



Estudio R&R de frecuencias naturales en madera de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia Plurijuga*

R&R study of natural frequencies in wood of *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia Plurijuga*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Ph.D.

Profesor, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México

javier.sotomayor@umich.mx

Héctor Manuel Sosa Villanueva, MSc.

Profesor, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México

hector.sosa@umich.mx

Fecha de recepción: 26 octubre 2021 / Fecha de aprobación: 9 marzo 2022

Índices y Bases de Datos:

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

PERIÓDICA

biblat
Bibliografía Latinoamericana

ERIH PLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Estudio R&R de frecuencias naturales en madera de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia Plurijuga*

R&R study of natural frequencies in wood of *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia Plurijuga*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Ph.D.

Profesor, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Michoacán, México
javier.sotomayor@umich.mx

Héctor Manuel Sosa Villanueva, MSc.

Profesor, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Michoacán, México
hector.sosa@umich.mx

Fecha de recepción: 26 octubre 2021 / Fecha de aprobación: 9 marzo 2022

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad en muestras representativas de probetas de madera de pequeñas dimensiones de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia Plurijuga*. La estrategia experimental asume dos etapas. La primera consistió en el análisis de los resultados de las frecuencias medidas en las tres especies angiospermas. Su objetivo fue validar la homogeneidad y la representatividad de las maderas en estudio. La segunda etapa se orientó al estudio de las variaciones de los resultados de las frecuencias. Su objetivo fue construir tablas de repetibilidad y reproducibilidad y de su análisis de varianza. Se preparó un diseño completamente al azar y balanceado. La unidad experimental consistió en tres grupos homogéneos de 40 probetas de cada especie. Para cada especie estudiada se realizaron estudios cruzados de repetibilidad y reproducibilidad. Los resultados indican que para *S. campanulata*, el 97,7% de la varianza total se debe al instrumento en tanto que el 2,3% a diferencias entre operadores; para *F. americana*, el 99,2% de la varianza total se debe al instrumento y el 0,8% a diferencias entre operadores, mientras que para *A. plurijuga*, el 100% de la varianza total se debe al instrumento en tanto que no existe variabilidad debida a diferencias entre operadores.

Palabras clave: Vibraciones transversales; Maderas angiospermas, Homogeneidad de la muestra, representatividad de la muestra, Análisis de varianza.

ABSTRACT

The objective of the research was to carry out a repeatability and reproducibility study in representative samples of small wooden specimens from *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia Plurijuga*. The experimental strategy assumes two stages. The first consisted of the analysis of the results of the frequencies measured in the three angiosperm species. Its objective was to validate the homogeneity and representativeness of the woods under study. The second stage was oriented to the study of the variations of the frequency results. Its objective was to build repeatability and reproducibility tables and their analysis of variance. A completely randomized and balanced design was prepared. The experimental unit consisted of three homogeneous groups of 40 test tubes of each species. For each species studied, crossover repeatability and reproducibility studies were carried out. The results indicate that for *S. campanulata*, 97.7% of the total variance is due to the instrument while 2.3% to differences between operators; for *F. americana*, 99.2% of the total variance is due to the instrument and 0.8% to differences between operators, while for *A. plurijuga*, 100% of the total variance is due to the instrument while there is no variability due to differences between operators.

Key words: Transverse vibrations, Angiosperm woods, Sample homogeneity, Representativeness of the sample, Variance analysis.

1. INTRODUCCIÓN

El módulo dinámico de la madera es un parámetro mecánico necesario para el cálculo y diseño ingenieril. Su magnitud se puede determinar por medio de pruebas de vibraciones en probetas de pequeñas dimensiones. Este método no destructivo implica conocer la masa y las dimensiones de las probetas estudiadas, así como determinar experimentalmente la frecuencia natural de vibración del sistema en movimiento (Segundinho *et al.*, 2013).

La literatura reporta variación en las magnitudes de los módulos dinámicos de la madera, la cual es atribuida a la diferenciación natural en las propiedades mecánicas entre especies y al interior de una misma especie (Brémaud *et al.*, 2012). Otra fuente de variabilidad es adjudicada a la configuración de las pruebas. Así, los valores del módulo dinámico determinados en una muestra representativa de probetas de una misma especie, con dimensiones similares, y estudiadas en una configuración experimental común, resultan en datos con una variación explicada por el coeficiente de variabilidad. Este parámetro usualmente se ha asociado a los valores medios y a la desviación estándar que se reportan en las publicaciones y representa, con sus reservas, la calidad de las mediciones.

En este contexto, los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) han confirmado ser una herramienta analítica que puede distinguir las posibles fuentes de variación en análisis de la estabilidad de sistemas de medición (Senvar y First, 2010) y han sido aplicados en contextos de mediciones de laboratorio (López *et al.*, 2018). La repetibilidad se define como la variación en las mediciones obtenidas con un medidor utilizado varias veces por un operador mientras se mide una característica en una parte.

Por su parte, la reproducibilidad se define como la variación en el promedio de las mediciones realizadas por diferentes operadores que usan el mismo indicador al medir una característica en una parte (Wang y Chien, 2010, Saikaew, 2018). En otras palabras, la repetibilidad se refiere a la variación de mediciones repetidas en un mensurando por un operador que usa el mismo dispositivo de medición. Por su parte, la reproducibilidad se relaciona con la variación de los promedios de medición entre varios dispositivos de medición, distintos procedimientos y/o diferentes operadores (Mohamed *et al.*, 2018, Mendes *et al.*, 2019).

El medidor de frecuencias utilizado en esta investigación ha sido empleado para observar el efecto de tratamientos de impregnación en los módulos dinámicos de la madera

(Alfredsen *et al.*, 2006, Ghosh *et al.*, 2008, Kielmann *et al.*, 2013). Los módulos dinámicos se calculan a partir de la frecuencia natural de las probetas, parámetro que, junto con la densidad de la madera, es la medición que describe el cambio producido por el tratamiento. No obstante, en estos trabajos no se detalla la precisión ni la exactitud de las frecuencias naturales. Por su parte, Fruehwald-Koenig (2019) reporta la correlación entre la frecuencia natural y el módulo de ruptura en vibraciones de la madera de *Elaeis guineensis* y considera que el fuerte coeficiente de determinación calculado ($R^2 = 0,74$) representa la calidad y mide la variabilidad de las mediciones.

Al determinar el módulo dinámico por vibraciones transversales, pueden ser medidos los pesos y las dimensiones de las probetas, relativamente con facilidad. Sin embargo, resta señalar la exactitud de las mediciones de las frecuencias. De aquí se deriva la pregunta de investigación ¿en qué medida las variaciones en las mediciones de las frecuencias se originan en el instrumento con que se miden y/o en posibles errores introducidos por el o los operadores que participan en los trabajos? Para responder a esta interrogante, la presente investigación propone como hipótesis de trabajo que la variabilidad en las mediciones de frecuencias de vibración se origina en el instrumento de medición. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue realizar un estudio de R&R en muestras representativas de probetas de madera de pequeñas dimensiones de *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia Plurijuga*.

2. METODOLOGÍA

La estrategia experimental asume dos etapas. La primera es el análisis de los resultados de las frecuencias medidas con el medidor de frecuencias en tres especies angiospermas: *Spathodea campanulata* P. Beauv, *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose. Esta etapa tiene como objetivo validar la homogeneidad y la representatividad de las muestras de las maderas en estudio.

La segunda etapa se refiere al estudio de R&R de las variaciones de los resultados de las frecuencias. Su objetivo es construir tablas de repetibilidad y reproducibilidad y de análisis de varianza. Los cálculos y análisis estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*®, siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y De la Vara (2009) y Gutiérrez y De la Vara (2013).

Se recolectaron piezas de madera aserrada de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* en empresas de transformación de productos forestales en el estado de Michoacán, México.

La madera no contenía anomalías estructurales ni defectos de crecimiento y con ella se prepararon 40 probetas con una sección transversal de 0,02 m de ancho, 0,02 m de espesor y de 0,4 m de largo como se muestra en la Figura 1.

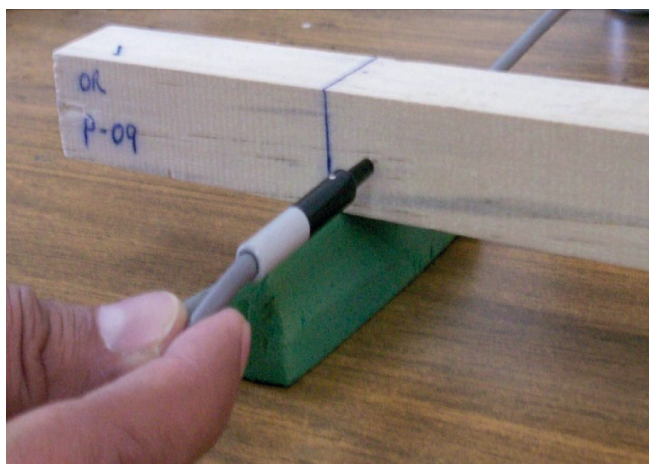
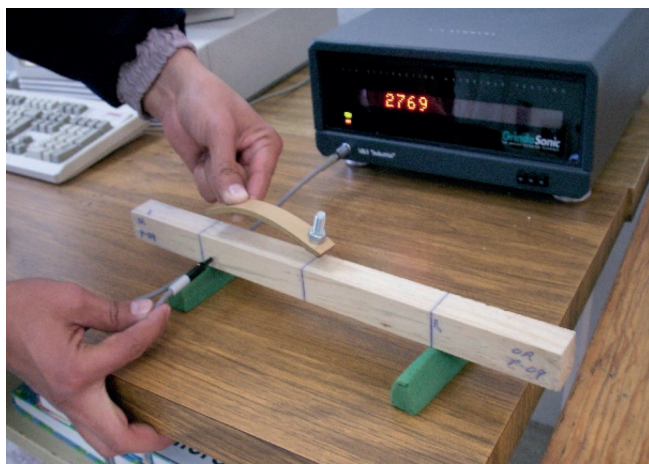


Figura 1. Pruebas de vibraciones transversales.

Las probetas se almacenaron durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 5\%$), hasta que su peso fue constante y la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio. Las características del material experimental y las frecuencias medidas son las reportadas por Sotomayor y Ávila (2020), debido a que la presente investigación forma parte de la línea de investigación de caracterización mecánica de maderas mexicanas, desarrollada en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México.

La densidad de la madera se determinó con la relación masa/volumen de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014

(International Organization for Standardization, 2014a), mientras que el contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo a la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). Ambos parámetros se determinaron en 40 probetas adicionales obtenidas de los mismos lotes de madera para las pruebas de vibraciones con dimensiones de $0,02\text{ m} \times 0,02\text{ m}$ de sección y $0,06\text{ m}$ de largo.

Para que los errores aleatorios propios de estas mediciones no influyan en los resultados, los pesos fueron medidos por operadores capacitados con una balanza digital con precisión de $0,1\text{ g}$ y las dimensiones de las probetas fueron medidas con un calibrador con precisión de $0,00001\text{ m}$. Las probetas de madera se idealizaron como vigas rectangulares y continuas, con geometría uniforme, estructura homogénea y cargadas en vibración transversal sobre soportes simples, lo que puede ser modelado como un sistema con un grado de libertad, considerando la madera como material elástico.

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta con dos operadores seleccionados al azar. Con tal propósito, se utilizó el aparato *Grindosonic*®. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso como se muestra en la Figura 2. Las vibraciones fueron registradas con el sensor de vibración y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de $0,01\text{ Hz}$.

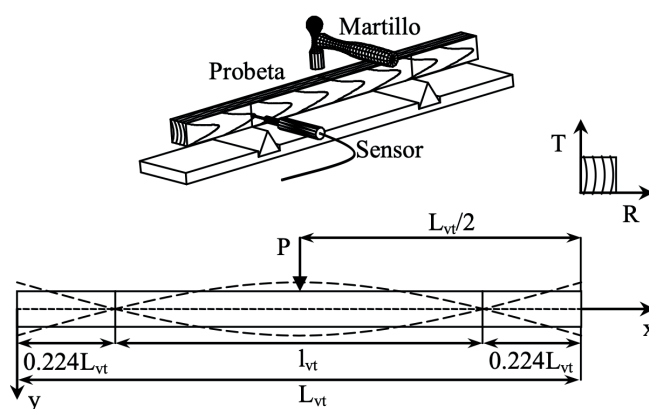


Figura 2. Configuración de las pruebas. P = Impacto; L_{vt} = longitud de la probeta; l_{vt} = Longitud entre soportes; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

2.1 Diseño experimental

Se preparó un diseño completamente al azar y balanceado. La unidad experimental consistió en tres grupos homogéneos de 40 probetas cada uno de maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* seleccionadas de manera aleatoria. Los dos operadores y las probetas se consideran fuentes de variación. Los pesos y las dimensiones de las probetas, así como el contenido de humedad de la madera y su densidad son factores fijos y controlables. Las variables de entrada son las frecuencias medidas por el operador A y las variables de salida son las medidas por el operador B. Los operadores no estaban advertidos de que las mediciones serían utilizadas para el estudio de R&R. Se realizó un experimento de un solo factor de variación (tipo de prueba), el cual consistió en el análisis de las frecuencias (operador A versus operador B) con tres niveles (*S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*). Así, se formaron para cada nivel (especies) cuatro muestras de 10 mediciones cada una como se muestra en la Figura 3.

Para cada muestra se calcularon las medias (μ), las desviaciones estándar (σ) y los coeficientes de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se calcularon los sesgos estandarizados (SE) y los apuntamientos estandarizados (AE) derivados de pruebas de normalidad. El criterio de demarcación para considerar normal la distribución de una muestra es: $[-2 < SE < +2, -2 < AE < +2]$. Para cada par de muestras independientes (operador A versus operador B) se verificaron las igualdades de varianzas y se practicaron análisis de varianzas. Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$, donde: H_0 = Hipótesis nula (el operador no influye en el parámetro calculado); μ_1 = Media de las frecuencias medidas por el operador A; μ_2 = Media de las frecuencias medidas por el operador B. Para todas las pruebas el nivel de confiabilidad fue de 95% ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. Después de realizadas las pruebas de vibraciones y utilizando el total de las cuarenta mediciones en cada especie (nivel), se calcularon los tamaños de la muestra (número de probetas necesarias) para un error aceptable de $\leq 0,05$ con la fórmula (1) (Gutiérrez y De la Vara, 2009):

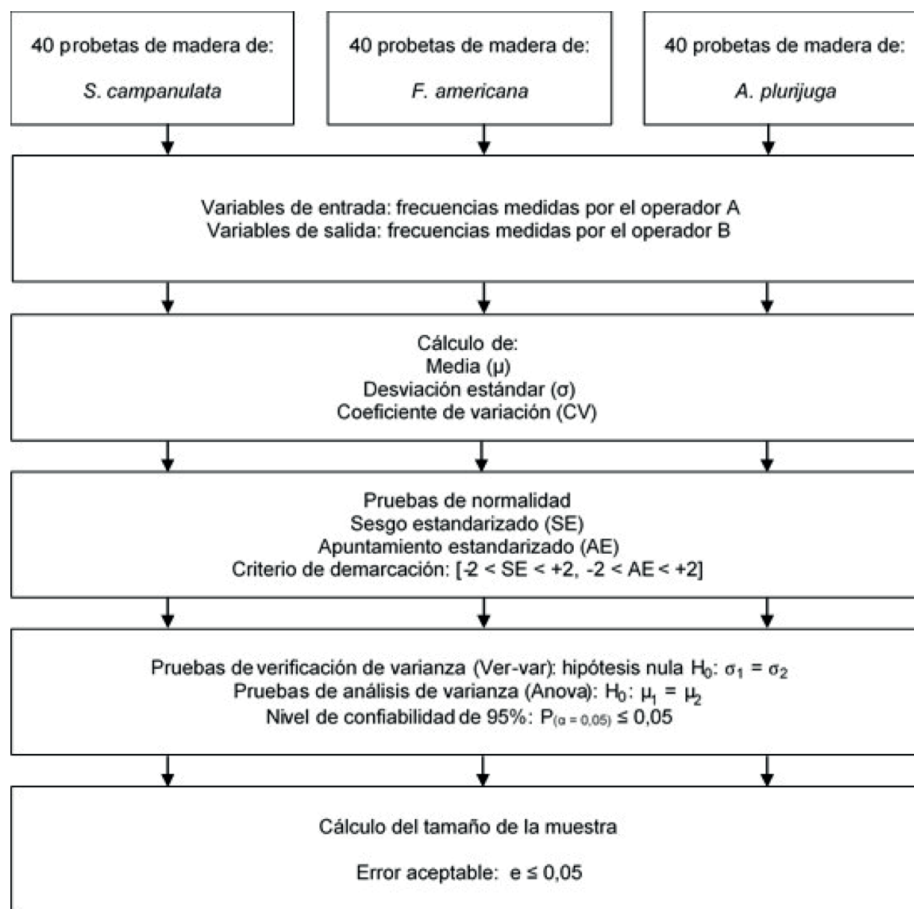


Figura 3. Diseño experimental.

$$n = (4 \times \sigma^2)/e \quad (1)$$

Donde:

n = Número de probetas necesarias

σ^2 = Varianza

e = Error aceptable $\leq 0,05$

2.2. Estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Se realizaron tres estudios cruzados de repetibilidad y reproducibilidad, uno para cada especie estudiada (*S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*). Se analizaron datos empíricos de las frecuencias naturales. Dos operadores realizaron en 10 probetas (partes) tres mediciones aleatorias, las cuales se analizaron como variables aleatorias e independientes. Se realizaron análisis de varianza (σ^2) entre los operadores y probetas. El nivel de confiabilidad fue de 95%. Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar que no existe interacción significativa para valores de $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$.

Las fuentes de variabilidad que se evaluaron en un estudio de R&R se definieron de acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2013). De tal forma que la variabilidad total observada fue:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{probetas}}^2 + \sigma_{\text{operadores}}^2 + \sigma_{\text{operadores} \times \text{probetas}}^2 + \sigma_{\text{instrumentos}}^2 \quad (2)$$

Donde:

σ_{total}^2 = Variabilidad total observada

$\sigma_{\text{probetas}}^2$ = Variabilidad atribuible a las probetas

$\sigma_{\text{instrumentos}}^2$ = Variabilidad de los instrumentos de medición

$\sigma_{\text{operadores}}^2$ = Variabilidad de los operadores

$\sigma_{\text{operadores} \times \text{probetas}}^2$ = Variabilidad por la interacción entre operadores y probetas

La variabilidad R&R se definió como:

$$\sigma_{\text{R\&R}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_{\text{R\&R}}^2$ = Variabilidad R&R

$\sigma_{\text{repetibilidad}}^2$ = Variabilidad atribuible al instrumento de medición

$\sigma_{\text{reproducibilidad}}^2$ = Variabilidad atribuible a las probetas

De los datos del estudio de R&R se calcularon las sumas de cuadrados (SC) propios a cada componente de variación dado en la fórmula (2). Al dividir cada suma de cuadrados por sus grados de libertad se obtuvieron los cuadrados medios (CM). Con estos parámetros se construyeron pruebas estadísticas para verificar diferencias entre las partes, entre los operadores y el efecto de interacción operadores \times probetas. Además, de los valores esperados de los cuadrados medios se dedujo que los estimadores de los componentes de varianza para cada caso estuvieron dados por:

$$\sigma_{\text{instrumentos}}^2 = \text{CM}_{\text{error}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{probetas}}^2 = \frac{\text{CM}_{\text{probetas}} - \text{CM}_{\text{operadores} \times \text{probetas}}}{t \times o} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{operadores}}^2 = \frac{\text{CM}_{\text{operadores}} - \text{CM}_{\text{operadores} \times \text{probetas}}}{t \times p} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{operadores} \times \text{partes}}^2 = \frac{\text{CM}_{\text{operadores} \times \text{probetas}} - \text{CM}_{\text{error}}}{t} \quad (7)$$

Donde:

p = Número de probetas

o = Número de operadores

t = Número de pruebas

De esta manera se obtuvieron la repetibilidad, la reproducibilidad y el error de medición, los cuales, para su interpretación, se expresan como porcentajes de la variación total.

3. RESULTADOS

3.1. Contenido de humedad

Los contenidos de humedad de la madera fueron para *S. campanulata* 8%, para *F. americana* 10% y para *A. plurijuga* 12%, de tal forma que se considera que este parámetro no interviene en los resultados.

3.2. Densidades

Las densidades promedio fueron para *S. campanulata* 351 kg m⁻³, para *F. americana* 652 kg m⁻³ y para *A. plurijuga* 838 kg m⁻³.

3.3. Frecuencias

Los resultados de las mediciones de las frecuencias se presentan en la Tabla 1. Respecto a las pruebas de normalidad para todas las muestras de las frecuencias naturales, de las tres especies indican valores del sesgo estandarizado y del

apuntamiento estandarizado que satisfacen el criterio de demarcación para considerar sus distribuciones normales como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1. Resultados de las mediciones de las frecuencias (f).				
PROBETAS	OPERADOR A		OPERADOR B	
(PARTES)	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2
-	f (Hz)	f (Hz)	f (Hz)	f (Hz)
-	<i>S. campanulata</i>			
1	475	421	451	474
2	445	441	461	441
3	492	408	413	464
4	448	435	489	406
5	434	427	456	467
6	423	430	501	437
7	440	444	456	413
8	479	441	440	454
9	403	444	482	412
10	397	443	413	419
-	<i>F. americana</i>			
1	488	581	486	606
2	596	624	590	562
3	534	625	590	628
4	557	537	629	539
5	586	656	540	590
6	605	663	589	592
7	566	632	535	535
8	545	639	638	542
9	614	594	528	565
10	598	569	588	631
-	<i>A. plurijuga</i>			
1	553	624	631	545
2	599	605	618	537
3	600	603	530	558
4	566	539	572	595
5	506	560	607	532
6	567	520	593	592
7	484	542	537	526
8	621	600	450	588
9	585	617	615	618
10	532	530	570	542

Tabla 2. Resultados de las pruebas de vibraciones.

Muestras	Frecuencias		Normalidad		Ver-var	Anova
	μ	CV	SE	AE	$P_{(\alpha = 0,05)}$	$P_{(\alpha = 0,05)}$
-	<i>S. campanulata</i>					
OPERADOR A, PRUEBAS 1	444	7	0,063	-0,572	0,132*	0,248*
OPERADOR A, PRUEBAS 2	433	3	-1,516	0,524	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 1	456	6	-0,163	-0,422	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 2	439	6	0,087	-1,117	-	-
-	<i>F. americana</i>					
OPERADOR A, PRUEBAS 1	569	7	-1,205	0,353	0,960*	0,087*
OPERADOR A, PRUEBAS 2	612	7	-0,778	-0,314	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 1	571	8	-0,442	-0,349	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 2	579	6	0,290	-0,911	-	-
-	<i>A. plurijuga</i>					
OPERADOR A, PRUEBAS 1	561	8	-0,693	-0,328	0,684*	0,885*
OPERADOR A, PRUEBAS 2	574	7	-0,129	-1,280	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 1	572	10	-1,663	1,111	-	-
OPERADOR B, PRUEBAS 2	563	6	0,633	-0,865	-	-

μ = Media en Hz; CV = Coeficiente de variación en porcentaje; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; * $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$: No existe diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confiabilidad de 95%.

En el mismo sentido, las verificaciones de varianza y el análisis de varianza confirman que las distribuciones de los resultados de las tres especies son homogéneas sin diferencias estadísticamente significativas al interior de una misma especie. Estos corolarios permiten considerar que las mediciones son uniformes y con coeficientes de variación aceptables. Es decir, las mediciones de las frecuencias naturales fueron realizadas en muestras homogéneas y representativas, por lo que son apropiadas para el estudio de R&R.

3.4. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad

Los resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad que se presentan en la Tabla 3 indican que para *S. campanulata* el 97,7% de la varianza total se debe al instrumento (repetibilidad) en tanto que 2,3% a diferencias entre operadores (reproducibilidad); para *F. americana* 99,2% de la varianza total se debe al instrumento en tanto que 0,8% a diferencias entre operadores; mientras que para *A. plurijuga*, el 100% de la varianza total se debe al instrumento y no existe variabilidad debida a diferencias entre operadores.

Tabla 3. Resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad.			
Fuente de variación	σ^2	% con	% R&R
<i>S. campanulata</i>			
Repetibilidad	751	100	99,7
Reproducibilidad	3	0	2,3
R&R	753	100	100
Probetas	0	0	-
Variación Total	753	-	-
<i>F. americana</i>			
Repetibilidad	1881	99	99,2
Reproducibilidad	23	1	0,8
R&R	1904	100	100
Probetas	0	0	-
Variación Total	1904	-	-
<i>A. plurijuga</i>			
Repetibilidad	1603	88	100
Reproducibilidad	0	0	0
R&R	1603	88	100
Probetas	216	12	-
Variación Total	1819	-	-

σ^2 = Varianza; R&R = Repetibilidad y reproducibilidad; % con = Porcentaje de contribución.

Los resultados del análisis de varianza del estudio de R&R que se presentan en la Tabla 4 indican que para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* el valor $P_{(\alpha=0,05)}$ es mayor o igual que 0,05, es decir, no hay interacción estadísticamente significativa entre operadores y probetas al nivel de confianza del 95%. La parte del error residual corresponde a la repetibilidad y tampoco hay interacción estadísticamente significativa.

Los resultados del cálculo del tamaño de la muestra (Fórmula 1), es decir, del número de probetas necesarias para evaluar una cantidad estadísticamente representativa se presentan en la Tabla 5. El número total de probetas medidas para cada especie fue de cuarenta, cantidad mayor y suficiente a la requerida. En lo concerniente al número de mediciones realizadas, este corolario confirma la consistencia del experimento.

4. DISCUSIÓN

Villaseñor y Sotomayor (2015) determinaron los coeficientes de variación de las frecuencias naturales medidas en pruebas de vibraciones transversales con el mismo instrumento de medición y reportaron para *Fraxinus americana* 7% mientras que para *Fraxinus uhdei* 5%. Igualmente, Sotomayor (2017) reporta coeficientes de variación para *Cedrela odorata* de 10% y para *Platymiscium dimorphandrum* de 5%. Estos resultados determinados en configuraciones experimentales parecidas a la de esta investigación son similares a los presentados en la Tabla 2 para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* que varían entre 3% (*S. campanulata*, Operador A, pruebas 2) y 10% (*A. plurijuga*, Operador B, pruebas 1).

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza del estudio de repetibilidad y reproducibilidad.					
Fuente de variación	SC	GL	CM	Razón F	Valor P
-	-	-	-	P($\alpha = 0,05$)	P($\alpha = 0,05$)
<i>S. campanulata</i>					
Operadores	801	1	801	1,070	0,310
Probetas	4077	9	453	0,600	0,784
Residual	21770	29	751	-	-
Total	26640	39	-	-	-
<i>F. americana</i>					
-	SC	GL	CM	Razón-F	Valor-P
Operadores	2341	1	2341	1,240	0,274
Probetas	15510	9	1723	0,920	0,525
Residual	54540	29	1881	-	-
Total	72390	39	-	-	-
<i>A. plurijuga</i>					
-	SC	GL	CM	Razón-F	Valor-P
Operadores	0	1	0	<0,000	0,991
Probetas	22200	9	2467	1,540	0,181
RESIDUAL	46490	29	1603	-	-
TOTAL	68690	39	-	-	-

SC = Suma de cuadrados; GL = Grados de libertad; CM = Cuadrados medios.

Tabla 5. Cálculo del número de probetas necesarias.				
Especies	μ	σ^2	e	n
<i>S. campanulata</i>	443	676	0,05	6
<i>F. americana</i>	583	1849	0,05	9
<i>A. plurijuga</i>	568	1764	0,05	9

μ = media (Hz); σ^2 = Varianza; % e = Error aceptable; n = Número de probetas necesarias.

El coeficiente de variación representa la calidad de las mediciones y los valores $P_{(\alpha = 0,05)}$ del análisis de varianza confirman la homogeneidad de las mediciones. Sin embargo, ambos estadísticos no explican de manera explícita el origen de la variabilidad, en este caso, si se trata del error introducido por el instrumento de medición, por los operadores y/o por la variabilidad natural atribuible a las características mecánicas de las especies de madera en estudio. Los resultados de los análisis de varianza aceptan la hipótesis de igualdad entre los tratamientos con respecto a la media de las muestras, en este caso, de las frecuencias de cada operador y pruebas; y esto para cada nivel o especie estudiada.

Para las tres especies, la contribución de la repetibilidad fluctuó desde un mínimo para *A. plurijuga* con 88%, hasta un máximo de 100% para *S. campanulata*. Así, la variación en los resultados se puede atribuir al instrumento. La reproductibilidad contribuyó 1% en *F. americana* y las probetas 12% en el caso de *A. plurijuga*. Así, los errores de medición atribuidos al aparato fueron significativos: dado que el operador puede leer el valor de las frecuencias directamente en la pantalla digital en el medidor de frecuencias, pero el impacto que aplica a la probeta es realizado manualmente por él, la variación en las mediciones obtenidas posiblemente resulta de la experiencia y proceder del operador. Para evitar esta situación, es recomendable que un solo operador realice todas las mediciones.

Estos resultados complementan los corolarios reportados anteriormente en la literatura. La variación en los parámetros derivados de mediciones de frecuencias naturales de vibración se atribuye principalmente a la variabilidad natural en las características de la madera (Brancheriau *et al.*, 2010, Spycher *et al.*, 2008, Brémaud *et al.*, 2012). Por su parte, Sotomayor (2015) concluye que parámetros experimentales determinados en un mismo grupo de especímenes son diferentes por la técnica experimental empleada, la variabilidad de la madera, el contenido de humedad, la temperatura al momento del ensayo, la anisotropía material y el tipo de sollicitación mecánica en cada una de las pruebas. Dado que el operador realiza las pruebas de manera manual, no se pueden generar impactos consecutivos similares, en términos de energía y de ubicación en la pieza. De tal forma que se registran magnitudes diferentes.

5. CONCLUSIONES

El estudio de R&R de las frecuencias naturales de vibración en maderas de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*, medidas con un mismo instrumento, permite cuantificar las fuentes de variabilidad entre los instrumentos, los operadores y las probetas. La variabilidad observada puede ser atribuible en una proporción muy importante a las diferencias en las lecturas de las mediciones realizadas en el aparato por los operadores.

En las muestras de madera estudiadas, el instrumento de frecuencias utilizado proporciona medidas confiables, con coeficientes de variación aceptables en ciencias e investigación de la madera. En el mismo sentido, se confirma la calidad de las mediciones de frecuencias naturales de vibración reportadas en investigaciones para determinar módulos dinámicos en otras especies de madera. Los resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de las maderas estudiadas y son válidas para las condiciones particulares de la metodología aquí empleada.

Los estudios de R&R de características físico-mecánicas de la madera, son importantes para certificar los datos empíricos empleados en cálculo ingenieril y son valiosos para contrastar los datos de diferentes investigaciones. En el mismo sentido, la normalización de pruebas físico-mecánicas asociadas con estudios de R&R sugieren un amplio espectro de aplicaciones y futuras líneas de investigación en ciencias y tecnología de la madera.

AGRADECIMIENTOS

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en Morelia, Michoacán, México. Se agradece su participación en las mediciones de laboratorio a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la UMSNH.

6. REFERENCIAS

- Alfredsen G., Larnøy, E., & Militz, H. (2006). Dynamic MOE testing of wood: the influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration. *Wood Research*, 51(1), 11-20.
- Brancheriau, L., Kouchade, C., & Brémaud, (2010). Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*, 56, 371–379.
- Brémaud, I., El Kaïm, Y., Guibal, D., Minato, K., Thibaut, B., & Gril, J. (2012). Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science*, 69, 373-386.
- Fruehwald-Koenig, K. (2019). Properties and Grading of Oil Palm Lumber. En: Proceedings: 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-272, Wang, X., Sauter, U. H., Ross, R. J. (eds.), 204-211 Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, U.S.
- Ghosh, S. C., Militz, H., & Mai, C. (2008). Decay resistance, treated wood with functionalised commercial silicones. *BioResources*, 3(4), 1303-131.
- Gutiérrez, H., & De la Vara Salazar, R. (2009). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
- Gutiérrez, H., & De la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. México: Mc Graw Hill.
- International Organization for Standardization. (2014a). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2014b). ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization.

- Kielmann, B. C., Militz, H., & Mai, C. (2013). Strength changes in ash, beech and maple wood modified with a n-methylol melamine compound and a metal-complex dye. *Wood Research*, 58(3), 343-350.
- López, G., Mazaira, Z., Hernández, I. A., & Cabrera, H. R. (2018). Análisis de la calidad de las mediciones en el proceso de laboratorio. *Revista Espacios*, 39(6), 1-18.
- Mendes, L. M., Gomes Nobrega Paiva, R., Santana Peruchi, R., Rotela Junior, P., & De Freitas Gomes, J. H. (2019). New indicators for measurement error detection in GR&R studies. *Measurement*, 140, 557-564.
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2018). Investigation of dimensional variation in parts manufactured by fused deposition modeling using Gauge Repeatability and Reproducibility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 310, 012090.
- Saikaew, C. (2018). An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. *Measurement*, 118, 246-252.
- Segundinho, P. G., Zangiaco, A. L., Carreira, M. R., Dias A. A., & Lahr, F. A. R. (2013). Evaluation of glued laminated timber beams of cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.). *Cerne*, 19(3), 441-449.
- Senvar, O., & First, S. U. K. (2010). An overview of capability evaluation of Measurement Systems and Gauge Repeatability and Reproducibility Studies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 1(2), 121-127.
- Sotomayor, J. R. (2015). Variación del módulo de elasticidad dinámico de la madera según la técnica de evaluación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 11(2), 14-22.
- Sotomayor, J. R. (2017). *Tópicos en Tecnología de la Madera*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, J. R., & Ávila Calderón, L. E. A. (2020). Densidad y módulo dinámico de tres maderas mexicanas impregnadas con boro. Evaluación con vibraciones transversales. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(1), 176-190.
- 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(4), 325-342.
- Villaseñor, J. M. & Sotomayor, J. R. (2015). Caracterización dinámica de la madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*. 1(1), 43-53.
- Wang, F.K., & Chien, T.W. (2010). Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers & Industrial Engineering*, 58, 143-150.