

Características acústicas de trece especies de maderas en la fabricación de instrumentos musicales

Acoustic characteristics of thirteen species of woods in the manufacture of musical instruments

Jorge Omar Livia Calderón¹; Luis Shuseki Yoza Yoza^{2*}; Moisés Pascual Acevedo Mallque¹
Rodolfo Sonco Cutire²; Oscar Tang Cruz²

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Dpto. Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Lima, Perú.
² Facultad de Ciencias, Dpto. Física y Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Lima, Perú.

* Autor correspondiente: lyoza@lamolina.edu.pe (L. S. Yoza Yoza).

ORCID de los autores:

J. O. Livia Calderón: <https://orcid.org/0000-0003-1685-9875>

M. P. Acevedo Mallque: <https://orcid.org/0000-0002-0638-395X>

O. Tang Cruz: <https://orcid.org/0000-0002-4641-7368>

L. S. Yoza Yoza: <https://orcid.org/0000-0003-1540-182X>

R. Sonco Cutire: <https://orcid.org/0000-0001-5955-2174>

RESUMEN

Se evaluaron las propiedades acústicas en trece especies de madera, incluyendo maderas tradicionales y maderas alternativas para ser utilizadas en la luthería. Se evaluaron: la velocidad del sonido, el amortiguamiento de la radiación sonora, la resistencia de la onda acústica, modos de vibración y el decaimiento logarítmico vibracional. La selección de las especies de madera se realizó mediante técnicas tradicionales aplicados por los luthieres, además de la determinación de la densidad y la humedad de las maderas. El estudio empleó principalmente técnicas acústicas no destructiva y comparó las respuestas acústicas en muestras radiales y longitudinales. Los resultados comparados con las maderas acústicas tradicionales; confirmaron que el Palisangre (*Brosimum rubescens*) y palo azufre (*Symphonia globulifera*) presentan las mejores propiedades acústicas deseables para la fabricación de instrumentos musicales, lo que permite mejorar la elaboración de fondos y aros de resonancia de instrumentos musicales a cuerda.

Palabras clave: luthier; maderas tonales; sonido; frecuencia fundamental.

ABSTRACT

The acoustic properties of thirteen species between traditional woods and alternative woods are to be used in lathery. The following were evaluated: the speed of sound, the damping of sound radiation, the resistance of the acoustic wave, vibration modes and the logarithmic vibrational decay. The selection of wood species was carried out using traditional techniques applied by luthiers, in addition to determining the density and humidity of the wood. The study primarily employed non-destructive acoustic techniques and compared acoustic responses in radial and longitudinal samples. The results compared to traditional acoustic woods confirmed that Palisangre (*Brosimum rubescens*) and palo Azufre (*Symphonia globulifera*) present the best acoustic properties desirable for the manufacture of musical instruments, which allows improving the elaboration of backs and resonance sides of stringed musical instruments.

Keywords: chordophones; luthier; wood tone; speed of sound; fundamental frequency.

Recibido: 29-10-2024.

Aceptado: 02-03-2025.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La madera como material de ingeniería posee propiedades físicas, mecánicas, químicas; algunas de estas son más conocidas por su uso tradicional y otras poco difundidas, como es el caso de las propiedades acústicas. La madera es la materia prima tradicional utilizada para la elaboración de instrumentos musicales por tener cualidades acústicas, es así que el conocimiento de estas propiedades de la madera se considera como esencial para determinar un producto de mayor valor y calidad, aprovechando así al máximo el recurso natural y proponiendo nuevas especies para su uso. En este contexto, se puede analizar la madera por su anisotropía, por sus modos mecánico-elásticos como el MOE el MOR y coeficiente de Poisson. Por otro lado, del punto de vista energético, como: los de modos de vibración ortogonales, de activación y decaimiento, de atenuación y absorción. Además, en el caso de instrumento tipo cordófonos se caracterizan acústicamente sus componentes como la tapa, fondo, aros, diapason y otros. En el presente trabajo se puede proponer la utilización de métodos no destructivos para determinar la velocidad de las ondas mecánicas, densidad, los modos de vibración de las muestras de maderas y su decaimiento logarítmico (De la Cruz, 2018). Cabe señalar que, en el Perú, la falta de información acerca de las propiedades acústicas de la madera es una de las limitantes para su uso en la industria de la construcción de instrumentos musicales, y que esta actividad se realiza de forma artesanal; es necesario precisar que no todas las especies maderables tienen propiedades acústicas óptimas, ni toda la madera de un árbol es aprovechable en términos acústicos. En esta investigación la selección de las especies de madera se realizó según los métodos tradicionales usados por los luthieres; se evaluaron especies alternativas tropicales, y especies de uso tradicional nacionales e importadas; El objetivo consistió en determinar las propiedades mecánicas elásticas dinámicas y relacionarla con propiedades energéticas y disipativas evaluando factores combinados de estas propiedades, y que mejor expliquen las propiedades de las maderas acústicas, y que permitan la mejor selección de maderas para la fabricación de fondos y aros de resonancia de cordófonos.

Schelleng (1963) indica que la amortiguación de la radiación (A_r) dado por v/ρ , donde v la velocidad del sonido relacionada con la energía elástica emitida y ρ la densidad relacionada con la inercia de la madera cualidad vibracional, que es similar para maderas con el mismo valor del factor (A_r), y que valores altos de este factor, representan a maderas buenas emisoras de sonido. De otro lado, se tiene la resistencia acústica (R_a) dada por $v\rho$, que indica la impedancia acústica de la madera. Yoshioka (2007) señala que la madera para

instrumentos musicales a cuerdas se divide principalmente en dos grupos de maderas, para tapa acústica y para fondo y aro, propone clasificarlas mediante la relación (v/δ), la velocidad dividida entre el decaimiento logarítmico (δ), y compararla con el factor ($1/\rho v$) o inverso de la impedancia acústica; además, que la comparación debe ser a frecuencias arriba de los 300 Hz para evitar la influencia de la atenuación de las vibraciones. La comparación de estos parámetros permite identificar las maderas de tapa con una correlación negativa entre los factores y madera de fondo con alta correlación positiva de los factores. De otro lado, Obataya et al. (2000) recomiendan el estudio de la matriz de las fibras y la porosidad celular a fin de caracterizar las propiedades vibracionales de la madera y propone también, el uso del parámetro v/δ para caracterizar la transmisión por vibración de la madera; además proponer el análisis de la ratio radial/longitudinal (δ_R/δ_L) del decaimiento logarítmico en varias frecuencias de resonancia para notar la anisotropía de la madera. Oktav (2024) señala la influencia del espesor de la placa de resonancia del instrumento Karadeniz kemenche, encontrando picos en 340 Hz y 900Hz para un espesor de 2,1mm y de 1040Hz para el espesor de 1,7mm, en el presente estudio se fijará el estudio para muestras de 3mm, de espesor evitando la influencia de la variación de este parámetro en los resultados. Quintanilla et al. (2022) consideran que la determinación de descriptores para el estudio de maderas acústicas deben contemplar la anisotropía y las propiedades ortotrópicas de la madera, Nop & Tippner (2022), propone el uso de los estudios de los amortiguamientos acústicos de la madera, para determinar los modos de vibración, su dirección de propagación y frecuencia.

Mihăliciță et al. (2020) estudiando el comportamiento de guitarras con tapas de spruce (*Picea Abies L*) y fondos de arce (*Acer Pseudoplat*) con pulsos en la zona del puente muestran las respuestas de las tapas, que generan pulsos de casi 10 veces mayor, comparado con las del fondo; además de opacarse a frecuencias mayores de 700 Hz. Mammoliti et al. (2024) señala la importancia de aprovechar el uso de maderas consideradas de desechos industriales. Al proponer hacer evaluaciones de las propiedades mecánicas antes de desecharlas, usando técnicas no destructivas por sus bajos costos. Wong et al. (2025) indica la importancia de evaluación de las propiedades mecánicas, de las maderas usadas en los instrumentos musicales tradicionales y compararlas con las propiedades mecánicas de muestras rectangulares de distintas especies. En este contexto el objetivo de este estudio es encontrar la especie que mejor imita a una tapa-acústica, usando el algoritmo MRMR de Machine Learning.

METODOLOGÍA

Las muestras de madera estuvieron constituidas por trece especies, se incluyeron maderas de uso tradicional nacionales, estas fueron: caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro (*Cedrela odorata*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), palisangre (*Brosimum rubescens*), diablo fuerte (*Prumnopitys harmsiana*), nogal (*Juglans sp.*),

especies exóticas nacionales como ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), dialium (*Dialium guianense*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), y palo azufre (*Symphonia globulifera*); y especies importadas como: spruce (*Picea engelmannii*), palisandro (*Dalbergia latifolia*), y arce (*Acer saccharum*); las últimas fueron

sugeridas por los luthiers y los dos primeros grupos fueron seleccionadas de una muestra de 68 especies mediante técnicas aplicadas por los mismos, tales como el percutir las maderas con los dedos percibiendo el sonido muy cerca al oído, distinguir visualmente incluso al reflejo de la luz, palpar la dureza o rasgar utilizando la uña, percibir el olor, sabor o lo agradable que sea a la vista. Las muestras fueron provistas por la Empresa Industrial Amazónica Zapote S.A-IMAZA. y fueron identificadas en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú en el Laboratorio de Propiedades Físico Mecánicas de la Madera, en el mismo fueron determinadas en las propiedades de densidad y humedad de cada especie de acuerdo al procedimiento estipulado en las Normas Técnicas Peruanas (NTP) 251.010 y la norma NTP 251.011.

Las muestras para la determinación de los parámetros acústicos tales como la *velocidad del sonido*, la *amortiguación de la radiación*, la *resistencia de onda acústica*, *modos de vibración* y el *decaimiento logarítmico*, fueron acondicionadas a partir de piezas de madera según la orientación de sus fibras, diez probetas radiales de 0,3 cm x 1,5 cm x 30 cm. y diez probetas longitudinales de 0,3 cm x 1,5 cm x 20 cm. por especie.

La velocidad de transmisión del sonido se determinó con el Temporizador Ultrasónico, y Microsegong timer (Fakopp, 2005), las mediciones se realizaron entre dos puntos en sentido longitudinal y transversal a las fibras, manteniendo la relación 1/20 de las dimensiones entre el ancho/largo de las probetas. Se controló la temperatura del entorno en 19 °C (±1 °C). y contenido de humedad promedio de 10,8 %.

Frecuencia de resonancia experimentales



Los módulos de vibración elástica

Se determinaron valores para los tres primeros armónicos de acuerdo con las posiciones de los apoyos para cada modo usando un percutor, micrófono (Shure) y un osciloscopio, (Rohde & Schwarz), Figura 1.

Modos de vibración y decaimiento logarítmico

Se efectuaron pruebas iniciales recreando la forma como los luthiers percuten la madera, con los nudillos de los dedos para oír el timbre de las resonancias. Las cuales fueron determinadas, utilizando el programa analizador FFT de frecuencias Fakopp, para determinar los modos de vibración: 1er, 2do o 3er armónico en cada caso, Figura 1 y Figura 2, además, se visualizó la atenuación de la onda de vibración a través de su decaimiento logarítmico. Se controló la temperatura del entorno en 19 °C (±1 °C), con contenido de humedad promedio de 10,8%.

Decaimiento logarítmico de la vibración

El decaimiento logarítmico de la vibración (δ), relación 1, se determinó utilizando el analizador de frecuencias Fakopp usando un analizador FFT de Fourier; para tablillas tanto longitudinales como radiales. Sin embargo, Obataya et al. (2000) indican que en el caso radial podrían usarse pruebas de torsión,

$$\delta \cong \beta T \tag{1}$$

Donde β : factor de decaimiento (1/s), $\beta=C/2m$; C es el coeficiente de rozamiento viscoso (kg/s) y m es la masa de la muestra (kg); T: periodo (s).

En la Figura 2B se muestra un proceso de medición simultaneo de dos espectros (FFT) usando la misma APP, desfasados en tiempo lo que permite estimar el tiempo del decaimiento, lo cual está relacionado al rozamiento interno en los procesos de vibración interna de la madera.

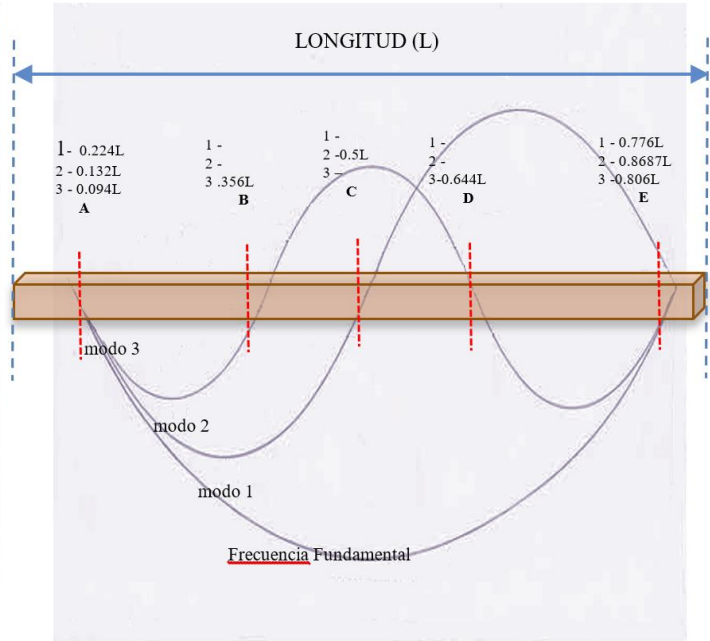


Figura 1. Modos de vibración de una barra uniforme, los puntos A, B, C, D y E son los puntos de los apoyos por cada modo.

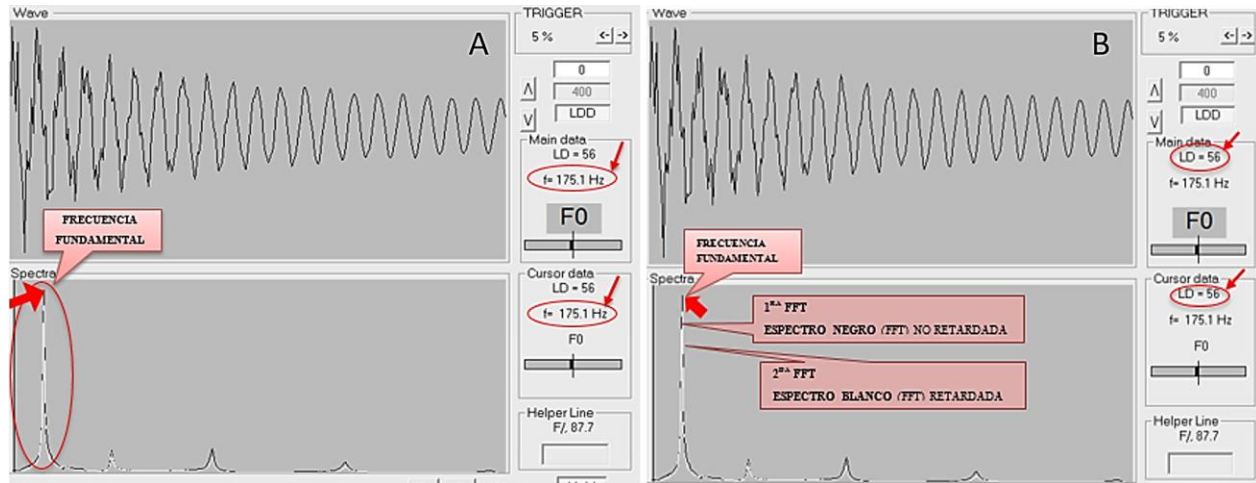


Figura 2. A. Ventana de aplicación del analizador de frecuencias Fakopp indicando el valor de los modos de vibración. y sus ubicaciones. B. Ventana del analizador indicando los valores del decaimiento logarítmico y la ubicación de los espectros.

Cálculo del Amortiguamiento de la Radiación Sonora

La Amortiguación de Radiación Sonora (Ar), se determinó mediante la relación (2), (Kollmann & Côté, 1968), que relaciona la energía sonora emitida con respecto a la energía total de la muestra de madera, los valores altos indican maderas de tapa.

$$Ar = \frac{v}{\rho} \tag{2}$$

Donde Ar: Coeficiente de la Amortiguación sonora, cm⁴/s. g; v: Velocidad del sonido (m/s) (Longitudinal (L) o Radial; ρ: Densidad corregida al 12 % (g/cm³).

Cálculo de la resistencia acústica

La Resistencia de la acústica (Ra), se determinó mediante la relación 3, (Kollmann & Côté, 1968). Indica la impedancia acústica de la madera y cuyos valores altos indican maderas con buenas cualidades para el fondo de instrumentos musicales.

$$Ra = \rho \cdot v \tag{3}$$

Donde Ra: Resistencia de la onda acústica, g/cm²s.

Cálculo de Parámetro de trasmisión (Pt)

Parámetro de Trasmisión acústica (v/δ), se determinó a propuesta de Yoshioka S. (2007) y Obataya et al. (2000), que relacionan el ratio: de la velocidad del sonido y el decaimiento logarítmico (v/δ), que caracteriza la conversión de la energía de trasmisión la vibración de la madera, relación 4.

$$Pt = \frac{v}{\delta} \tag{4}$$

Donde Pt: Parámetro de trasmisión acústica en cm/s; δ: Decaimiento logarítmico de la vibración.

Cálculo del factor de Asimétrica radial/longitudinal del decaimiento logarítmico

Indica, la asimetría energética radial longitudinal, propuesta por Obataya et al. (2000).

$$Ad = \frac{\delta_R}{\delta_L} \tag{5}$$

Donde δ_R: Decaimiento logarítmico radial; δ_L: Decaimiento logarítmico longitudinal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad y velocidad de propagación del sonido

Las densidades de las especies presentaron valores entre 0,39 a 1,01 g/cm³ en un intervalo de humedades de 9,4 a 12,4 %. En la Tabla 1 se presentan las densidades corregidas al 12 % de contenido de humedad de las muestras, las velocidades promedio de la propagación del sonido en sentido longitudinal y radial, y las frecuencias de los modos de vibración longitudinales y radiales de las muestras estudiadas.

Indicando, que se encontraron valores mayores de las velocidades que las referencias revisadas, debido posiblemente a las diferencias internas de las muestras así, para el Spruce (*Picea spruceanum*) con 4790 m/s y para el cedro con 3770 m/s (Kollmann & Côté, 1968).

Frecuencias de resonancias longitudinales y radiales

Las frecuencias experimentales, promedio para los modos del 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} armónico en muestras longitudinales y radiales se presentan, en la Tabla 1. Señalando que los valores obtenidos para las frecuencias

fundamentales de las especies como la caoba (*Swietenia macrophylla*), el cedro (*Cedrelela odorata*) son más altos que los encontrados por Sotomayor & Villaseñor (2018), para velocidades de 4682 m/s y 4239 m/s, respectivamente.

Decaimiento Logarítmico de la radiación

Con respecto al Decaimiento logarítmico (δ), en la Tabla 2 se puede observar el comportamiento del decaimiento logarítmico en el sentido longitudinal de varias especies, sobresaliendo valores bajos en las especies caoba, palo azufre, dalium y palisangre comparables con el spruce. Esto indica la calidad acústica de estas maderas para la construcción de instrumentos musicales (Hatachan et al., 2017), sobresaliendo el palisandro y diablo fuerte cuyos altos valores de decaimiento logaritmo (especialmente en el 2do armónico) se debe posiblemente a las características de fricción entre sus fibras, maderas que son usadas como fondo en los instrumentos a cuerdas (Tabla 2 y Figura 3).

Tabla 1

Frecuencias de resonancia experimental promedio en muestras longitudinales y radiales para las frecuencias del 1er, 2do y 3er armónico

Especie	Densidad 12 % g/cm ³	Velocidad (m/s)		Longitudinal (Hz.)			Radial (Hz.)		
		Long.	Radial	1er	2do	3er	1er	2do	3er
Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	0,61	5326	1315	159,5 (10,3)	405,2 (19,0)	742 (66,2)	97 (3,0)	260 (5,0)	502 (14,9)
Cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	0,47	5106	*	138 (14,3)	379,7 (32,6)	729,1 (57,1)	-	-	-
Diablo Fuerte (<i>Prumnopitys armisiana</i>)	0,67	5174	1194	131 (8,4)	355,5 (18,4)	680,5 (44,4)	87,1 (3,1)	231,4 (4,2)	451,9 (14,9)
Dialium (<i>Dialium guianense.</i>)	*	5661	*	165,3 (14,1)	449,4 (39)	865,2 (78)	-	-	-
Estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	0,87	4563	1951	146,5 (10,3)	406,5 (17,7)	772 (37,4)	144,3 (10,7)	384,2 (2,9)	746,3 (8,2)
Palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	0,56	5013	2018	172,3 (7,4)	461,3 (25,3)	872,7 (46,4)	167,6 (2,6)	443,1 (6,6)	845,4 (13,1)
Palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	1,01	5100	1892	177 (7,7)	480,5 (28,4)	938,3 (56)	156,8 (10,9)	418,9 (30,3)	807,7 (58,3)
Palo Azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	0,71	5245	*	161,6 (6,6)	444,5 (12,6)	858,2 (23,2)	-	-	-
Shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	0,93	4824	2166	172,3 (12,8)	467,4 (33,3)	894 (62,6)	157,6 (12,7)	427,8 (26,9)	848,2 (32,4)
Spruce (<i>Picea engelmannii.</i>)	0,39	5874	1694	189,2 (6,3)	513,9 (17,8)	998,4 (29,5)	136,1 (10,2)	350,1 (30,1)	658,5 (62,9)
Ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	0,44	4978	1116	157,9 (6,3)	433,2 (17,1)	840,7 (39,1)	208,1 (5,3)	400,1 (6,7)	654,5 (14,2)

Desviación estándar (DS): entre paréntesis

Tabla 2

Decaimiento logarítmico de la radiación en muestras longitudinales y radial para las frecuencias del 1er, 2do y 3er armónico

Especie	Longitudinal			Radial		
	1er	2do	3er	1er	2do	3er
Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	0,0554 (0,014)	0,0594 (0,013)	0,0591 (0,073)	0,095 (0,024)	0,0960 (0,0291)	0,0977 (0,0176)
Cedro (<i>Cedrela odorata.</i>)	0,0756 (0,017)	0,0578 (0,007)	0,0423 (0,093)	*	*	*
Diablo Fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	0,1154 (0,031)	0,115 (0,030)	0,0523 (0,009)	0,1056 (0,029)	0,0960 (0,0256)	0,0577 (0,157)
Dialium (<i>Dialium guianense.</i>)	0,0206 (0,004)	0,0339 (0,006)	0,0302 (0,0041)	*	*	*
Estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	0,0617 (0,015)	0,0652 (0,008)	0,0384 (0,0035)	0,0637 (0,0164)	0,0524 (0,0164)	0,0547 (0,0154)
Palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	0,0581 (0,017)	0,1030 (0,318)	0,060 (0,0175)	0,1350 (0,0335)	0,0850 (0,0175)	0,0421 (0,0075)
Palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	0,0197 (0,007)	0,0466 (0,0111)	0,0236 (0,007)	0,0728 (0,0161)	0,0674 (0,0161)	0,0486 (0,0066)
Palo Azufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	0,0347 (0,010)	0,052 (0,132)	0,0415 (0,0104)	*	*	*
Shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	0,0460 (0,015)	0,0695 (0,0159)	0,0332 (0,006)	0,0559 (0,0152)	0,0592 (0,0173)	0,0540 (0,0154)
Spruce (<i>Picea engelmannii</i>)	0,0496 (0,016)	0,0474 (0,0118)	0,0318 (0,005)	0,0411 (0,0411)	0,0688 (-)	0,0563 (0,011)
Ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	0,0487 (0,016)	0,0660 (0,0111)	0,0410 (0,0116)	*	*	*

Desviación estándar DS: entre paréntesis.

Pruebas de la interacción del Amortiguamiento a la radiación con la Resistencia acústica

Los valores promedios obtenidos de la relación entre (Ar) y (Ra) de madera en las orientaciones longitudinal y radial se ilustran en la Tabla 3 y la Figura 4.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento en la dirección longitudinal, de la relación Ar vs Ra, que permite diferenciar dos grupos en las maderas, los de mayores valores de Ar que se ubican hacia la parte superior e izquierda y que a su vez encierran a las maderas de bajas

y medias densidades como el Spruce (*Picea engelmannii*, el Ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), el Cedro (*Cedrela odorata*) y la Caoba (*Swietenia macrophylla*); y el grupo de mayores valores de Ra y menores Ar, que se ubican en la parte inferior derecha y representan maderas de altas densidades, y están relacionadas con la reflexión del sonido; se identificó este comportamiento en estoraque (*Myroxylon balsamum*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), palisangre (*Brosimum rubescens*) y dialium (*Dialium guianense*) este último tanto en albura y duramen.

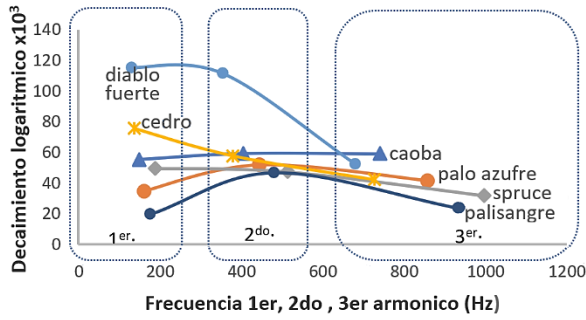


Figura 3. Decaimiento logarítmico (δ) en función de las frecuencias de resonancia longitudinales (Hz) de la especie caoba, diablo fuerte, cedro, palo azufre, palisangre y spruce.

Por otro lado, las especies de densidades bajas tienen menos capacidad de conservar la energía mecánica por lo que son importantes en la emisión de energía, en el estudio se identificó este comportamiento en spruce (*Picea spruceanum*), ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*), cedro (*Cedrela odorata*); y en las densidades medias pueden tener ambas funciones como con el palisandro (*Dalbergia latifolia*), caoba (*Swietenia macrophylla*), diablo fuerte (*Prumnopitys harmisiana*) y palo azufre (*Symphonia globulifera*); lo cual se confirma por lo expuesto por Schelleng (1968) y Yoshikawa (2007) para clasificar las maderas con las mismas propiedades, comparando el factor de Ar de las distintas maderas.

En secciones radiales la relación de (Ar) y (Ra) en la Tabla 3, permiten también diferenciar en las maderas estudiadas dos grupos con tendencias similares mostradas

Tabla 3

Valores de la Amortiguación de la radiación (Ar). y la Resistencia acústica (Ra) en muestras longitudinales (Long.) y radiales; usando unidades de $10^2(\text{cm}^4/\text{g} \cdot \text{s})$ y $10^2(\text{g}/\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ respectivamente

Especie	Amortiguación Radiación (Ar).	Resistencia Acústica (Ra)	Amortiguación Radiación (Ar).	Resistencia Acústica (Ra).
	Long.	Long.	Radial	Radial
Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	9562,3 (507)	3237,3 (150)	2358,6 (86)	757,6 (42)
Cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	11229,0 (531)	2429,0 (87)	*	*
Diablo fuerte (<i>Prumnopitys harmisiana</i>)	8288,0 (396)	2785,2 (116)	2141,2 (45)	665,3 (19)
Dialium (<i>Dialium guianense</i>), (duramen)	5631,2 (272)	5703,9 (100)	*	*
Estoraque (<i>Myroxylon balsamum</i>)	5487,3 (183)	3796,2 (151)	2292,1 (80)	1620,3 (66)
Palisandro (<i>Dalbergia latifolia</i>)	7814,4 (310)	3360,0 (172)	3141,9 (128)	1302,5 (48)
Palisangre (<i>Brosimum rubescens</i>)	5251,8 (256)	4577,3 (247)	1994,5 (108)	1916,5 (83)
Palo szufre (<i>Symphonia globulifera</i>)	8121,6 (439)	3389,0 (158)	*	*
Shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	5460,7 (286)	4650,0 (235)	2299,5 (132)	1914,8 (97)
Spruce (<i>Picea engelmannii</i>) (1ra)	15676,7 (858)	2260,8 (87)	4701,2 (229)	636,3 (32)
Spruce (<i>Picea engelmannii</i>) (4ta)	*	*	3647,6 (155)	429,5 (11)
Ulcumano (<i>Retrophyllum rospigliosii</i>)	11172,1 (544)	2102,0 (102)	2658,0 (139)	464,1 (24)

Desviación estándar DS: entre paréntesis.

para la dirección longitudinal; sin embargo, los valores del Ar son del orden 3 veces menor por lo que energía emitida en la longitudinal.

Estos comportamientos, están relaciones la calidad acústica a través de sus características como, el efecto del tamaño de los anillos de crecimiento, y debido posiblemente a la diferenciación entre zonas de duramen y albura. Esto se puede visualizar en la ubicación de las muestras radiales de Spruce (*Picea spruceanum*), de primera calidad y cuarta calidad (Tabla 3) donde se comprobó que la diferencia entre la primera y cuarta calidad está relacionada fuertemente con el ancho de los anillos de crecimiento encontrados al analizar las muestras.

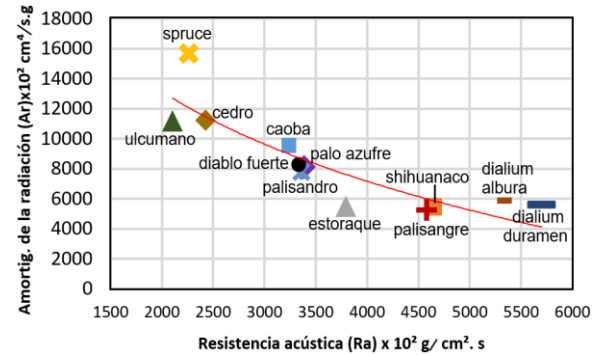


Figura 4. Relación entre la amortiguación de la radiación del sonido ($Ar = v/\rho$) del sonido y la resistencia de la onda acústica ($Ra = \rho v$) en muestras longitudinales (valores promedios).

Pruebas de la interacción del decaimiento logarítmico de la radiación

Relación entre el Paramero de trasmisión ($Pt=v/\delta$) y el Inverso de la Amortiguación de la radiación ($1/Ar = \rho/v$).

De otro lado, de acuerdo con lo propuesto por Yoshioka (2007), que relaciona el Parámetro de trasmisión ($Pt = v/\delta$), y el Inverso de la Amortiguación de la radiación ($1/Ar = \rho/v$) (Figura 5) y usando los valores 2^{do} armónico del decaimiento logarítmico y la madera de caoba como referencia para trazar las dos líneas ortogonales referenciales, que mostrar las zonas de madera de tapa acústica en el lado izquierdo y maderas para el fondo acústico en el lado derecho del gráfico.

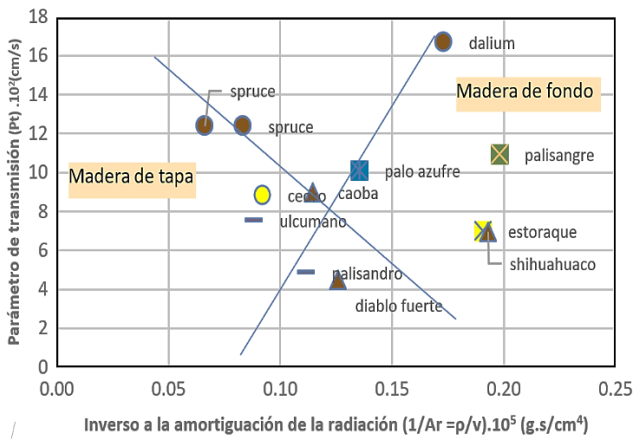


Figura 5. Gráfico entre el Paramero de trasmisión ($Pt=v/\delta$) vs ($1/Ar = \rho/v$); considerando la caoba como la madera de referencia para dividir los cuadrantes de madera de fondo y madera de tapa.

Se muestra claramente las dos maderas spruce y el cedro como maderas de tapa acústica y las maderas de estoraque, shihuahuaco, palo azufre, palisandro y dalium como los más recomendables como madera de fondo acústico; lo que muestra la importancia del uso del factor Pt en la evaluación de maderas acústicas.

Relación entre el factor de Asimétrica del decaimiento logarítmico $Ad = \delta_R/\delta_L$, vs la densidad de las distintas maderas estudiadas

En la Figura 6 se muestra el factor de Asimetría del decaimiento logarítmico ($Ad = \delta_R/\delta_L$), para el tercer y el primer armónico de las maderas estudiadas vs su densidad; se observa claramente el comportamiento del spruce y la caoba que no casi no cambian sus valores, en comparación de las otras maderas que muestran la variación del factor y señalando la posible anisotropía de su estructura interna, y mostrando las buenas cualidades acústicas de las primeras. Esto servirá para evaluar mejor las maderas acústicas para la construcción de instrumentos musicales.

Shirmohammadi et al. (2020), estudiando las cualidades mecánicas y fricción interna de 15 maderas australianas, encontrar cuatro maderas con potencial de uso en la fabricación de diapasones, recomendando efectuar la

evaluación acústica y anatómica de las maderas estudiadas, usando las técnicas no destructivas.

En las Tablas 3 y 4 se muestra el consolidado de los factores que permiten caracterizar las propiedades acústicas de las maderas estudiadas en el segundo armónico para Pt y Ad, sobresaliendo los altos valores de Ar y Ra de las maderas de la caoba y spruce. Maderas de alto valor de Ar y valores bajos de Ra, como spruce, cedro y ulcumano, son buenos emisores de energía. Las maderas como dalium, shihuahuaco y palisangre, con bajos valores de Ar y altos valores de Ar, son buenos emisores de energía (Figura 4). También se muestra con valores medios de Ar y Ra a la caoba, diablo fuerte, palisandro y palo azufre. Por lo que, las cualidades sonoras de los instrumentos pueden ser analizadas por las técnicas acústicas utilizadas en el estudio.

De otro lado, en la dirección radial se muestra un comportamiento similar, sin embargo, los valores de Ar y Ra son mucho menores de ambos parámetros.

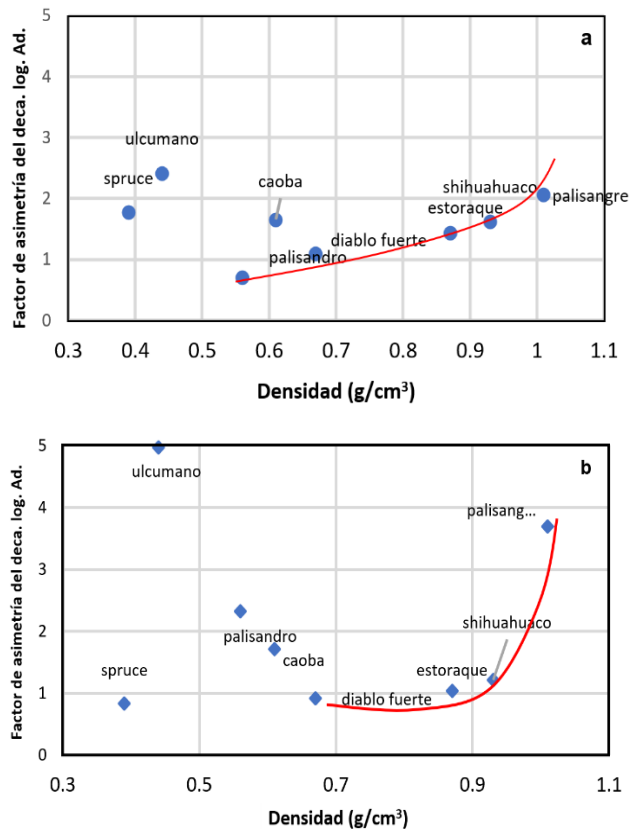


Figura 6. Relación factor Asimetría del decaimiento logarítmico ($Ad = \delta_R / \delta_L$) vs densidad ($\rho=g/cm^3$), para el tercer (a) y primer armónico (b).

En la Tabla 4 se puede ver como los factores estudiados pueden servir para caracterizar las maderas acústicas, lo cual permite decidir, sobre el mejor el uso acústico de las diferentes especies de madera. Lacardi et al. (2022), usando modelos de metamateriales estudian maderas efectuando perforaciones en las tapas y evaluando las modificaciones en las propiedades modales del instru-

mento, proporcionando una nueva forma de probar nuevos materiales acústicos.

Stanciu (2022), evalúa dinámicamente los cambios acústicos de la madera y propone cuatro etapas de fabricación de guitarras y de evaluar los patrones de Chladni a diferentes frecuencias de vibración, indicando que las nuevas técnicas permitirán un avance significativo en la fabricación de instrumentos musicales.

Además, Viala et al. (2020) recomiendan la calificación de la calidad en la adquisición de las maderas, efectuar las pruebas acústicas tanto en la madera como en los instrumentos ya acabados.

Bucur (2023) señala la importancia de las pruebas no destructivas en la evaluación de maderas acústicas, en especial las diferencias acústicas que causan el uso de maderas de diferentes especies al utilizarlo en la fabricación de instrumentos musicales.

Finalmente, Carcagno et al. (2018) en estudio de la influencia del fondo de guitarras con 6 maderas como palo rosa, caoba, sapeli, arce y nogal y otras en un total de 52 guitarras a cuerdas metálicas, indican que la diferencia de las maderas de calidad solo tuvo impacto marginal

al sonido percibido al efectuarse pruebas de evaluación por un panel al ejecutarse los instrumentos, lo que indica la necesidad de seguir haciendo estudios de caracterización acústica de estas maderas.

Tabla 4

Consolidado de las propiedades de las maderas con respecto a los factores estudiados

Madera	Ar	Ra	Pt	Ad
caoba	β	β	β	α
spruce	α	γ	β	α
cedro	β	γ	β	*
palisandro	γ	β	γ	γ
ulcumano	β	γ	γ	*
Palo azufre	γ	β	β	*
Shihuahuaco	γ	α	γ	γ
dalium	γ	α	α	*
estoraque	γ	β	γ	γ
palisangre	γ	α	β	α

A: alto, β : medio y γ : bajo. Representan los valores encontrados de estos factores.

CONCLUSIONES

Las maderas de palisangre (*Brosimum rubescens*), palo azufre (*Symphonia globulifera*), estoraque (*Myroxylon balsamum*), shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), y dialium (*Dialium guianense*) presentan propiedades acústicas con aptitud para la fabricación de fondos y aros de resonancia en cordófonos; en especial las maderas de palisangre y palo azufre, que fueron recomendadas por luthieres.

Los factores como, amortiguación a la radiación (Ar), resistencia acústica (Ra), parámetro de transmisión (Pt) y Asimetría del decaimiento logarítmico radial/ longitudinal (Ad), son buenos indicadores de maderas acústica.

El uso de técnicas acústicas no destructivas, permiten una evaluación óptima de las propiedades acústicas de las maderas, reduciendo los costos y aumentando la rapidez de las mediciones

La divulgación de estas técnicas acústicas no destructivas podría ayudar al desarrollo de la industria de instrumentales en el Perú, y potenciar el uso de maderas tropicales con propiedades acústicas.

Se propone el uso de algoritmos como Machine Learning para utilizar las propiedades acústicas las maderas tradicionales como el spruce, palisandro y caoba comparándolas con las nuevas maderas encontradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bucur, V. (2023). A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, 14(8), 1545.
- Carcagno, S., Backnall, R., Woodhouse, J., Frirz, C., & Plack C. (2018). Effect of back wood choice on the perceived quality of steel-string acoustic guitars. *J. Acoust. Soc. Am.* 144, 3533–3547.
- De la Cruz, R., Carrillo, A., Nájera, J., Cruz, F., Javier, F., & Méndez, J. (2018). Durabilidad natural de siete especies forestales de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.144>
- Fakopp Enterprise Bt- C. (2005). FAKOPP Ultrasonic Timer y Microsecond-timer User's Guide. *Fakopp Enterprise publication. HU*.
- Halachan, P., Babiak, M., Spisiak, D., Chuinsky, A., Tambi, A., & Chauzov, K. (2017). Physic acoustic characteristics of spruce and larche wood. *Wood Research*, 62(2), 235-242.
- Kollmann, F.P. y Côté W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology: *Solid Wood*. München, (v.1, .274 – 285). Alemania, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Lercari, M., Gonzalez, S., Espinoza, C., Longo, G., Antonacci, F., & Sarti, A. (2022). Using mechanical metamaterials in guitar top plates: a numerical study. *Applied Sciences*, 12(17), 8619.
- Mihălcică, M., Stanciu, M., & Vlase, S. (2020). Frequency response evaluation of guitar bodies with different bracing systems. Department of Mechanical Engineering, Transilvania University of Bras, *Symmetry*.
- Mammoliti, A., Cataldo, M., Papandrea, S., & Proto A. (2024). Machnical propierties of Branch and stem wood for two Mediterranean cultivars of olive tree. *Journal of Wood Science*, 70, Art. 40. <https://doi.org/10.1186/s10086-024-02153-1>
- Normas Técnicas Peruanas (NTP). 2004. "Maderas. Método de Determinación de Contenido de Humedad". Norma Técnica Peruana 251.010. 2^{da} edición. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. Lima, Perú. 7p.
- Normas Técnicas Peruanas (NTP). 1980. "Maderas. Método de Determinación de Densidad". Norma Técnica Peruana 251.011. 2^{da} edición. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI. Lima, Perú. 7p.
- Nop P., & Tippner J. (2022) Influencia de las dimensiones de muestras de madera para la determinación de parámetros acústicos y timbre sonoro. *Acústica Aplicada*, 196, 108895.
- Obataya, E., Ono, T., & Morimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science*, 35, 2993-3001. <https://doi.org/10.1023/A:1004782827844>

- Okyav A. (2024). The variation in the acoustic response of the Karadeniz Kemenche depending on the thickness of the soundboard. *Acustic Australia*. <https://doi.org/10.1007/s40857-024-00345-9>
- Quintavalla, M., Gabrielli, F., & Canevari, C. (2022). Grading materials for stringed instruments soundboards: An approach considering the orthotropic elastic and damping properties. *Applied Acoustics*, 187, 108521. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108521>
- Schelleng, J. (1963). The violin as a circuit. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, 326–338.
- Shirmohammadi, M., Faircloth, A., & Redman, A. (2020). Determining acoustic and mechanical properties of Australian native hardwood species for guitar fretboard production. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 1161-1171. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01599-6>
- Sotomayor, J., & Villaseñor, J. (2018). Propiedades materiales e índices de rendimiento acústico de veintidós maderas mexicanas, determinación por ultrasonido. *Madera y Bosque*, 24(3), e2431132 <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431132>
- Stanciu, M. D., Rosca, I. C., Mihălcică, M., & Bucur, V. (2022). Dynamic response of wooden plates in different stages of guitar manufacturing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(4), 997-1013. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01817-3>
- Viala, R., Placet, V., & Cogan, S. (2020). Simultaneous non-destructive identification of multiple elastic and damping properties of spruce tonewood to improve grading. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.004>
- Wong, T., Soong, M., Saifizul, A., & Ramli. (2025). Assessment of quality for Sape making: vibroacoustic analysis and machine learning classification. *Expert Systems with Applications*, 261, 125591. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125591>
- Yoshioka, S. (2007). Acoustical classification of woods for string instruments. *Journal of Acoustic Society of America*, 122(1), 568-573. <https://doi.org/10.1121/1.2743162>