



Efecto del tratamiento higro-térmico en las **características** **acústicas de la madera** de *Quercus scytophylla* Liebm.

Effect of hygro-thermal treatment in the acoustic characteristics of the wood
of *Quercus scytophylla* Liebm.

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos¹* Germán Suárez-Béjar¹ y Joel Benancio Olgúin-Cerón¹

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. * Autor de correspondencia. madera999@yahoo.com
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Michoacán, México.

RESUMEN

La madera del género *Quercus* presenta un potencial importante como material para la elaboración de productos de madera con alto valor agregado. Con el objetivo de verificar si un tratamiento higro-térmico aplicado a la madera de *Quercus scytophylla*, modifica de manera significativa su módulo de elasticidad y sus propiedades de amortiguamiento, se estudió el efecto del tratamiento en sus características acústicas. Se ensayaron 30 probetas sin tratamiento y 30 con tratamiento en vibraciones transversales y se calcularon los parámetros densidad, contenido de humedad, frecuencia natural, módulo de elasticidad, módulo específico, decremento logarítmico, coeficiente de amortiguamiento y coeficiente acústico. Análisis estadísticos demostraron que la frecuencia natural es un buen predictor de los módulos de elasticidad y que el tratamiento higro-térmico modificó significativamente la densidad y el decremento logarítmico.

PALABRAS CLAVE: coeficiente acústico, coeficiente de amortiguamiento, decremento logarítmico, frecuencia natural, módulo de elasticidad, vibraciones transversales

ABSTRACT

The influence of hygro-thermal treatment in the acoustic characteristics of *Quercus scytophylla* wood was studied. 30 specimens without treatment and 30 with treatment were tested in bending vibration (free-free supported). Density, moisture content, natural frequency, modulus of elasticity in bending vibration, specific modulus, logarithmic decrement, damping coefficient and acoustic coefficient were computed. Statistical analyses demonstrated that natural frequency is a good predictor of the modulus of elasticity and that hygro-thermal treatment modified significantly the density and logarithmic decrement.

KEY WORDS: acoustic coefficient, damping coefficient, logarithmic decrement, natural frequency, modulus of elasticity, bending vibration.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de vibraciones transversales han confirmado su utilidad para medir la frecuencia natural de una pieza de madera. Ponderando esta propiedad con la densidad y otros parámetros derivados de sus dimensiones, este método no destructivo es empleado para predecir el

módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de amortiguamiento de la madera (Kawamoto y Williams, 2002).

El módulo de elasticidad dinámico de la madera es un indicador de su resistencia a la deformación elástica y es uno de los parámetros de ingeniería más importantes para el diseño de productos y el cálculo de estructuras de

madera. Entre otras aplicaciones, este módulo se emplea para dimensionar elementos estructurales que satisfagan requisitos de calidad y de seguridad estructural. El coeficiente de amortiguamiento de la madera es un índice de su capacidad para disipar energía y es un parámetro importante en el cálculo y diseño de un elemento estructural o de un producto de madera que están sometidos a vibraciones (Tamarit y López, 2007).

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 módulo elástico específico y el coeficiente acústico, son indicadores de la calidad de la madera para usos específicos donde se recomienda una alta resistencia en relación con su densidad. Además, son también indicadores para su empleo en productos o en aplicaciones donde el comportamiento acústico es relevante (Ashby, 2010). Las propiedades de la madera relacionadas con su caracterización acústica son importantes también para su valoración como materia prima para la elaboración de muebles usados como amplificadores de sonido y cajas de resonancia musicales (Bucur, 2006).

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. Particularmente, las técnicas que utilizan ondas y vibraciones mecánicas para estimar su módulo de elasticidad, están documentadas recientemente, entre otros, por Sandoz *et al.* (2000), Pellegrin y Ross (2002), Bucur (2006) y Ortiz *et al.* (2009).

Respecto a las características módulo de elasticidad dinámico y coeficiente de amortiguamiento de la madera, está documentado que estas varían de acuerdo con la composición química de la especie (Minato *et al.*, 2010), según el tratamiento químico a que sea sometida la madera (Brémaud *et al.*, 2010) y dependen también de las características anatómicas de cada especie (Brancheriau *et al.*, 2006a y 2006b; Brémaud *et al.*, 2011; Roohnia *et al.*, 2011a).

En la bibliografía especializada del país, se encuentran datos de características elásticas de maderas mexica-

nas determinadas en condiciones de carga estáticas (Tamarit y López, 2007; Silva-Guzmán *et al.*, 2010). Con todo, es notoria la escasez de datos derivados de pruebas mecánicas que puedan aplicarse en el estudio del comportamiento de productos funcionando en condiciones dinámicas, o para fines de diseño sísmico de estructuras.

En México existen publicaciones que proponen maderas mexicanas para su estudio y promoción en aplicaciones acústicas. Entre otros autores se pueden citar: Guridi y García (1997); Barajas y León (1984); Orduña y Quintanar (1992); Quintanar *et al.* (1998); Gutiérrez y Dorantes (2007); De la Paz *et al.* (2002); Tamarit y López (2007). Estos trabajos se orientan principalmente a la caracterización de la estructura anatómica y de los posibles usos de la madera en instrumentos musicales. Con excepción de Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010 y 2013), Sotomayor-Castellanos y Suárez-Béjar (2013) y Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2014), no se encontró información acerca de características acústicas y/o índices de calidad de especies la madera del género *Quercus* que habitan en el País.

La madera del género *Quercus*, es endémica del Estado de Michoacán y presenta un potencial importante como material para la elaboración de productos de madera (Bello y Labat, 1987). De acuerdo con sus características anatómicas, De la Paz Pérez *et al.* (2006) recomiendan la madera de *Q. scytophylla* para la elaboración de productos de alta calidad que pongan de manifiesto sus características estéticas, entre otros: ebanistería, chapa, pisos, juguetes, muebles y partes de instrumentos musicales. Estos autores indican esta madera tiene menos problemas para el aserrío y el secado, comparativamente con otras especies de *Quercus*.

Comportamiento higro-térmico

La resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si esta es expuesta por períodos cortos a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo la resistencia puede disminuir de manera permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante períodos de tiempo prolongado. Los factores principales en la modificación de la resistencia de la madera son la tempera-



tura del tratamiento, el medio de transferencia de calor, el contenido de humedad de la madera, la especie y el volumen de la madera a tratar (Oltean *et al.*, 2007). Este fenómeno se observa para temperaturas superiores a 100 °C. En tratamientos térmicos comprendidos en el intervalo que va de 0 °C a 100 °C, la madera sólida no presenta una influencia permanente en lo que respecta a sus propiedades mecánicas (Estevez y Pereira, 2009).

Brémaud *et al.* (2011) compilaron datos bibliográficos del módulo de elasticidad en vibraciones transversales y del coeficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$) en pruebas con condiciones de 20 °C a 25 °C y 55% a 65% de humedad relativa, en un intervalo de frecuencias de 50 Hz a 2000 Hz, para maderas de especies angiospermas con densidad (ρ) de 660 kg/m³, módulo de elasticidad (E_{vt}) de 13 500 MPa y coeficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$) de $8,1 \times 10^{-3}$ y para maderas gimnospermas con densidad de 440 kg/m³, $E_{vt} = 11\,040$ MPa y $\tan \delta = 7,1 \times 10^{-3}$. Obataya *et al.* (1998) determinaron en vibraciones transversales, para madera de *Picea sitchensis* ($\rho = 448$ kg/m³ y $CH = 12,7\%$), módulos de elasticidad en promedio de 12 950 MPa y valores promedio de $\tan \delta$ de $7,1 \times 10^{-3}$.

Brancheriau *et al.* (2010) determinaron para madera de *Dalbergia* sp., ($\rho = 960$ kg/m³ y $CH =$ promedio de 15%, valores promedio de $\tan \delta$ de $3,8 \times 10^{-3}$ en ensayos de vibraciones transversales con frecuencias de entre 400 Hz y 1000 Hz. Sedik *et al.* (2010) determinaron para seis especies angiospermas: *Endospermum diadenum* ($\rho = 350$ kg/m³), *Cratoxylum arborecens* ($\rho = 410$ kg/m³), *Dyera polyphylla* ($\rho = 440$ kg/m³), *Macaranga gigantea* ($\rho = 240$ kg/m³), *Commersonia bartramia* ($\rho = 320$ kg/m³) y *Alstonia pneumatophora* ($\rho = 370$ kg/m³) un módulo en vibraciones transversales libre-libre promedio de 22 270 MPa, todas las maderas con CH promedio de 12%. Zhang *et al.* (2011) calcularon para tres especies angiospermas: *Simarouba amara* ($\rho = 391$ kg/m³), *Carapa procera* ($\rho = 655$ kg/m³) y *Symphonia globulifera* ($\rho = 709$ kg/m³), con CH promedio de 10,7%, el módulo específico en vibraciones transversales E_{pb} en un intervalo de 16 000 MPa a 35 000 MPa y un coeficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$) en un intervalo de 5×10^{-3} a $9,5 \times 10^{-3}$.

Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010) calcularon para madera de *Q. scytophylla*, ($\rho = 813$ kg/m³ y $CH = 10,7\%$) los módulos de elasticidad por ultrasonido, el índice material y el factor de calidad, para las direcciones radial y tangencial y longitudinal. Sotomayor-Castellanos *et al.* (2013) determinaron para maderas de *Quercus* spp. ($\rho = 898$ kg/m³ y $CH = 10\%$, los módulos de elasticidad en la dirección longitudinal por ultrasonido, ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad en vibraciones transversales ($E_{vt} = 17\,600$ MPa). Además, calcularon los índices de calidad correspondientes a estos tipos de sollicitación. Sotomayor-Castellanos y Suárez-Béjar (2013) establecieron para madera del género *Quercus*, ($\rho = 734$ kg/m³ y $CH = 13,17\%$, la frecuencia natural (901 Hz), el módulo de elasticidad (11 805), el módulo específico (22,26) y el coeficiente de amortiguamiento ($5,45 \times 10^{-3}$) y el coeficiente acústico (7,67), determinados en pruebas de vibraciones transversales. Sotomayor-Castellanos y Olguín-Cerón (2014) realizaron pruebas de ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal en probetas de madera de *Q. scytophylla*, con y sin tratamiento de plastificado, y determinaron módulos de elasticidad de 11 515 MPa y 11 385 MPa, respectivamente ($\rho = 744$ kg/m³ y 788 kg/m³ y CH promedio = 11,96%).

La frecuencia natural, la densidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de amortiguamiento de la madera, son buenos descriptores de sus características acústicas (Aramaki, 2007). Por ejemplo, una madera con un módulo de elasticidad específico y un coeficiente acústico altos, combinados con propiedades de amortiguamiento bajas, se puede valorar como una especie con buenas características acústicas y con vacación para su empleo en la fabricación de componentes de aparatos e instrumentos musicales (Shen, 2006). En cambio, una madera con bajo coeficiente de amortiguamiento denota una vocación en productos de madera que requieren de disipación de energía, por ejemplo en herramientas de trabajo y en artículos deportivos y en elementos constructivos donde son importantes las propiedades de aislamiento de vibraciones, por ejemplo muros, pisos y componentes estructurales para diseño sísmico de edificaciones con madera (Meyers, 1994).

En México existe una gran biodiversidad de especies forestales, de tal forma, que la caracterización mecánica de la madera es necesaria caso por caso de cada especie. La madera de *Q. scytophylla* tiene un gran potencial para fabricar productos de alto valor agregado. En el mismo contexto, aún no se han desarrollado procedimientos normalizados para pruebas dinámicas empleando métodos de evaluación no destructivos.

OBJETIVO

El objetivo de la investigación es verificar experimentalmente si un tratamiento higro-térmico aplicado a la madera de *Q. scytophylla*, modifica de manera significativa su módulo de elasticidad y sus propiedades de amortiguamiento determinados en vibraciones transversales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material experimental consistió en madera de la especie *Quercus scytophylla* Liebm., proveniente de un árbol colectado en el municipio de Morelia, Michoacán. La especie fue identificada por personal de la empresa concesionada para cosechar arbolado en esta región, de acuerdo con la ficha técnica de *Quercus scytophylla* Liebm., del Manual de la Biodiversidad de encinos michoacanos (Arizaga *et al.*, 2009). Se recortaron 2 trozas de 1,1 m de largo y de 45 cm de diámetro, de las cuales se aserraron tabloncillos de corte radial, de 5 cm por 12,5 cm de sección transversal. De los tabloncillos, se preparó un primer grupo de 30 probetas, identificado como probetas sin tratamiento (PST). Además, se elaboró un segundo grupo de 30 probetas, identificadas como probetas con tratamiento (PCT). Este material pertenece al lote de madera investigado por Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013). Las dimensiones de las probetas fueron 32 cm en la dirección longitudinal, 1,9 cm en la dirección radial y 1,9 cm en la dirección tangencial de la madera, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 3129:2012 (International Organization for Standardization, 2012).

Tratamiento higro-térmico

El tratamiento higro-térmico de los listones destinados para las probetas con tratamiento, consistió primeramente en el hidratado de la madera. Los listones se mantuvieron inmersos en agua, es decir, en estado húmedo y saturado durante 30 días, con el objeto de uniformizar el contenido de humedad de la madera. Posteriormente, los listones se trataron en el dispositivo de suavizado con una secuencia de temperatura y contenido de humedad de la madera usando tres períodos de temperatura: el primero de 15 minutos, necesario para generar vapor al calentar 5 litros de agua en el generador de vapor. El segundo período de 30 minutos permite elevar la temperatura ambiente al interior de la cámara desde 23 °C, hasta la temperatura de suavizado de 98 °C. Al mismo tiempo, la temperatura interna de la madera alcanza 92 °C. El tercer período de 50 minutos de duración mantiene estables las temperaturas al interior de la cámara de suavizado y al interior de la madera. Los detalles del proceso pueden ser consultados en Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013).

Una vez terminado el tratamiento de los listones para el grupo de probetas con tratamiento, el contenido de humedad de los dos grupos de listones se uniformizó durante 36 horas en condiciones de laboratorio con temperatura igual a 23 °C y humedad relativa de 36%, siguiendo los criterios de Olguín-Cerón y Sotomayor-Castellanos (2013). Posteriormente, todos los listones se colocaron durante 130 horas en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C y una humedad relativa de 65%, hasta alcanzar un peso constante y contenido de humedad promedio de 11,8%. Finalmente, se recortaron las probetas.

Densidad y contenido de humedad

La densidad de la madera (ρ_b) se calculó con la relación peso/volumen al momento del ensayo de cada probeta con la fórmula (Bodig y Jayne, 1982):

$$\rho_b = \frac{\rho_b}{V_b} \quad (1)$$



Donde:

- ρ_b = densidad de la madera al momento del ensayo (kg/m³)
- p_b = peso de la probeta al momento del ensayo (kg)
- V_b = volumen de la probeta al momento del ensayo (m³).

El contenido de humedad (CH) de la madera se calculó como la proporción del peso del agua contenida por la probeta al momento del ensayo y el peso de la probeta en su estado seco, con la fórmula (Bodig y Jayne, 1982):

$$CH = \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_s} (100) \quad (2)$$

Donde:

- CH = contenido de humedad de la madera (%)
- p_b = peso de la probeta al momento del ensayo (kg)
- p_s = peso de la probeta en estado seco (kg).

Pruebas de vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones consistieron en poner en movimiento a la probeta en condición de apoyo libre-

libre y medir la frecuencia natural y el decremento logarítmico de las vibraciones. La condición libre-libre se logró sujetando la probeta a dos apoyos elásticos considerados con rigidez insignificante y ambos colocados en los nodos del primer modo de vibración de la probeta. La configuración de las pruebas se presenta en la figura 1. Las vibraciones se lograron por medio de un impacto elástico (P) en dirección transversal a la dirección longitudinal (L) de la probeta empleando un martillo PCB Piezotronics®, modelo 086B05 SN 4160. Para medir el desplazamiento de la probeta en la dirección transversal, se colocó un acelerómetro marca PCB Piezotronics®, modelo 353B04 (Peso = 10,5 g) en un extremo de cada pieza de madera, adherido con una cera adhesiva (Petro Wax 080A109, PCB Piezotronics®).

Una vez puesta la probeta en vibración, se midió la frecuencia natural a partir del diagrama del dominio de frecuencias obtenido con un algoritmo de la transformada rápida de Fourier. Al mismo tiempo, se calculó el decremento logarítmico a partir de la señal del amortiguamiento de las vibraciones. Siguiendo el protocolo

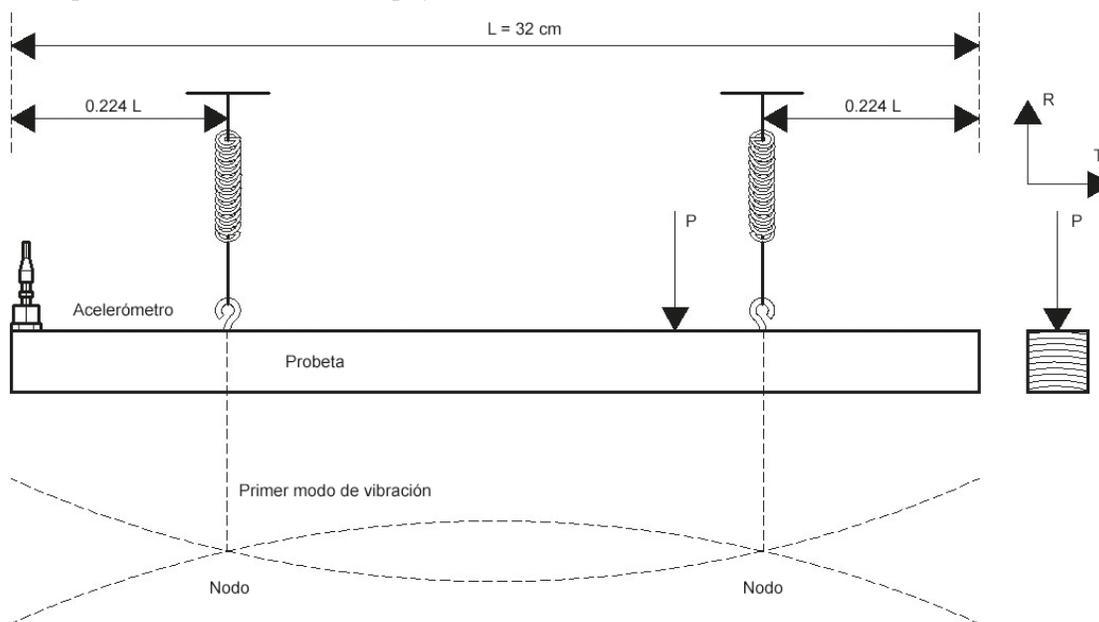


FIGURA 1. Configuración de las pruebas de vibraciones libre-libre.

P = Impacto; L = Dirección longitudinal y/o Largo de la probeta; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

propuesto por Sotomayor-Castellanos y Suárez-Béjar (2013), la frecuencia natural y el decremento logarítmico fueron calculados por un analizador de señales dinámicas marca Brüel and Kjær®, modelo 986A0186, provisto con un programa de adquisición y tratamiento de datos marca Brüel and Kjær®, modelo DSA-104. La intensidad del impacto y la amplitud de las vibraciones fueron reguladas con ayuda del sistema de adquisición y tratamiento de datos. Un diagrama de la señal del amortiguamiento de las vibraciones es presentado en la figura 2 y un diagrama de una frecuencia en el dominio de frecuencias es presentado en la figura 3.

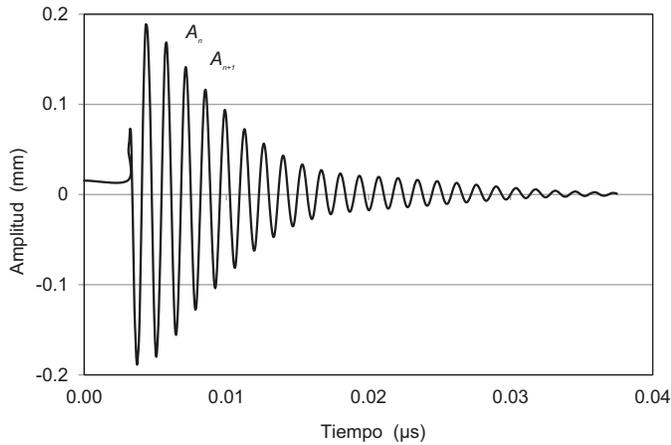


FIGURA 2. Señal del amortiguamiento de las vibraciones.

A_n = Amplitud de la vibración en el ciclo n ; A_{n+1} = Amplitud de la vibración en el ciclo $n+1$.

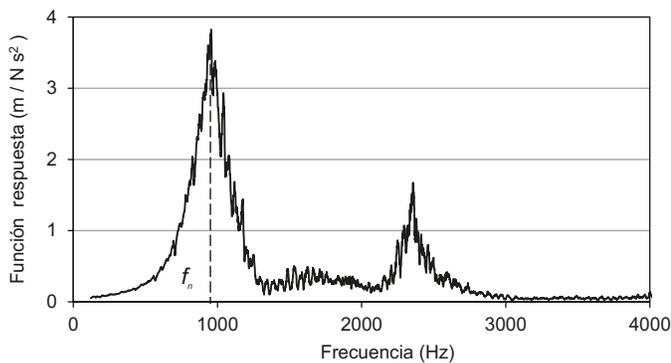


FIGURA 3. Diagrama del dominio de frecuencias.

f_n = Frecuencia natural.

El módulo de elasticidad en vibraciones se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{vt} = \frac{f_n^2 m L^3}{12,65 I} \quad (3)$$

Donde:

- E_{vt} = módulo de elasticidad de la madera (Pa)
- f_n = frecuencia natural de la probeta (Hz)
- m = masa de la probeta al momento del ensayo (kg)
- L = longitud de la probeta (m)
- I = momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4).

El módulo específico se calculó con la fórmula (Roohnia *et al.* 2011a):

$$E_{\rho b} = \frac{E_{vt}}{\rho_b} \quad (4)$$

Donde:

- $E_{\rho b}$ = módulo específico (m^2/s^2)
- E_{vt} = módulo de elasticidad (Pa)
- ρ_b = densidad de la madera al momento del ensayo (kg/m^3).

El coeficiente acústico se calculó con la fórmula (Wegst, 2006):

$$K = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_b^3}} \quad (5)$$

Donde:

- K = coeficiente acústico ($m^4/s \text{ kg}$)
- E_{vt} = módulo de elasticidad (Pa)
- ρ_b = densidad de la madera al momento del ensayo (kg/m^3).

El decremento logarítmico se calculó con la fórmula (Raichel, 2006):

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (6)$$



Donde:

- δ = decremento logarítmico
 A_n = amplitud de la vibración en el ciclo n (m)
 A_{n+1} = amplitud de la vibración en el ciclo n+1 (m).

El coeficiente de amortiguamiento se calculó con la fórmula (Brémaud *et al.*, 2010):

$$\tan \delta = \tan (\delta) \quad (7)$$

Donde:

- δ = decremento logarítmico
 $\tan (\delta)$ = coeficiente de amortiguamiento.

Análisis estadístico

Se diseñaron tres análisis siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y de la Vara (2012). Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*®. El primer análisis consistió en calcular los coeficientes de determinación (R^2) para cada par de las cinco variables: densidad (ρ_b), frecuencia natural (f_n), módulo de elasticidad en vibraciones transversales (E_{vt}), módulo específico (E_{pb}) y decremento logarítmico (δ), correspondientes a cada uno de los dos grupos de probetas: probetas sin tratamiento (PST) y probetas con tratamiento (PCT). Para las probetas sin tratamiento y con tratamiento, se efectuaron pruebas con 30 réplicas en los dos casos.

El segundo análisis comparó las medias de los cinco parámetros: ρ_b , f_n , E_{vt} , E_{pb} y δ , como las variables de respuesta evaluadas para cada uno de los dos tipos de probetas: PST y PCT. El tercer análisis consistió en estudiar la influencia del peso del acelerómetro colocado en las probetas, sobre la medición de la frecuencia natural del sistema y su efecto en la magnitud del módulo de elasticidad E_{vt} . Para ello, se compararon la media de los valores de los módulos E_{vt} , determinados sin considerar el peso del acelerómetro, *versus* la media de los valores de los módulos E_{vt} , esta vez incorporando el peso de la probeta durante el ensayo.

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, para los dos grupos de probetas PST y PCT, los valores de media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación, para los parámetros densidad, contenido de humedad, frecuencia natural, módulo de elasticidad en vibraciones transversales, módulo específico, decremento logarítmico, coeficiente de amortiguamiento y coeficiente acústico.

Densidad

La densidad de la madera con tratamiento disminuyó en 1,3% con respecto a la madera sin tratamiento. Este fenómeno en la disminución de la densidad de la madera como resultado de un tratamiento de temperatura e hidratado ha sido observado por Korkut *et al.* (2010) para la madera de *Quercus petraea* ($\rho_H = 710 \text{ kg/m}^3$), con una disminución de la densidad de 1%, para un tratamiento con temperatura de 120 °C, aplicada durante 2 horas, condiciones parecidas a las del tratamiento aplicado a la madera de *Q. scytophylla*.

Los valores mínimos y máximos de la densidad ρ_b para las probetas sin tratamiento fueron respectivamente de 819 kg/m^3 y de 880 kg/m^3 . Para las probetas con tratamiento fueron de 707 kg/m^3 y 899 kg/m^3 . De manera comparativa; las magnitudes de la densidad básica (ρ_0) determinadas para el mismo material experimental por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2014) son respectivamente para probetas sin tratamiento (ρ_0 mínima = 676 kg/m^3 ; ρ_0 máxima = 766 kg/m^3) y con tratamiento (ρ_0 mínima = 630 kg/m^3 ; ρ_0 máxima = 786 kg/m^3). La densidad calculada en esta investigación incluye el peso del agua del contenido de humedad de la madera al momento del ensayo. En cambio, la densidad básica está calculada con el peso de la madera en estado anhidro.

TABLA 1. Características acústicas de la madera de *Quercus scytophylla*.

Parámetros (Símbolo)	Unidades	\bar{x}	σ	CV	Parámetros (Símbolo)	Unidades	\bar{x}	σ	CV
Probetas sin Tratamiento (PST)					Probetas con Tratamiento (PCT)				
Densidad (ρ_H)	(kg/m ³)	852	14,93	0,02	Densidad (ρ_H)	(kg/m ³)	840	37,61	0,04
Contenido de humedad (CH)	(%)	11,96	0,35	0,03	Contenido de humedad (CH)	(%)	11,70	0,95	0,08
Frecuencia natural (f_n)	(Hz)	747	41,57	0,06	Frecuencia natural (f_n)	(Hz)	745	50,06	0,07
Módulo de elasticidad (E_{vt})	(MPa)	13 922	1505	0,11	Módulo de elasticidad (E_{vt})	(MPa)	13 751	2146	0,16
Módulo específico ($E_{\rho H}$)	(m ² /s ²)	16,33	1,73	0,11	Módulo específico ($E_{\rho H}$)	(m ² /s ²)	16,34	2,27	0,14
Decremento logarítmico (δ)	-	0,2522	0,111	0,44	Decremento logarítmico (δ)	-	0,3610	0,187	0,52
Coefficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$)	$\times 10^{-3}$	4,40	1,93	0,44	Coefficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$)	$\times 10^{-3}$	6,28	3,21	0,51
Coefficiente acústico (K)	(m ⁴ / s kg)	4,74	0,254	0,05	Coefficiente acústico (K)	(m ⁴ / s kg)	4,80	0,355	0,07

\bar{x} = Media aritmética; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación.

Influencia del acelerómetro en la frecuencia y en el módulo de elasticidad

Durante las pruebas de flexión se posicionó un acelerómetro en uno de los extremos de cada probeta (Fig. 1), de tal forma, que su masa se adiciona a la de la probeta e influye en la medición de la frecuencia natural del sistema en vibración. En consecuencia, la magnitud del módulo de elasticidad calculado con la fórmula 3 es modificada. Si se modela la prueba de flexión transversal como un sistema en vibración con un grado de libertad, su frecuencia se define como (Meyers, 1994):

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

Donde:

- f = frecuencia (Hz)
- k = rigidez (N/m)
- m = masa (kg).

En el caso del sistema en estudio, la rigidez (k) está representada por la rigidez de la probeta (EI) y la masa (m) corresponde a la propia de la probeta, más la del acelerómetro. De acuerdo con la fórmula 8, si la masa aumenta, la

frecuencia disminuye, como es el caso del sistema formado por la probeta y el acelerómetro. De tal forma, que la masa del acelerómetro altera la frecuencia medida y en consecuencia el cálculo del módulo de elasticidad.

Transformando la fórmula 3 se obtiene la fórmula 3a:

$$f_n = \sqrt{\frac{12,65 E_{vt} I}{m L^3}} \quad (3a)$$

Donde:

- E_{vt} = módulo de elasticidad de la madera (Pa)
- f_n = frecuencia natural de la probeta (Hz)
- m = masa de la probeta al momento del ensayo (kg)
- L = longitud de la probeta (m)
- I = momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴).

Si en la ecuación 3a se mantienen constantes el módulo de elasticidad E_{vt} y las dimensiones de las probetas y en consecuencia el momento de inercia (I), la evolución de la frecuencia natural se puede modelar en función de la variación de la masa (m) de la probeta. Introduciendo en la ecuación 3a los valores promedio a la sección trans-



versal de las probetas y los valores de la tabla 1 correspondientes de E_{vt} y L para las probetas sin tratamiento, la figura 4 presenta la variación de la frecuencia natural de la probeta (f_n) en función de su masa (m). Esta tendencia está representada por la línea “Fórmula (3)”. En la misma figura se muestra el valor de la frecuencia correspondiente a la masa promedio de las 30 probetas sin tratamiento (Promedio 30 probetas *Q. scytophylla*) y la frecuencia para una probeta con la masa del acelerómetro incorporada (Probeta con acelerómetro).

De la expresión para $f_n = f(m)$, presentada en la figura 4, se deriva la ecuación 9, con la cual se puede estimar la frecuencia del sistema en función de su masa:

$$f_n = 224,47 m^{-0,5} \quad (9)$$

Donde:

- f_n = frecuencia (Hz)
- m = masa (kg)

Igualmente, se puede emplear la fórmula 3 para graficar el módulo de elasticidad en función de la frecuencia, manteniendo constantes, esta vez, la masa y las dimensiones del sistema. La figura 5 presenta la variación del módulo de elasticidad en función de la frecuencia natural de las probetas. Esta tendencia está representada por la

línea “Fórmula (3)”. En la misma figura se muestra el módulo de elasticidad E_{vt} en función del promedio de la masa de las 30 probetas sin tratamiento (Promedio 30 probetas *Q. scytophylla*) y el módulo de elasticidad E_{vt} para una probeta con la masa del acelerómetro incorporada (Probeta con acelerómetro).

De la expresión para $E_{vt} = f(f_n)$, presentada en la figura 5, se deriva la ecuación 10, con la cual se puede estimar el módulo de elasticidad de una probeta en función de su frecuencia natural:

$$E_{vt} = 0,024 f_n^2 \quad (10)$$

Donde:

- E_{vt} = módulo de elasticidad (MPa)
- f_n = frecuencia natural (Hz)

La tabla 2 presenta, para las probetas sin y con el acelerómetro incorporado, la masa, la frecuencia natural y los módulos de elasticidad determinados de forma experimental. Además, se presentan las frecuencias y los módulos estimados con las fórmulas 9 y 10, así como las diferencias entre los valores experimentales y estimados. Estos valores conformaron las figuras 4 y 5.

En la figura 4 se observa que la masa del sistema probeta-acelerómetro aumenta y la frecuencia disminuye. En

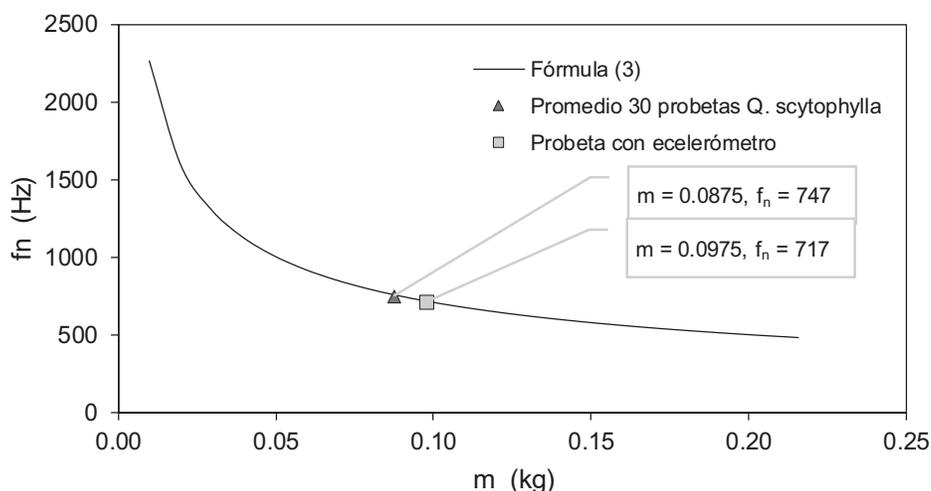


FIGURA 4. Variación de la frecuencia natural (f_n) en función de la masa (m) de la probeta sin y con acelerómetro.

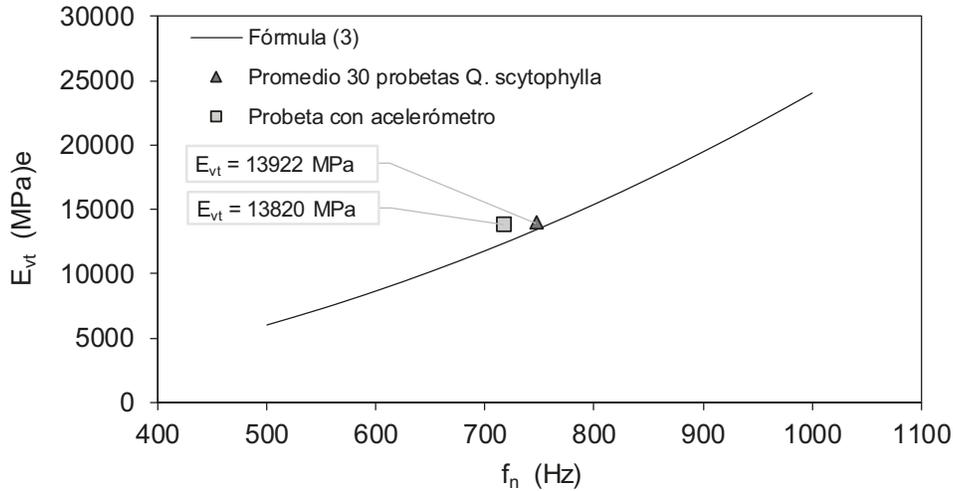


FIGURA 5. Variación del módulo de elasticidad (E_{vt}) en función de la frecuencia natural (f_n) de las probetas.

la figura 5 se observa que la frecuencia del sistema probeta-acelerómetro disminuye, pero el módulo de elasticidad es casi igual. La presencia del acelerómetro disminuyó la frecuencia f_n en 4,01% respecto a la frecuencia del sistema sin considerar la masa del acelerómetro. Como consecuencia, el módulo de elasticidad también se vio afectado con una reducción de 0,73%. Es decir, el valor promedio del módulo de elasticidad determinado en esta investigación está subvaluado.

Para verificar si la masa del acelerómetro influye estadísticamente en el valor promedio del módulo de elasticidad, la prueba de diferencia de medias entre los E_{vt} calculados con la fórmula 3, sin y con la masa del acelerómetro, demostró que no hay diferencia significativa entre

las medias de las dos muestras con un nivel de confianza de 95%. En efecto, de acuerdo con los resultados de ANOVA presentados en la tabla 3, y dado que el valor- P calculado no es menor que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables. De aquí sigue que, si bien la masa del acelerómetro influye en la medición de la frecuencia y modifica el cálculo del módulo de elasticidad, estadísticamente los resultados no son diferentes, argumento que permite validar la configuración de las pruebas de vibraciones.

Características acústicas

Los valores promedio y los intervalos de dispersión de los módulos de elasticidad, módulos específicos y coefi-

TABLA 2. Valores experimentales y estimados con las fórmulas 9 y 10.

Probeta	m (kg)	f_n (Hz)	E_{vt} (MPa)	Fórmula		Δf_n (%)	ΔE_{vt} (%)
				9	10		
Sin acelerómetro	0,0875	747	13 922		13 820		-0,73
Con acelerómetro	0,0980			717		-4,01	

m = masa; f_n = Frecuencia natural; E_{vt} = Módulo de elasticidad; Δf_n = Variación en la frecuencia natural; ΔE_{vt} = Variación en el módulo de elasticidad.



TABLA 3. Resultados de ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Valor-P
Entre grupos	4,18294 x 10 ¹⁷	1	4,18294 x 10 ¹⁷	0,6708
Intra grupos	1,32908 x 10 ²⁰	58	2,29151 x 10 ¹⁸	
Total	1,33326 x 10 ²⁰	59		

GL = Grados de libertad; P = Valor P para un nivel de confianza de 95%.

cientes de amortiguamiento presentados en la tabla 1, son similares a los exhibidos por Brémaud *et al.* (2011) para maderas con densidades ρ que varían entre 800 kg/m³ y 1280 kg/m³, con contenidos de humedad CH en promedio de 12%: módulos de elasticidad E_{vt} entre 7200 MPa y 40 960 MPa, módulos específicos $E_{\rho b}$ entre 9 m²/s² y 32 m²/s² y coeficientes de amortiguamiento $\tan \delta$ entre 4,1 x 10⁻³ y 15,2 x 10⁻³.

Igualmente, Spycher *et al.* 2008 determinaron para madera de *Picea abies* con CH = 10,5%; $\rho = 360$ kg/m³ a 495 kg/m³; E_{vt} 9979 MPa a 14 784 MPa; $K = 1,7$ m⁴/s kg a 3,6 m⁴/s kg y *Acer pseudoplatanus* con CH = 10,5%, $\rho = 569$ kg/m³ y 625 kg/m³; $E_{vt} = 7315$ MPa y 10 050 MPa; y K de 2,3 m⁴/s kg a 3 m⁴/s kg, resultados que son comparables a los obtenidos en esta investigación. En el mismo contexto, Roohnia *et al.* (2011a y 2011b) quienes puntualizaron para madera de *Cupressus arizonica*, con un contenido de humedad CH = 10% y densidad promedio ρ de 450 kg/m³, el módulo de elasticidad E_{vt} entre 3 000 MPa y 10 000 MPa; el coeficiente de amortiguamiento $\tan \delta$ de 7 x 10⁻³ a 16 x 10⁻³; y el coeficiente acústico K de 6,5 m⁴/s kg a 8,5 m⁴/s kg.

Igualmente, para maderas angiospermas con densidad similar a la de *Q. scytophylla* los resultados son del mismo orden que los de Traoré *et al.* (2010): ρ_b entre 750 kg/m³ y 800 kg/m³; E_{vt} entre 13 300 y 15 200; $E_{\rho b}$ entre 15,2 m²/s² y 17 m²/s²; $\tan \delta$ entre 7,5 x 10⁻³ y 9,5 x 10⁻³; y K entre 4,6 m⁴/s kg y 6 m⁴/s kg, quienes utilizaron madera con un contenido de humedad de 12% y una configuración de los ensayos similar al de esta investigación.

Los resultados de la tabla 1 son comparables con los de maderas mexicanas del género *Quercus* estudiadas por Sotomayor-Castellanos y Suarez-Béjar (2013). Los autores determinaron, para probetas con dimensiones similares a las de esta investigación, sin y con tratamiento de higro-termo fatiga, con contenidos de humedad promedio de 12,6% y 13,2% y densidades promedio de 734 kg/m³ y 537 kg/m³ respectivamente, frecuencias naturales en vibraciones transversales de 931 Hz y 903 Hz, módulos de elasticidad entre 11 805 y 11 200, módulos específicos entre 20,26 m²/s² y 20,87 m²/s², coeficientes de amortiguamiento de 7,67 y 7,65, y coeficientes acústicos de 6,06 (m⁴/s kg) y 8,57 (m⁴/s kg).

De la misma manera, los resultados del E_{vt} para *Q. scytophylla*, determinados en esta investigación, son comparables al módulo de elasticidad en vibraciones transversales en apoyos simple-simple determinado por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2013) para madera de *Quercus* spp.

Correlaciones

Los valores promedio de densidades, frecuencias, módulos de elasticidad, módulos específicos y decrementos logarítmicos fueron parámetros determinados a partir de mediciones directas en laboratorio, es decir, son consideradas como variables de primer nivel. En contraste, los parámetros coeficiente de amortiguamiento y coeficiente acústico fueron derivados o cálculos de segundo nivel. De aquí, el análisis siguiente de correlaciones y pruebas *t* de Student se circunscriben a las variables de primer nivel. La tabla 4 presenta los coeficientes de determinación (R^2) para cada par de las variables: densidad (ρ), frecuencia natural (f_n), módulo de elasticidad en vibraciones transversales (E_{vt}), módulo específico ($E_{\rho b}$) y decremento logarítmico (δ), para los dos grupos de probetas PST y PCT.

De la observación de la tabla 4, se deduce que las variables: f_n PST y f_n PCT correlacionan bien con E_{vt} y $E_{\rho b}$ para PST y PCT, y que E_{vt} PST y E_{vt} PCT correlacionan bien con $E_{\rho b}$ PST y $E_{\rho b}$ PCT. Estas variables están implícitas en las ecuaciones empleadas para la determinación de los

TABLA 4. Coeficientes de determinación (R^2) entre variables.

	ρ_h PST	f_n PST	f_n PCT	E_{vt} PST	E_{vt} PCT	$E_{\rho h}$ PST	$E_{\rho h}$ PCT	δ PST	δ PCT
ρ_h PST	0,109	0,061	-0,070	0,195	-0,080	0,040	-0,125	-0,058	-0,080
ρ_h PCT		-0,444	0,234	-0,276	0,516	-0,301	0,264	-0,235	-0,226
f_n PST			-0,257	0,946*	-0,332	0,954*	-0,231	0,392	0,652
f_n PCT				-0,266	0,912*	-0,262	0,955*	-0,221	-0,160
E_{vt} PST					-0,295	0,988*	-0,244	0,375	0,623
E_{vt} PCT						-0,290	0,962*	-0,272	-0,055
$E_{\rho h}$ PST							-0,230	0,394	0,646
$E_{\rho h}$ PCT								-0,230	0,007
δ PST									0,176

ρ_h = Densidad; f_n = Frecuencia natural; E_{vt} = Módulo de elasticidad; $E_{\rho h}$ = Módulo específico; δ = Decremento logarítmico; PST = Probetas sin tratamiento; PCT = Probetas con tratamiento; * Correlación significativa para un nivel de confianza de 95%.

parámetros de segundo nivel. En el mismo contexto, ninguna de las otras variables correlaciona bien entre ellas.

La tabla 5 presenta los resultados de las pruebas *t* de Student para comparar las medias entre los grupos de probetas sin tratamiento (\bar{x}_s) y con tratamiento (\bar{x}_c) para la densidad (ρ_h), la frecuencia (f_n), el módulo de elasticidad (E_{vt}), el módulo específico ($E_{\rho h}$) y el decremento logarítmico (δ). Las pruebas consistieron en verificar la Hipótesis nula $H_0: \bar{x}_s = \bar{x}_c$ para un nivel de confianza de 95%.

Para las pruebas de ρ_h PST vs, ρ_h PCT y de δ PST vs, δ PCT, el valor *P* calculado es menor que 0,05, en consecuencia, se puede rechazar la hipótesis nula. Además, el intervalo no contiene el valor de 0, es decir, para nivel de confianza de 95%, existe una diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos para la densidad y el decremento logarítmico. Este resultado implica que el tratamiento higro-térmico modificó de manera significativa la densidad y el decremento logarítmico de la madera de *Q. scytophylla*.

En contraste, para las pruebas de f_n PST vs, f_n PCT, E_{vt} PST vs, E_{vt} PCT y de $E_{\rho h}$ PST vs, $E_{\rho h}$ PCT, el valor *P* calculado no es menor que 0,05, en consecuencia, no se puede rechazar la hipótesis nula. Además, el intervalo contiene el valor de 0, es decir, para nivel de confianza de 95%, no hay diferencia significativa entre las medias de las dos

TABLA 5. Valores *P*, intervalos y significancias de las pruebas *t* de Student.

Prueba	<i>P</i>	Intervalo	Significancia
ρ_h PST vs ρ_h PCT	0,0080595	-0,188122, -0,0294311	*
f_n PST vs f_n PCT	0,8911290	-22,1485, 25,4152	**
E_{vt} PST vs E_{vt} PCT	0,7217690	-786,808, 1129,34	**
$E_{\rho h}$ PST vs $E_{\rho h}$ PCT	0,9944050	-1,04587, 1,03854	**
δ PST vs δ PCT	0,0080595	-0,188122, -0,0294311	*

ρ_h = Densidad; f_n = Frecuencia natural; E_{vt} = Módulo de elasticidad; $E_{\rho h}$ = Módulo específico; δ = Decremento logarítmico; PST = Probetas sin tratamiento; PCT = Probetas con tratamiento; *P* = Valor *P* para un nivel de confianza de 95%.

* Si existe diferencia significativa para nivel de confianza de 95% ($P < 0,001$)

** No existe diferencia significativa para nivel de confianza de 95%.

muestras de datos. Este resultado sugiere que el tratamiento higro-térmico no modificó de manera significativa estos parámetros.

La densidad y el coeficiente de amortiguamiento fueron afectados por el tratamiento, resultados que coin-

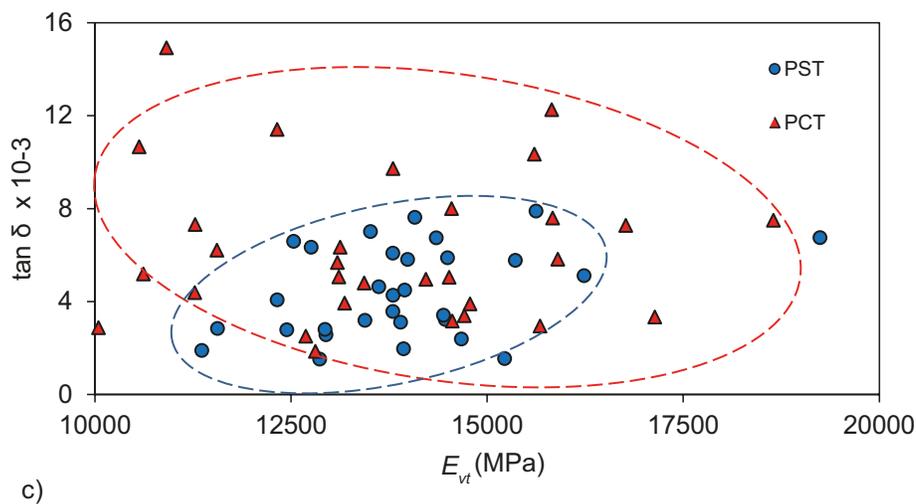
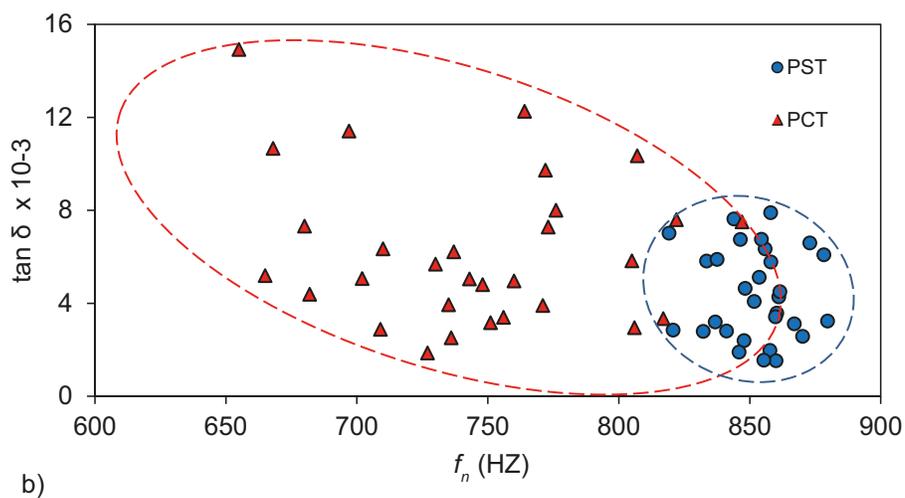
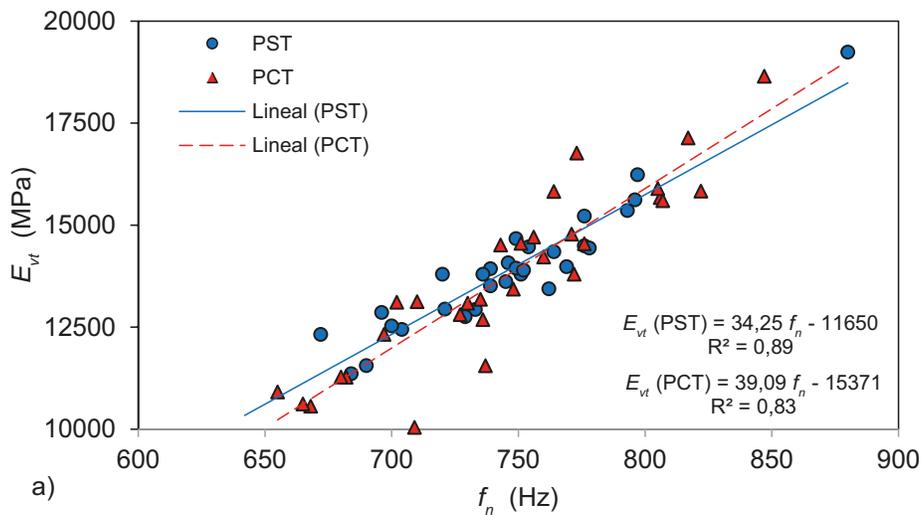


FIGURA 6. Variación de f_n , E_{vt} y $\tan \delta$ al interior de la especie *Q. scytophylla*.

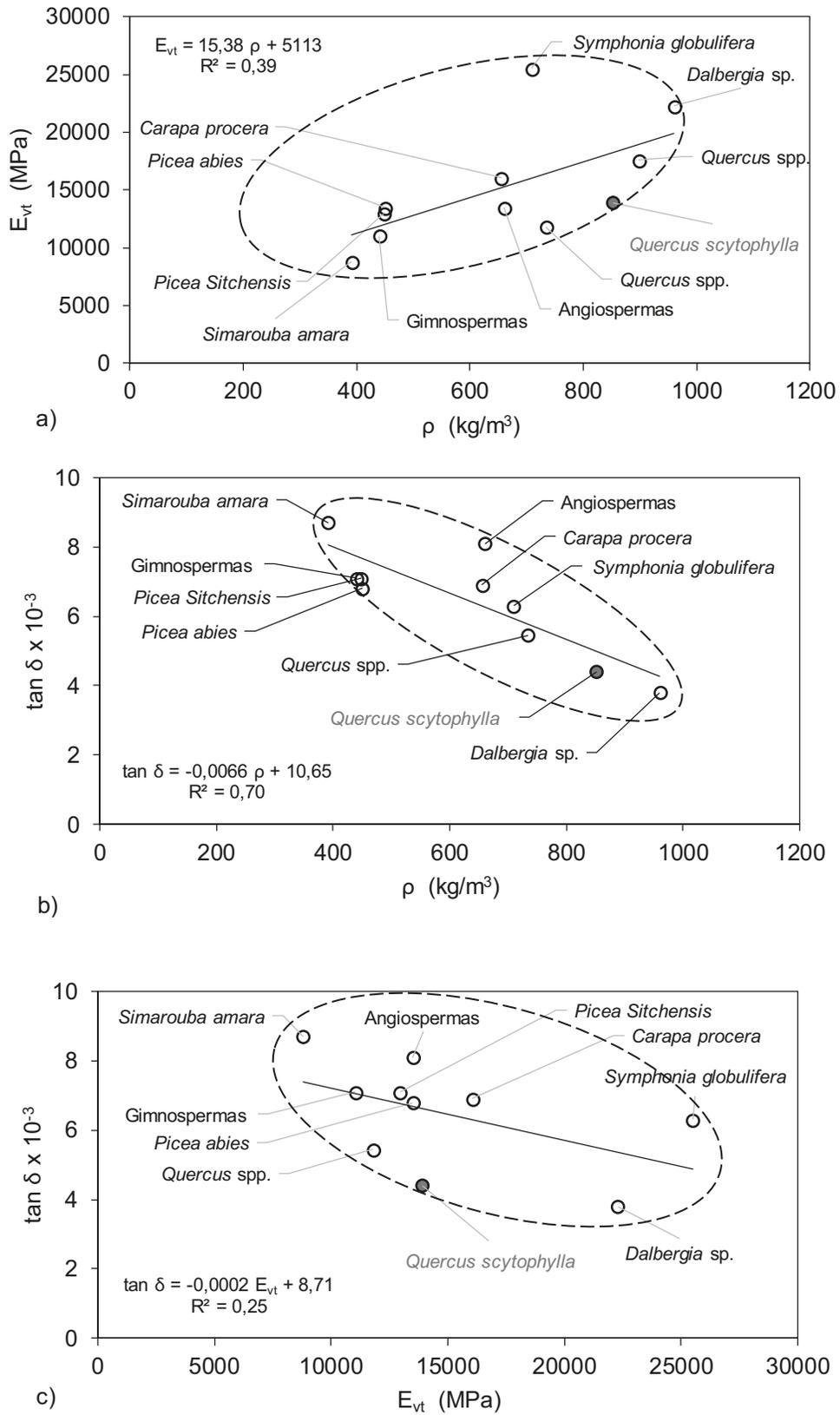


Figura 7. Variación de f_n , E_{vt} y $\tan \delta$ entre especies y *Q. scytophylla*.



ciden con los de Korkut *et al.* (2010), y en cambio, el tratamiento no afectó de manera estadísticamente significativa, la frecuencia y los módulos de elasticidad y específico.

Variación al interior de la especie *Q. scytophylla*

El módulo de elasticidad E_{vt} aumenta proporcionalmente y correlaciona bien con la frecuencia f_n para los dos grupos de madera (Fig. 6a) coincidiendo con los resultados de Obataya *et al.* (1998) y Spycher *et al.* (2008). En contraste, el coeficiente de amortiguamiento $\tan \delta$ es independiente de la frecuencia (Fig. 6b), pero se observa una ligera tendencia para las probetas con tratamiento (PCT) de la disminución del coeficiente $\tan \delta$ cuando la frecuencia decrece, coincidiendo con los resultados de Obataya *et al.* (1998) y Spycher *et al.* (2008). Estos resultados confirman lo propuesto por Ouis (2003) quien opina que las propiedades elásticas y de amortiguamiento de la madera están relacionadas con la frecuencia. Sin embargo, coincidiendo con los resultados de (Roohnia *et al.* 2011a y 2011b), ambas variables son independientes entre sí (Fig. 6c).

Variación entre especies

Comparativamente con los valores del módulo de elasticidad E_{vt} de otras especies, la magnitud del módulo de *Q. scytophylla* es proporcional a su densidad ρ , de manera similar que otras maderas (Fig. 7a). Los datos de las especies presentados en la figura 7 provienen de las referencias citadas en la sección de la introducción. De los resultados anteriores, se deduce que el coeficiente de amortiguamiento $\tan \delta$ disminuye a medida que ρ decrece (Fig. 7b) y disminuye en función de E_{vt} (Fig 7c) coincidiendo con Brémaud *et al.* (2012),

CONCLUSIONES

Se estudió el efecto del tratamiento higro-térmico en las características acústicas de la madera de *Quercus scytophylla*. La investigación demuestra que el tratamiento no modifica el módulo de elasticidad en vibraciones transversales y el módulo específico. Sin embargo, el tratamiento

altera de manera estadísticamente significativa la densidad y el decremento logarítmico de la madera de *Q. scytophylla*. Para la madera sin tratamiento y con tratamiento, la frecuencia natural correlaciona con los módulos de elasticidad y específicos. En contraste, el decremento logarítmico y el coeficiente de amortiguamiento no correlacionan bien entre ellos. La presencia del acelerómetro empleado para medir el movimiento de las probetas, influye en los cálculos, de tal forma que la frecuencia disminuye y en consecuencia el valor del módulo de elasticidad calculado es subestimado. La magnitud de la variación de los resultados entre las probetas ensayadas, es del mismo orden que la propuesta por otros autores para maderas con características tecnológicas similares a la de *Q. Scytophylla*. Igualmente, los resultados para *Q. scytophylla* son similares a las características de otras maderas

AGRADECIMIENTOS

Al Dr, Ying Hei Chui Profesor de la Universidad de New Brunswick de Canadá, por facilitar el equipo para las pruebas de vibraciones. Al M.C. Saúl Antonio Hernández Maldonado estudiante de Doctorado en la Universidad de New Brunswick de Canadá, por la capacitación en el uso del equipo de vibraciones. A la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

REFERENCIAS

- Aramaki, M. 2007. Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *Journal of the Acoustical Society of America* 121(4):2407-2420.
- Arizaga, S., J. Martínez C., M. Salcedo C. y M.A. Bello G. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México. 147 p.
- Ashby, M.F. 2010. Materials selection in mechanical design. 4th edition. Elsevier. USA. 664 p.
- Barajas M., J. y C. León G. 1984. Anatomía de maderas de México: Especies de una selva caducifolia. Instituto de Biología. Publicaciones especiales 1. Universidad Nacional Autónoma de México. 163 p.

- Bello G., M.A. y J.N. Labat. 1987. Los encinos (*Quercus*) del Estado de Michoacán, México. Collection Etudes Mesoaméricaines. Centre d'Etudes Mexicaines et Centraméricaines. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México. 93 p.
- Bodig, J. y B.A. Jayne. 1982. Mechanics of wood composites. Van Nostrand Reinhold Company. EUA. 711 p.
- Brancheriau, L., H. Baillères, P. Détienne, J. Gril y R. Kronland. 2006a. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science* 52:270-273.
- Brancheriau, L., H. Baillères, P. Détienne, R. Kronland y B. Metzger. 2006b. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. *Annales of Forest Sciences* 63:73-81.
- Brancheriau, L., C. Kouchade y I. Brémaud. 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science* 56:371-379.
- Brémaud, I., Y. El Kaïm, D. Guibal, K. Minato, T. Thibaut y J. Gril. 2012. Characterization and categorization of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science* 69:373-386.
- Brémaud, I., J. Gril y B. Thibaut. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology* 45:735-754.
- Brémaud, I., K. Minato, P. Langbour y B. Thibaut. 2010. Physico-chemical indicators of inter-specific variability in vibration damping of wood. *Annals of Forest Sciences* 67(7):707, p:1-8.
- Bucur, V. 2006. Acoustics of wood. 2a ed. Springer series in wood. Springer Berlin Heidelberg. Alemania. 393 p.
- De la Paz Pérez O., C., Vélez J., S. y J. Ceja R. 2006. Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (Fagaceae) de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 12(1):63-94.
- De la Paz Pérez O., C., S. Vélez J., A. Serrano J. y B. Rochin G. 2002. La madera de las guitarras de Paracho, Michoacán. *ContactoS* 44:45-53.
- Estevez, B.M. y H.M. Pereira. 2009. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources* 4(1):370-404.
- Guridi G., L.I. y A. García L. 1997. Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho. Secretaría de Difusión cultural. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 45 p.
- Gutiérrez C., L. y J. Dorantes L. 2007. Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz. Conafor-Conacyt-UV 2003-2004. México. Consultado julio 2014. Disponible en: <http://www.verarboles.com/>.
- Gutiérrez P., H. y R. de la Vara S. 2012. 3a Edición. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. México. 489 p.
- International Organization for Standardization. 2012. ISO 3129:2012 (E). Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization. Brussels.
- Kawamoto, S. y R.S. Williams. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites – A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA. 16 p.
- Korkut, S., S. Karayilmazlar, S. Hiziroglu y T. Sanli. 2010. Some of the properties of heat-treated sessile oak (*Quercus petraea*). *Forest Products Journal* 60(5):473-480.
- Meyers, M.A. 1994. Dynamic behavior of materials. John Wiley & Sons. USA. 668 p.
- Minato, K., Y. Konaka, I. Bremaud, S. Suzuki y E. Obataya. 2010. Extractives of muirapiranga (*Brosimum* sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. *Journal of Wood Science* 56:41-46.
- Obataya, E., M. Norimoto y J. Gril. 1998. The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. *Polymer* 39(14):3059-3064.
- Olguín-Cerón, J.B. y J.R. Sotomayor-Castellanos. 2013. Plástico higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia* 59:25-33.
- Oltean, L., A. Teischinger y C. Hansmann. 2007. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of



- wood during wood drying – A review. *BioResources* 2(4):789-811.
- Orduña B., F. y A. Quintanar I. 1992. Letter to the Editor: A preliminary determination of the mechanical properties of four species of tropical wood from Mexico. *Journal of Sound and Vibration* 154(2):365-368.
- Ortiz M., R., E. Baradit, A. y J. Navarrete A. 2009. Estudio del efecto de la dirección de medición y contenido de humedad en la velocidad de ultrasonido en madera de *Pinus radiata* D. Don a través de análisis de varianza. *Ingeniería e Investigación* 29(3):139-141.
- Ouis, D. 2003. Effect of structural defects on the strength and damping properties of a solid material. *European Journal of Mechanics A/Solids* (22): 47-54.
- Pellerin. R.F. y R.J. Ross. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA. 210 p.
- Quintanar I., A., M. de Icaza H., L. Rivera N. y C. de la Paz Pérez O. 1998. Algunas características anatómicas y acústicas de tres especies de angiospermas de Huayacocotla, Ver. *Madera y Bosques* 4(1):15-25.
- Raichel, D.R. 2006. The science and applications of acoustics. 2a ed. Springer. EUA. 660 p.
- Roohnia, M., M. Hossein, S. Alavi-Tabar, A. Tajdini, A. Jahan-Latibari y N. Manouchehri. 2011a. Acoustic properties in Arizona cypress logs: a tool to select wood for sounding board. *BioResources* 6(1):386-399.
- Roohnia, M., A. Tajdini y N. Manouchehri. 2011b. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. *NDT&E International* 44:13-20.
- Sandoz, J.L., Y. Benoit y L. Demay. 2000. Wood testing using acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the WCTE 2000 World Conference on Timber Engineering. Canada. p:136-142.
- Sedik, Y., S. Hamdan, I. Jusoh y M. Hasan. 2010. Acoustic properties of selected tropical wood species. *Journal of Non-destructive Evaluation* 29:38-42.
- Shen, J. 2006. Relationships between longitudinal and radial *Picea genera* sound vibration parameters. *Frontiers of Forestry in China* 1(4): 431-437.
- Silva G., J.A., F.J. Fuentes T., R. Rodríguez A., P.A. Torres A., M.G. Lomelí R., C. Waitkus, y H.G. Richter. 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. 207 p.
- Sotomayor-Castellanos, J.R., Y. Banda-Cervantes, M. Ramírez-Pérez y G. Suárez-Béjar. 2013. Características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de *Quercus* spp. (encino) del estado de Michoacán estudiada por métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera* 9(2):14-29.
- Sotomayor-Castellanos, J.R., L.I. Guridi G. y T. García M. 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., M. Ramírez-Pérez y J.B. Olguín-Cerón. 2014. Caracterización en flexión estática de madera plastificada de *Quercus scytophylla*. *Ciencia Nicolaita* 62:17-33.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. y G. Suárez-Béjar. 2013. Efecto del tratamiento de higró-termo-fatiga en las características acústicas de la madera de *Pinus douglasiana* y *Quercus* spp. *Ciencia Nicolaita* 59:7-20.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. y J.B. Olguín-Cerón. 2014. Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de madera plastificada de *Quercus scytophylla*. *Investigación y Ciencia* 61:34-42.
- Spycher, M., F.W.M.R. Schwarze y R. Steiger. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology* 42: 325-342.
- Tamarit U., J.C. y J.L. López T. 2007. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 261 p.
- Traoré, B., L., Brancheriau, P. Perré, T. Stevanovic y P. Diouf. 2010. Acoustic quality of vene wood (*Pterocarpus erinaceus* Poir.) for xylophone instrument manufacture in Mali. *Annals of Forest Sciences* 67:815, pp 1-7.
- Wegst, U.G.K. 2006. Wood for sound. *American Journal of Botany* 93(10):1439-48.

Wegst, U.G.K. 2008. Bamboo and wood in musical instruments. *Annual Review of Materials Research* 38: 323-349.

Zhang, T., S-L. Bai, S. Bardet, T. Alméras, B. Thibaut y J. Beauchêne. 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical Woods. *Journal of Wood Science* 57:377-386.

Manuscrito recibido el 7 de mayo de 2013.
Aceptado el 28 de agosto de 2014.

Este documento se debe citar como:
Sotomayor-Castellanos, J.R., G. Suárez-Béjar y J.B. Olguín-Cerón. 2015. Efecto del tratamiento higro-térmico en las características acústicas de la madera de *Quercus scytophylla* Liebm. *Madera y Bosques* 21(1):139-156.