación, examinó madera que proviene de una muestra de madera comercial.

Los descriptores impedancia acústica y coeficiente de radiación se distinguen bien entre sí (Figura 3), siendo mayores los de *S. humilis*, de tal forma que se confirma la propuesta de Tamarit-Urias y López-Torres (2007), acerca de que las características mecánicas de la madera son función de su densidad.

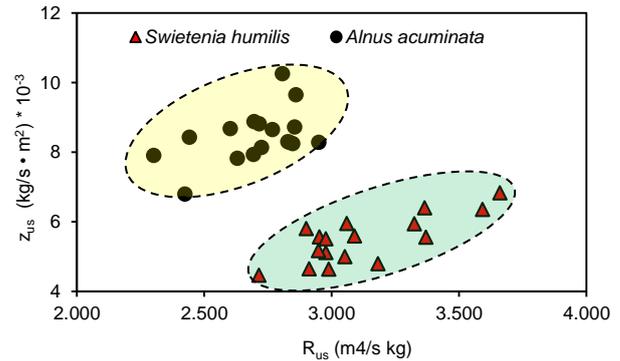


Figura 3 Distribución de la impedancia acústica (Z_{us}) en función del coeficiente de radiación (R_{us}) de la madera, ambos en ultrasonido.

Los resultados de impedancia acústica y coeficiente de radiación son igualmente comparables con los presentados por Spycher et al. (2008) y Sotomayor-Castellanos (2015), quienes encontraron para madera de *Acer pseudoplatanus* (Densidad de 530 a 630 kg/m^3 y $CH = 10.5\%$) un coeficiente de radiación de $6 \text{ m}^4/\text{s kg}$ y para *Picea abies* (Densidad de 360 a 490 kg/m^3 y $CH = 10.5\%$) de $12.3 \text{ m}^4/\text{s kg}$.

Por su parte, Wegst et al. (2008) presentan valores de impedancia acústica similares para maderas de densidades parecidas a las de *S. humilis* y *A. acuminata* aquí estudiadas.

Para el caso de la densidad, la velocidad del ultrasonido, la impedancia acústica y el coeficiente de radiación de la madera de *S. humilis* y *A. acuminata*, la prueba de diferencias de medias entre estas variables de respuesta, indicó que el intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95%, no contiene el valor 0, es decir existe una diferencia significativa entre las medias de las dos muestras, de cada una de estas variables. Asimismo, la prueba de hipótesis mostró que el valor P calculado es menor que 0.05, por consiguiente, se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna.

Conclusiones

La densidad de la madera es diferente para cada especie y permite diferenciarlas para fines de cálculo y diseño de estructuras y productos de madera.

Los módulos de elasticidad de *S. humilis* y *A. acuminata* son estadísticamente similares, pero no lo son sus características acústicas. Para fines de diseño estructural, estas dos maderas pueden ser consideradas mecánicamente equivalentes, pero, para aplicaciones acústicas, son dos especies distintas.

Referencias

Bucur, V. (2006). Second Edition. *Acoustics of Wood*. Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg. 393 p.

Gutiérrez-Carvajal, L., & Dorantes-López, J. (2007). Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz. Comisión Forestal Nacional - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Universidad de Veracruz. México.

Gutiérrez-Pulido, H., & de la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México. McGraw Hill. 564 p.

Pellerin, R.F., & Ross, R.J. Editors. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. USA. 210 p.

Sandoz, J.L., Benoit, Y., & Demay, L. (2000). Wood testing using Acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the WCTE 2000 World Conference on Timber Engineering. Canada. pp:136-142.

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., García-Mariscal, L.J., Hernández-Maldonado, S.A., Moya-Lara, C.E., & Olguín-Cerón, J.B. (2011). Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 7(3), 20-33.

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.

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.

Wegst, U.G.K. (2008). Bamboo and Wood in Musical Instruments. *Annual Review of Materials Research*, 38, 323-349.