



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
División de Estudios de Posgrado

Análisis de variación en el timbre a partir de la evaluación de los armónicos en 9
guitarras construidas con maderas mexicanas.

Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

Luis José García Mariscal

Director de Tesis

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Morelia, Michoacán. Febrero de 2012

Índice

1. Introducción.....	2
2. Revisión bibliográfica	
2.1. Historia y evolución de la guitarra.....	4
2.2. Laudería en Michoacán.....	7
2.3. Especies utilizadas regularmente para fabricación de guitarras.....	8
2.4. Acondicionamiento de la madera.....	13
2.5. Proceso de fabricación.....	14
2.6. Características de las maderas para instrumentos musicales.....	16
2.7. Funcionamiento de las guitarras.....	17
2.8. Características de las especies estudiadas.....	19
2.9. Métodos para evaluación del timbre.....	21
3. Hipótesis.....	22
4. Objetivos.....	23
5. Metodología	
5.1. Material.....	24
5.2. Equipo.....	28
5.3. Parámetros analizados.....	33
5.4. Análisis.....	33
6. Resultados.....	34
7. Conclusiones.....	38
8. Bibliografía.....	39
Anexo. Descripción anatómica de las especies.....	45
Índice de figuras.....	60
Índice de tablas.....	62

1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material cuya composición y morfología le proporcionan propiedades físicas y mecánicas únicas. Las diferencias en el tamaño, acomodo, forma y función de sus células tienen influencia sobre el comportamiento del material; de ahí que la cantidad de usos que tiene sea tan grande y a pesar de los avances tecnológicos, aún no se han encontrado materiales que puedan sustituirla en algunas de sus aplicaciones. Una de estas aplicaciones es la fabricación de instrumentos musicales, los cuales han estado presentes en la historia de la humanidad desde sus inicios. Debido a que existe una gran cantidad de especies de maderas, con características anatómicas tan variadas, hay maderas que sirven para diferentes instrumentos. El conocimiento en la elaboración de instrumentos musicales ha sido generado por sus fabricantes desde hace muchos años y pasado de generación en generación. Sin embargo, como señalan Di Bella y col. (S.F.) “las propiedades físicas y mecánicas de la madera no son evaluadas, a pesar de que afectan profundamente la respuesta de frecuencia de las cajas de resonancia. Incluso la densidad, propiedad que se determina fácilmente, no se considera ni siquiera para medir el contenido de humedad”.

Recientemente, con el desarrollo de nuevas tecnologías, se han realizado estudios para determinar las propiedades acústicas de maderas utilizadas en instrumentos musicales. Bucur (1995) señala que “una buena selección de la madera puede auxiliar para fabricar instrumentos de buena calidad de sonido”. Estudios como el de Guridi y García (1997), Quintanar y col. (1998) y Pérez y col. (2002) se enfocan en la descripción anatómica de maderas utilizadas por lauderos y relacionan esas características con la sonoridad de la madera. Otras investigaciones (Bucur 1995, De Oliveira 2006, Obataya 1999) han aprovechado los Métodos No Destructivos (NDT por sus siglas en inglés) que utilizan la velocidad del sonido para determinar las propiedades mecánicas y elásticas de la madera. A partir de la velocidad del sonido en la madera se calculan los módulos de elasticidad, que junto con la densidad del material, son los parámetros que más afectan la eficiencia acústica de un material.

Los métodos que los lauderos utilizan para evaluar la madera son principalmente empíricos y de cierta forma subjetivos, pues se basan en su oído y su criterio para escoger el material más adecuado. Estas técnicas, que han aprendido a dominar por medio de la práctica, les han dado buenos resultados a través de los años.

Los sonidos están formados por varias ondas simultáneas que escuchamos como una sola. Cada una de estas ondas es llamada armónico. De la cantidad de armónicos que contenga un sonido y la intensidad de cada uno de ellos depende el timbre, el cual es una de las cuatro propiedades del sonido (las otras son la altura, la duración y la intensidad)..

El timbre de un instrumento musical es difícil de cuantificar debido a que se trata de un parámetro multidimensional. Las apreciaciones que comúnmente se hacen son siempre subjetivas, vagas o referidas a otros instrumentos.

En este trabajo se buscará evaluar de manera objetiva, cuantificando parámetros que permitirán realizar una comparación clara y numérica entre guitarras en cuya fabricación se emplearon diferentes maderas mexicanas, y contrastarlas con guitarras de maderas importadas, las cuales son señaladas como las de más alta calidad. La base principal de esta tesis es el proyecto de Abel García de construir 12 guitarras con maderas mexicanas para demostrar que la calidad sonora de las especies mexicanas es tan alta como la de las especies importadas.

2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se presenta lo que se ha reportado en otros trabajos respecto a especies utilizadas para guitarras y otros instrumentos, las características que deben tener las maderas para instrumentos, el proceso de fabricación, la historia y evolución de la guitarra y la laudería en Michoacán,

2.1. Historia y Evolución de la guitarra

Bonds (2002) señala que las primeras guitarras posiblemente aparecieron en España en el siglo XVI. Esos instrumentos constaban de cuatro pares de cuerda (cursos) y eran más pequeños que una guitarra actual. El instrumento fue extendiéndose al resto de Europa al tiempo que evolucionaba. Al inicio del siglo XVII la guitarra de cinco cursos reemplazó a la de cuatro, la cual presentaba limitaciones musicales. En este periodo surgieron lauderos como Mateo Sellas, Belchior Díaz, Jacobo Chechucci y otros. Incluso el legendario fabricante de violines Antonio Stradivari construyó algunas guitarras (Figs. 2.1 y 2.2)



Fig. 2.1. Guitarra construida por Antonio Stradivari en 1700. Tomado de Kuronen (2000)



Fig. 2.2. Parte posterior de la palma y detalle de la roseta de guitarra fabricada por Stradivari. Tomado de Kuronen (2000).

De acuerdo con Kuronen (2000), hacia principios de 1770, lauderos franceses e italianos comenzaron a fabricar guitarras con seis cuerdas sencillas. Los lauderos españoles de esa época optaron por hacer guitarras con seis pares de cuerdas; posteriormente los redujeron a cuerdas sencillas. Uno de los lauderos italianos más importantes de la época fue Gennaro Fabricatore. En las Figs. 2.3 y 2.4 se muestra una de sus guitarras.



Fig. 2.3. Parte posterior de guitarra hecha por Fabricatore.
Tomado de Kuronen (2000)



Fig. 2.4. Guitarra construida por Fabricatore aproximadamente en 1805. Tomado de Kuronen (2000)

Antonio de Torres consolidó el diseño actual de la guitarra clásica aproximadamente en 1850. Sus aportaciones incluyen cajas más grandes y profundas que las de sus predecesores, diapasón más ancho, escala más larga, de 65 cm, que hoy en día es el estándar (Fig. 2.5). Además realizó modificaciones a la configuración de los abanicos en la tapa, lo que dio como resultado instrumentos de mejor sonido (Fig. 2.6).



Fig. 2.5. Guitarra fabricada por Antonio de Torres. Tomado de Kuronen (2000)

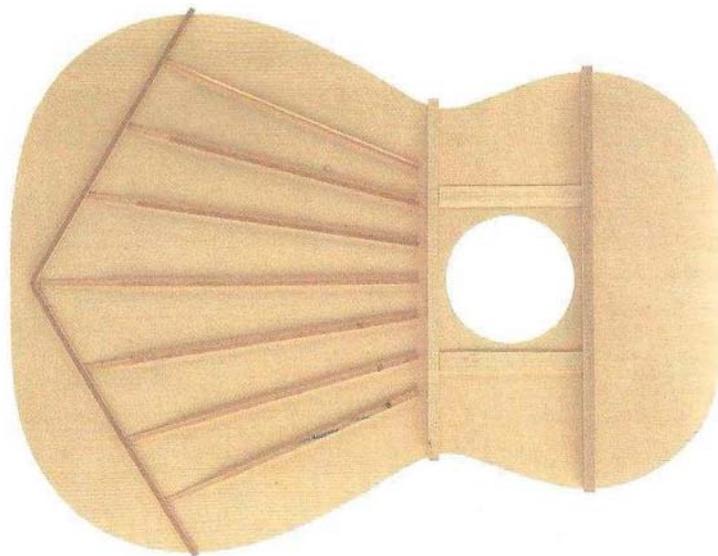


Fig. 2.6. Parte interna de la tapa de guitarra de una réplica del modelo de Antonio de Torres. Tomado de Bonds (2002)

2.2. Laudería en Michoacán

En su trabajo, Hernández (2003) relata la evolución de los instrumentos musicales que se han fabricado en Michoacán desde hace años. Los instrumentos de cuerda llegaron a México con los conquistadores españoles. En Paracho y en zonas como la cuenca del río Tepalcatepec, los indígenas comenzaron a construir instrumentos musicales a base de observación, en ocasiones sin apearse a los criterios establecidos, dando lugar a instrumentos híbridos. La laudería comenzó en el Siglo XVI con instrumentos antecesores de la guitarra como el sirincho, guitarra túa y guitarra séptima. En la zona de Tierra Caliente se adoptó sobre todo la tradición europea de la violería. Un dato importante de esta obra es que las barras de refuerzo o abanicos (uanokuas en Purépecha) en las tapas de los instrumentos aparecieron hasta después de 1750 o 1770. A partir de 1940 comenzó la época de laudería moderna en Paracho con la llegada de maderas importadas, productos químicos industriales, herramienta y maquinaria. Actualmente se cuentan más de 270 talleres en esa población.

2.3. Especies utilizadas regularmente para la fabricación de guitarras

Se presenta a continuación (Fig.2.7) un diagrama que indica las diferentes partes de la guitarra:

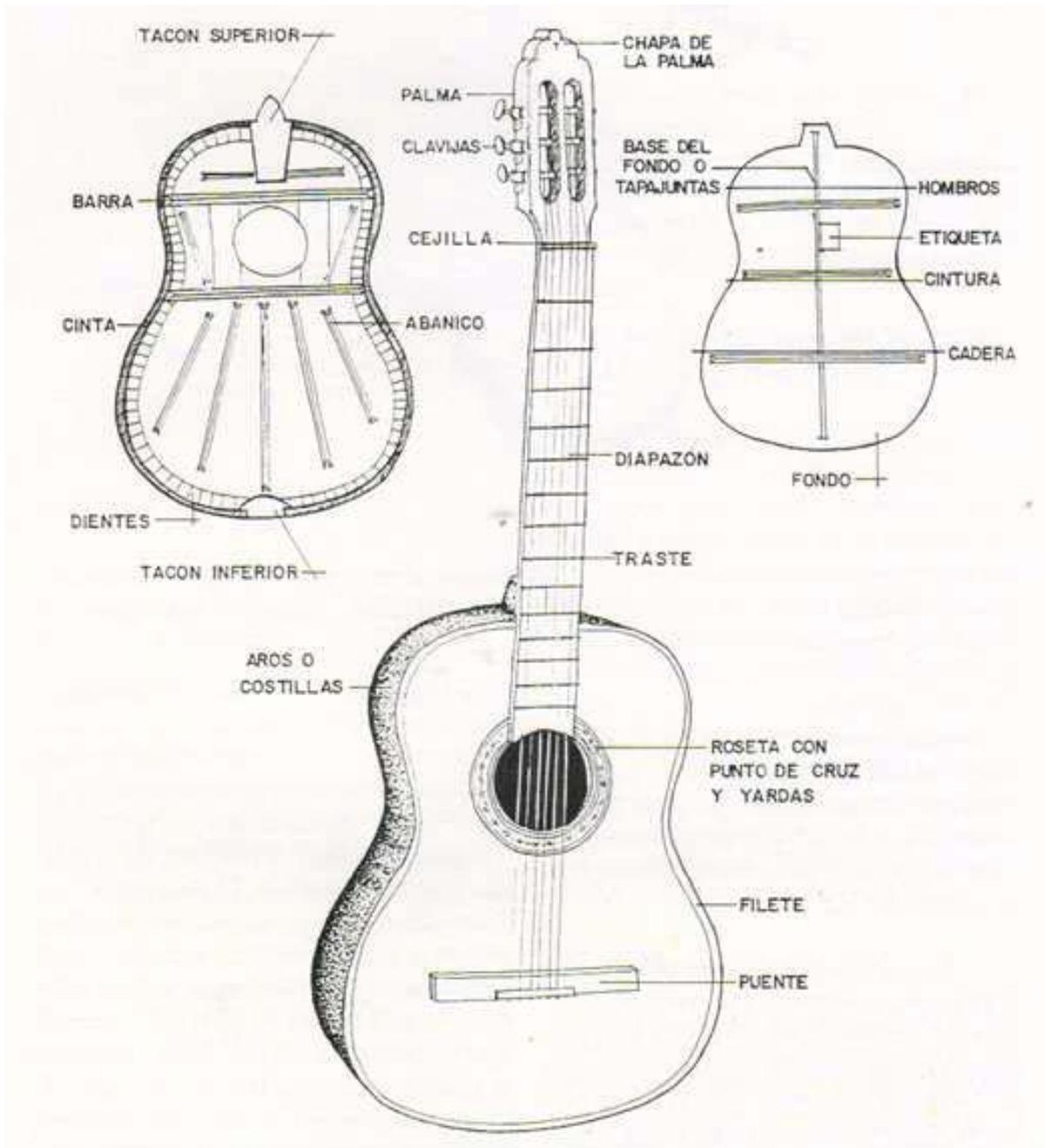


Fig. 2.7. Partes de la guitarra. Tomado de Guridi y García (1997).

Yoshikawa (2007) clasifica a la madera utilizada para la fabricación del cuerpo de instrumentos de cuerda en dos grupos con características físicas y acústicas diferentes: madera para la tapa (soundboard) y madera para el marco (frameboard) el cual consiste en el fondo y las costillas. Por lo general, para la tapa se utiliza madera ligera, de coníferas, mientras que la madera pesada de las latifoliadas, funciona mejor para fondo y aros.

Bucur (1995) señala que las principales especies utilizadas para guitarra son: picea (*Picea sp.*), cedro rojo canadiense (*Tsuga heterophylla*) y cedro del oeste (*Thuja plicata*) para tapas. Para el fondo y las costillas señala que la madera considerada como la mejor es el palosanto de Brasil (*Dalbergia nigra*), pero los fabricantes de guitarras utilizan una gran variedad de latifoliadas de alta densidad.

French y Handy (2006) señalan que el rango de maderas que se pueden usar para guitarras es mayor que para violines, sin embargo, la tradición estableció desde mediados del S. XIX que se utilicen piceas para la tapa y palosanto para fondos y aros.

Pérez y col. (2002) realizaron un estudio anatómico sobre algunas de las maderas que se utilizan en Paracho para fabricar guitarras. Consultaron a artesanos de la región para obtener información sobre la función de las distintas partes de la guitarra y las especies de madera que se utilizan en cada una. Señalan como partes de la guitarra con función acústica el fondo, la tapa y las costillas. Como parte de su trabajo, recopilaron una tabla con las maderas más utilizadas y su procedencia (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Maderas utilizadas en guitarras. Con datos de Pérez y col. (2002).

PARTES	MADERA		País de origen
	Nombre científico	Nombre común	
Tapas y barras de refuerzo (barras armónicas)	<i>Picea sitchensis</i>	Abeto, spruce sitka	Canadá, E.U., Europa
	<i>Thuja plicata</i>	Cedro rojo del oeste	E.U.
	<i>Pinus spp.</i>	Pinos	México
	<i>Tilia mexicana</i>	Cirimo	México
Fondo, costillas y barras de refuerzo	<i>Acer saccharum</i>	Maple, ojo de pájaro	Canadá, E.U.
	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro rojo	Belice, Honduras, México
	<i>Cordia eleagnoides</i>	Cueramo	México
	<i>Dalbergia paloescrito</i>	Palo escrito	México
	<i>Dalbergia latifolia</i>	Palo santo, palisandro	India
	<i>Dalbergia nigra</i>	Palo de rosa	Brasil
	<i>Juglans nigra</i>	Nogal, Walnut	Belice, Honduras, E.U.
	<i>Persea americana</i>	Aguacate	México
	<i>Pinus spp.</i>	Pinos	México
	<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba, mahogany	Belice, Honduras, México
Cabeza, brazo y tacón	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro rojo	Belice, Honduras, México
	<i>Juglans nigra</i>	Nogal, Walnut	Belice, Honduras, México
	<i>Pinus spp.</i>	Pinos	México
	<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba	Belice, Honduras, México
Alma (brazo)	<i>Diospyros ebenum</i>	Ébano, ebony	India
	<i>Platymiscium yucatanum</i>	Granadillo	México
Diapasón y puente	<i>Diospyros ebenum</i>	Ébano, ebony	India
	<i>Platymiscium yucatanum</i>	Granadillo	México
	<i>Quercus spp.</i>	Encinos	México

Guridi y García (1997) realizaron un estudio sobre las maderas que se utilizan en Paracho para fabricar artesanalmente diferentes tipos de instrumentos de cuerda. Sus resultados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Maderas utilizadas en los diferentes tipos de guitarras. Con datos de Guridi y García (1997).

Parte	Tipo de guitarra		
	Clásica o de concierto	De estudio	Popular
Tapa	Spruce alemán (<i>Picea abies</i>), Pino canadiense (<i>Picea sitchensis</i>), Cedro rojo del Pacífico (<i>Thuja plicata</i>), Ciprés español (<i>Cupressus sempervirens</i>), Secuoya (<i>Sequoia sempervirens</i>)	Pino canadiense, Cedro blanco (<i>Cupressus lindley</i>), Cirimo (<i>Tilia mexicana</i>), Álamo (<i>Populus deltoides</i>)	Pino (<i>Pinus spp.</i>), Cirimo
Fondo y costillas	Rosa de la India (<i>Dalbergia latifolia</i>), rosa de Brasil (<i>Dalbergia nigra</i>), Maple moteado o sicomoro (<i>Acer pseudoplatanus</i>), Maple ojo de pájaro (<i>Acer saccharum</i>), encino australiano (<i>Cardwellia sublimis</i>)	Palo escrito (<i>Dalbergia paloescrito</i>), Cedro rojo (<i>Cedrela odorata</i>), Cedro blanco, Nogal (<i>Juglans peryformis</i>), Mora (<i>Morus sp.</i>), Magnolia (<i>Magnolia schiedeana</i>), Guardalagua (<i>Cornus disciflora</i>), Caoba, Bálsamo (<i>Myroxylon balsamum</i>), Jacaranda (<i>Jacaranda acutifolia</i>), Rosa morada (<i>Tabebuia rosea</i>), Primavera (<i>Tabebuia chrysantha</i>), Campincerán	Aguacate (<i>Persea americana</i>), caobilla, cirimo, pino, encino blanco (<i>Quercus sp.</i>)
Tacón, brazo y palma	Cedro rojo, caoba	Cedro rojo, caoba	Pino
Alma	Zangalicua (<i>Dalbergia granadillo</i>), bálsamo, palo fierro (<i>Olneya tesota</i>)	Granadillo, bálsamo, palo fierro	
Diapasón y puente	Ébano y granadillo	Rosa morada, Campincerán	Encino
Barras del abanico	Cedro rojo y caoba	Caoba, caobilla (<i>Swietenia humilis</i>)	Pino

Diversas especies han sido utilizadas en mayor o menor medida para la fabricación de diversos instrumentos musicales en Paracho desde hace varios años, como señalan Guridi y García (1997). En la tabla 2.3 se muestra en qué instrumentos se han usado las especies analizadas en el presente trabajo:

Tabla 2.3. Usos que se le han dado a distintas maderas en fabricación artesanal de instrumentos de cuerda en Paracho. Con datos de Guridi y García (1997).

Especie	Uso
Cedro blanco (<i>Cupressus lindleyi</i>)	Tapas, fondo y aros de violines y violas comerciales. Aros y chapa de la palma de guitarras de estudio.
Haya (<i>Fagus mexicana</i>)	Fondo, aros, diapasón y puente de guitarras de estudio.
Mora (<i>Morus sp.</i>)	Fondo, aros y chapa de la palma de guitarras de estudio.
Mamey (<i>Pouteria sapota</i>)	Arcos de violines y violas finos y comerciales. Diapasón de guitarras de estudio.
Paloescrito (<i>Dalbergia paloescrito</i>)	Clavijas, diapasón y botón de violines y violas comerciales. Diapasón de contrabajo. Fondo, aros y chapa de la palma de guitarras de estudio y clásica.
Granadillo o zangalicua (<i>Dalbergia granadillo</i>)	Clavijas, tiracuerda y botón de violines y violas comerciales. Fondo, aros, chapa de la palma y alma del brazo de guitarras de estudio y clásica.
Campincerán (<i>Dalbergia congestiflora</i>)	Fondo, aros, chapa de la palma, diapasón y puente de guitarras de estudio y clásica.
Bálsamo (<i>Myroxylon balsamum</i>)	Clavijas, diapasón, tiracuerdas y botón de violines y violas comerciales. Alma del brazo de guitarras de estudio y clásica. Fondo, aros, chapa de la palma, diapasón y puente de guitarras de estudio.
Cueramo (<i>Cordia eleagnoides</i>)	Puente de guitarra de estudio.
Siricote (<i>Cordia dodecandra</i>)	Fondo y aros en una réplica de guitarra antigua construida por Abel García.

Guridi y García (1997) encontraron que en Paracho en total se utilizan 52 especies de la cuales 13 son importadas, 39 nacionales y tres introducidas. Los artesanos del lugar sustituyeron empíricamente el palosanto de Brasil y de India por otras maderas del género *Dalbergia*, como el paloescrito y el granadillo. Las guitarras de mejor nivel se construyen con maderas importadas,

2.4. Acondicionamiento de la madera

Bucur (1992) indicó que la madera para instrumentos musicales debe ser sometida a largos periodos de secado natural de máximo cien años, pues pasado ese lapso el material se vuelve frágil y sus propiedades mecánicas y acústicas disminuyen. Reportó (1995) que los fabricantes de violines le dan la mayor importancia a que la madera esté seca y bien acondicionada, para lo cual dejan expuestas las piezas al aire durante varios años antes de usarlas. Se recomiendan distintos periodos de tiempo, desde 3 hasta 100 años, siendo el rango de 3 a 10 años el necesario para que la madera alcance la estabilidad dimensional. Para instrumentos producidos en serie se han desarrollado métodos de secado en estufa a temperaturas de entre 20 y 40°C por periodos de 3 a 4 meses.

En conversaciones con García (2011) describió el proceso que sigue para acondicionar el material. Indicó que mucha de la madera con que cuenta la heredó de su padre; algunas piezas han estado en acondicionamiento durante 50 años y otras alrededor de 80 en una bodega, luego la lleva hasta su taller donde permanece guardada entre 13 y 20 años en condiciones de humedad de 40 - 50% y temperatura de 13-20° C; finalmente la coloca en una vitrina cuya humedad es menor del 40%. Ahí permanece al menos tres años antes de comenzar a trabajarla.

El término de *curado* o *estacionado* utilizado por lauderos de Paracho se refiere al tiempo que se almacena la madera sin humedad y en condiciones estables. Este proceso es muy importante para lograr un buen sonido. García (2011) supone que lo que ocurre al interior de las células es que los restos de extractivos se cristalizan provocando que a la madera se le dificulte más moverse, además de que los cambios de temperatura y humedad dejan de afectar. Indicó que el tiempo adecuado de *curado* es mínimo diez años y el óptimo es de 50. Asegura que según algunos lauderos, el tiempo máximo que debe curarse es de entre 100 y 120 años, porque después comienza un proceso de fosilización. Sin embargo, señaló que hay violines de más de 200 años con un sonido excelente y son de los más buscados.

2.5. Proceso de fabricación

Varios autores como Horcin y Gubriansky, 2005; Jansson, 2002; Fletcher, 1999; Wright, 1996; McIntyre y Woodhouse, 1978, etc. mencionan que los fabricantes de instrumentos musicales tienen métodos empíricos para evaluar la calidad de una madera. Uno de esos métodos es golpear la tablilla de madera con los dedos para escuchar el sonido que producen. Las alturas, niveles y caídas de las vibraciones de resonancia reflejan las propiedades de la pieza de madera y pueden guiar al fabricante hacia un resultado específico. Este proceso es fundamental para determinar la distribución del grosor en la tapa y el fondo. El método es muy sensible y se llegan a notar diferencias como resultado de rebajar 0.1mm de madera a unos cuantos centímetros cuadrados de una placa de 3mm de grosor. Este tipo de pruebas no es usado por todos los lauderos. García (2011) indicó que él no lo utiliza porque cuando lo probó no obtuvo buenos resultados.

En la fig. 2.8 se presenta un diagrama del proceso de fabricación de una guitarra clásica, descrito en conferencia por García (2010).

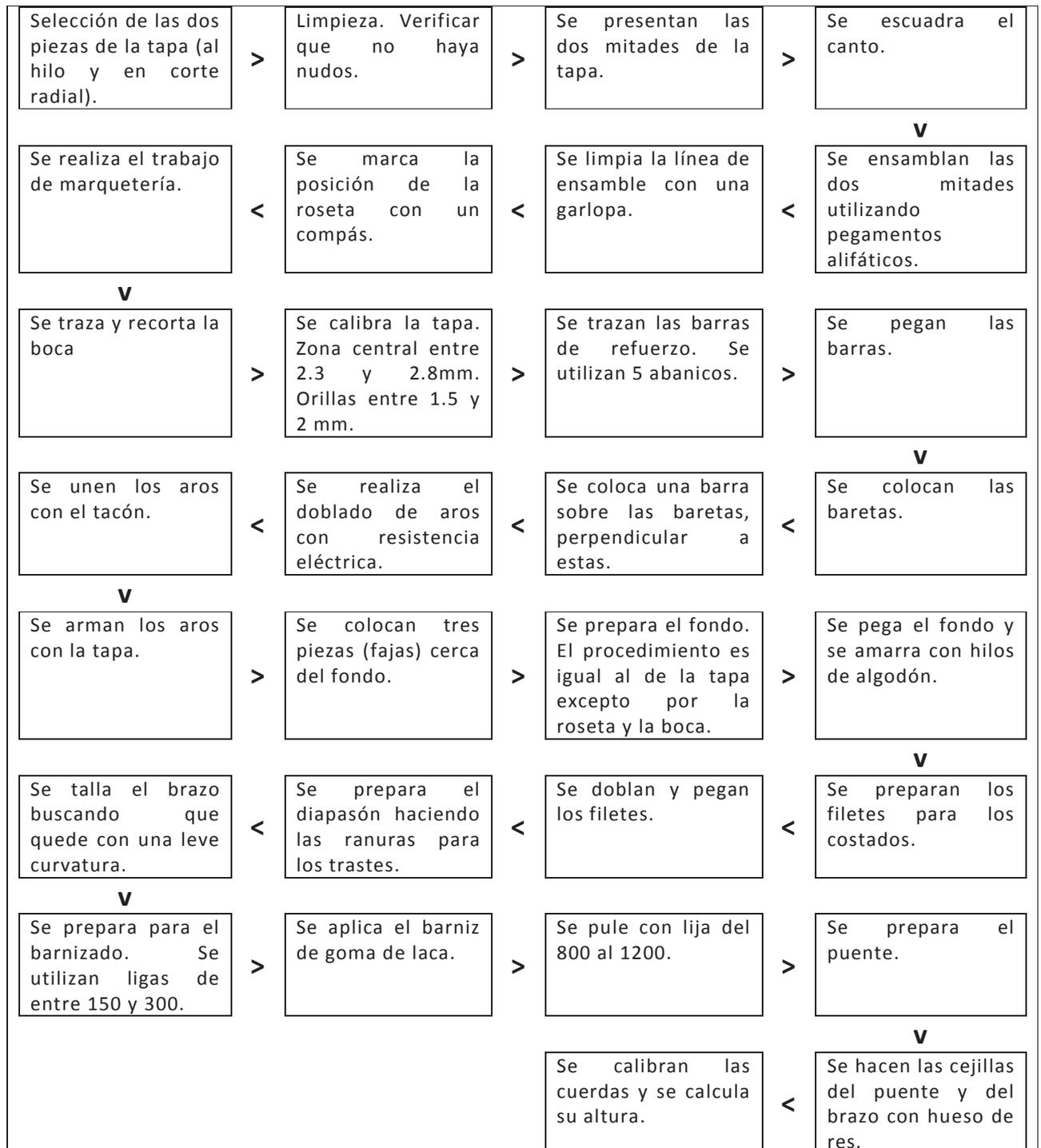


Fig. 2.8. Proceso de fabricación de una guitarra clásica, según lo describió García (2010).

2.6. Características de la madera para instrumentos musicales

Pérez y col. (2002) describieron el proceso de fabricación de guitarras haciendo hincapié en que la madera debe estar seca y libre de defectos para evitar deformaciones posteriores o alteración del sonido. Señalaron que para mejor propagación del sonido y mejor resistencia a las contracciones, las piezas que formarán tapa, fondo, costillas y diapasón se cortan en sentido radial. La tapa y el fondo están formadas por dos piezas cada una y al unir las se debe procurar que los dibujos queden simétricos. Si la madera tiene veteado llamativo, las partes destinadas al fondo pueden estar en sentido tangencial.

De acuerdo con Bucur (1995), algunos criterios que siguen los lauderos son: hilo recto, textura fina, ausencia de defectos, densidad y particularmente el espaciamiento entre anillos de crecimiento, el cual determina para qué instrumento se utilizará la madera. Violines y violas se construyen con madera que tenga anillos de 1mm, para guitarras se necesita que tenga 2mm de espaciamiento, para violoncelos 3mm y para contrabajos 5mm. Debido a la diferencia en el tamaño y forma de las tapas y tensión de las cuerdas, los requerimientos de la madera para guitarras son menos estrictos que para violines.

French (2008) señaló que los anillos de crecimiento juntos significan que el árbol tuvo un crecimiento lento debido a inviernos largos y temperaturas bajas. Para que un árbol así produzca madera de un tamaño suficiente para instrumentos debe ser muy viejo, de al menos 200 años.

De acuerdo con Schwarze y col. (2008), la madera usada para instrumentos musicales es tratada con selladores, barnices y/o minerales con lo que se hace más rígida y resistente. Estos tratamientos refuerzan la adhesión entre capas celulares pero al mismo tiempo incrementan la densidad debido a que los lúmenes se obstruyen con las sustancias, lo que reduce la velocidad del sonido.

El incremento de la densidad tiene un efecto adverso en la radiación del sonido disminuyendo la radiación del sonido y sus frecuencias de resonancia.

Según indican French y Handy (2006), la madera utilizada para instrumentos musicales debe ser cortada ser estrictamente radial y al hilo, esto último significa que viendo la placa por el canto se distingue la fibra paralela a la superficie, no inclinada. Indicaron que según autores como Romanillos, si la tapa no está bien en sentido radial y al hilo, no se podrán aprovechar sus características como la resistencia, por lo que el laudero deberá compensar aumentando el espesor en la tapa y eso modificará la forma de vibración. Las tablas que se obtienen aserradas de manera tradicional tienen el hilo curvado y a medida que la madera envejece, el hilo tiende a enderezarse y la tabla se enchueca. Además, las propiedades mecánicas de la madera varían al cambiar el ángulo del hilo a lo largo de la tabla. La madera de corte radial tiene el hilo derecho y vertical, son más estables y sus propiedades mecánicas más uniformes.

García (2011) concuerda en que la madera para las tapas debe ser rígida en el sentido longitudinal y flexible en el transversal debido al movimiento al que será sometida. La veta debe ser recta y el hilo cerrado. El corte debe ser estrictamente radial para poder aprovechar características como la resistencia; de lo contrario el laudero deberá compensar aumentando el espesor de la pieza y eso modificará la forma de vibración.

2.7. Funcionamiento de las guitarras

Giancoli (1997) explica que las guitarras, al igual que otros instrumentos de cuerda, necesitan una caja de resonancia cuya función es la de amplificar el sonido que producen las cuerdas, las cuales son muy delgadas y no pueden comprimir el aire lo necesario como para que se produzca el sonido. Al vibrar la cuerda transmite energía al puente y éste a la caja, lo que hace vibrar a esta última y debido a que tiene un área mucho mayor en contacto con el aire, produce una onda sonora mayor.

Según Pedgley y col. (2009) la función de la caja sonora es actuar como un diafragma o resorte acústico, amplificando la vibración de las cuerdas por medio del desplazamiento de aire. Para que el fondo y la tapa puedan funcionar como resorte deben estar construidas como placas delgadas de entre 2 y 3 mm de grosor y contar con un medio para que el aire salga, que comúnmente es un orificio circular (boca).

Autores como Fletcher (1999) y Curtu y col. (2009) han reportado que el cuerpo de la guitarra debe ser lo suficientemente fuerte para resistir la tensión de las cuerdas, la cual normalmente es de 1000 N, pero al mismo tiempo debe ser ligero para que pueda ser sometido a una gran amplitud de vibración. Esto se cumple reforzando la tapa con tiras de madera interna (el abanico) que además de sirven para manipular la distribución de resonancias.

Wright (1996) asegura que la tapa de la guitarra es la parte que más influye en la calidad sonora del instrumento debido a que la amplitud de la vibración es mayor que la del fondo y las costillas, por lo que en estas partes se utiliza mayor variedad de maderas que para la tapa.

Como señala Serway (1992), la frecuencia a la que vibra una cuerda está en función de su longitud, su densidad y la tensión. Esta frecuencia puede ser variada al cambiar la tensión por medio de las clavijas. Al aumentar la tensión se incrementa la frecuencia y esto se conoce como afinar. Una vez que la guitarra está afinada, el ejecutante puede variar la frecuencia de la cuerda cambiando la longitud de la parte vibrante de la cuerda cambiando la ubicación de sus dedos a lo largo del diapasón. Al acortar la longitud se aumenta la frecuencia de vibración.

2.8. Características de las especies estudiadas

Las especies comparadas en el presente trabajo ya han sido caracterizadas en mayor o menor medida aunque no se pudieron obtener las propiedades mecánicas y acústicas para todas ellas, lo cual habría enriquecido la evaluación.

Se encontraron descripciones anatómicas de las especies en trabajos de los siguientes autores: Kribs (1968), Huerta (1978), Pérez Olvera y col. (1980), Corral (1985), Rzedowski y Guridi (1988), Barajas Morales (1989) y Arellano (2011). Las tablas con las descripciones se encuentran en el Anexo A.

Hernández Maldonado (2010) presentó un modelo de predicción con el que estimó las características elásticas de 490 maderas a partir de su densidad. Entre las especies estudiadas se encuentran siete de las analizadas en el presente trabajo. Los datos se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características elásticas de la madera. Con datos de Hernández Maldonado (2010)

Especie	ρ (g/cm ³)	E _R (MPa)	E _T (MPa)	E _L (MPa)
<i>Cordia dodecandra</i>	0.796	2145	1232	17807
<i>Cordia eleagnoides</i>	1.1	2965	1703	24607
<i>Cupressus lindleyi</i>	0.419	919	578	11754
<i>Dalbergia congestiflora</i>	0.83	2237	1285	18567
<i>Dalbergia granadillo</i>	1.07	2884	1656	23936
<i>Dalbergia paloescrito</i>	0.525	1415	813	11744
<i>Pouteria sapota</i>	0.81	2183	1254	18120

Sotomayor (2005 y 2008) presentó características mecánicas como módulo de elasticidad, resistencia al límite elástico, resistencia a la ruptura y dureza Janka tanto a la flexión como compresión para 150 especies mexicanas entre las cuales aparecen *Cordia dodecandra* y *Cordia eleagnoides*.

Sotomayor y col. (2010) presentaron una base de datos con las propiedades acústicas de maderas mexicanas. Calcularon velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Se reportan datos para tres especies del presente trabajo, los cuales aparecen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características acústicas de maderas. Con datos de Sotomayor y col. (2010)

Especie	ρ (g/cm ³)	V _R (m/s)	V _T (m/s)	V _L (m/s)	E _R MPa	E _T MPa	E _L MPa
<i>Cupressus lindleyi</i>	0.419	5120	1628	4554	12289	1242	9723
<i>Cordia dodecandra</i>	0.796	3940	2186	4264	13818	4254	16184
<i>Dalbergia paloescrito</i>	0.525	1955	1814	4623	2243	2243	12546

2.9. Metodología para evaluación del timbre

Loureiro y col. (2004) indicaron que a diferencia de la altura y la intensidad del sonido, las cuales son escalas unidimensionales y fácilmente distinguibles, la medición del timbre representa un problema debido a que su naturaleza es multidimensional. El timbre se percibe gracias a la interacción de una variedad de propiedades estáticas y dinámicas del sonido.

Benade y Messenger (1982) analizaron los componentes armónicos del sonido de una cítara para calcular la inharmonicidad producida por sus cuerdas.

No se encontró una metodología similar a la que se propone en este trabajo para evaluar el timbre de un instrumento musical. Se tomaron partes de distintos trabajos, como de Petersen (2004) que señala que en un sonido el poder se concentra en los primeros 10 a 20 armónicos. Carral y Paset (2008) refieren un método propuesto por Pollard y Jansson para describir el timbre a partir de las amplitudes de los armónicos. El método, llamado triple estímulo, compara la amplitud de la nota fundamental con la amplitud de los armónicos 2, 3 y 4 y con la amplitud del quinto armónico en adelante.

3. Hipótesis

Las hipótesis de trabajo para la presente investigación son:

- El timbre de un instrumento musical puede describirse en función de las amplitudes relativas de los armónicos que produce.
- Al analizar la composición de los armónicos pueden obtenerse datos cuantificables y particulares para cada sonido.
- Es factible realizar una comparación objetiva entre dos o más instrumentos musicales partiendo de la información emanada de los armónicos.

4. Objetivos

Los objetivos de la tesis son:

General

Analizar y evaluar las propiedades sonoras del timbre en nueve guitarras en cuya construcción se utilizaron maderas mexicanas, comparando las diferencias en el sonido y buscando la influencia que ejercen las características anatómicas y físicas en el mismo.

Particulares

- Obtener un respaldo de audio digital de los sonidos producidos por nueve guitarras.
- Analizar y comparar los sonidos a partir de su composición armónica.
- Contrastar la información que arroje el análisis del sonido con las características de cada madera.

5. METODOLOGIA

El presente capítulo tiene por objetivo describir el material experimental y equipo utilizado, así como el procedimiento que se siguió para obtener de manera digital los sonidos y la forma en que fueron analizados.

5.1. Material

El material experimental consistió en nueve¹ guitarras hechas por el Maestro Abel García quien utilizó distintas maderas mexicanas para los fondos y las costillas. Cuatro de esas guitarras tienen tapa de abeto (*Picea abies*) y las otras cinco de cedro rojo canadiense (*Thuja plicata*). Todas las guitarras tienen el mismo diseño, el cual es una adaptación de una plantilla usada en 1927 por Hermann Hauser; la diferencia principal es la escala, pues mientras una guitarra clásica tiene 65 cm del puente a la cejilla, las guitarras de García miden 64.5 cm. Las guitarras se presentan en las Figs. 5.1 a 5.11.

De acuerdo con la madera de su tapa, las guitarras utilizadas pueden ser agrupadas de la siguiente manera:

Tabla 5.1. Tipo de madera utilizada en fondo y aros. Guitarras con tapa de *Picea abies*.

Nombre común	Nombre científico
Cedro blanco	<i>Cupressus lindley</i>
Mamey	<i>Pouteria sapota</i>
Paloescrito	<i>Dalbergia paloescrito</i>
Siricote	<i>Cordia dodecandra</i>

Tabla 5.2. Tipo de madera utilizada en fondo y aros. Guitarras con tapa de *Thuja plicata*.

Nombre común	Nombre científico
Bálsamo	<i>Myroxylon balsamum</i>
Campincerán	<i>Dalbergia congestiflora</i>
Cueramo	<i>Cordia eleagnoides</i>
Haya	<i>Fagus mexicana</i>
Granadillo o zangalicua	<i>Dalbergia granadillo</i>

¹ Se realizaron mediciones a 12 guitarras con maderas mexicanas, pero tres fueron excluidas debido a que no había certeza sobre la especie que se utilizó para su construcción.



Fig. 5.1. Guitarra de cedro blanco



Fig. 5.2. Guitarra de paloescrito



Fig. 5.3. Guitarra de mamey



Fig. 5.4. Guitarra de siricote



Fig. 5.5 Guitarra de bálsamo



Fig. 5.6. Guitarra de cueramo



Fig. 5.7. Guitarra de campincerán



Fig. 5.8. Guitarra de haya



Fig. 5.9. Guitarra de granadillo



Fig. 5.10. Palosanto de Brasil



Fig. 5.11. Palosanto de la India

Como referencia se utilizaron dos guitarras con tapa de *Picea abies*: una con aros y fondo de palosanto de Brasil (*Dalbergia nigra*) y otra con aros y fondo de palosanto de India (*Dalbergia latifolia*). Estas maderas son consideradas por lauderos y guitarristas como las de mejor calidad y han sido utilizadas en fondos, aros y chapa de la palma de guitarras clásicas.

La tapa de la guitarra es la parte que más influye en el sonido del instrumento. Las características sonoras del abeto y del cedro rojo canadiense son conocidas por los lauderos, y el uso de una u otra especie en una guitarra se determina pensando en el sonido que se desea obtener. Según García, el sonido de las guitarras con tapa de abeto es “transparente, cristalino y brillante”, mientras que los instrumentos con tapa de cedro canadiense tienen un “sonido más potente, cálido y nasal”.

5.2. Equipo

Para grabar digitalmente el sonido se utilizó un micrófono de tipo condensador, marca Behringer© modelo ECM 8000, conectado a una interfaz M-Audio© modelo Mobile Pre USB y una computadora portátil con el software Sonar 6 Producer Edition de Cakewalk©.

El procedimiento fue como sigue:

Cada guitarra fue afinada justo antes de la prueba utilizando un afinador electrónico.

El micrófono fue colocado a 20 cm de la boca de la guitarra (Fig. 5.12). Las cuerdas se pulsaron a 14 cm del puente utilizando la uña del dedo índice. Se comenzó en la sexta cuerda al aire, avanzando de manera cromática hasta el traste 12. Lo mismo se repitió en las demás cuerdas. Cada nota se pulsó y se dejó sonar un segundo, después se silenciaba la guitarra con la mano derecha y se repetía dos veces más en la misma nota antes de pasar a la siguiente. Se obtuvieron así tres “corridas” para cada nota.



Fig. 5.12. Posición del micrófono respecto a la guitarra.

Se procuró que cada nota fuera pulsada con la misma intensidad y que la distancia del puente al punto donde se tocaba no variara.

Los sonidos fueron grabados digitalmente por medio del software Sonar 6 de Cakewalk y guardados para su posterior análisis.

De las tres “corridas” se seleccionó para el análisis la nota que no presentara ruidos externos ni saturación. Cada nota fue examinada de manera individual por medio del analizador de frecuencia del software antes mencionado, el cual presenta gráficamente las diferentes frecuencias (en Hertz, Hz) que componen un sonido (eje horizontal) y la intensidad (en decibeles, dB) de cada una de ellas (eje vertical) en forma de picos (Fig. 5.13). El primero de esos picos corresponde a la frecuencia fundamental f , la cual le da el nombre a la nota. Los picos subsecuentes aparecen en frecuencias que son múltiplos enteros de f .

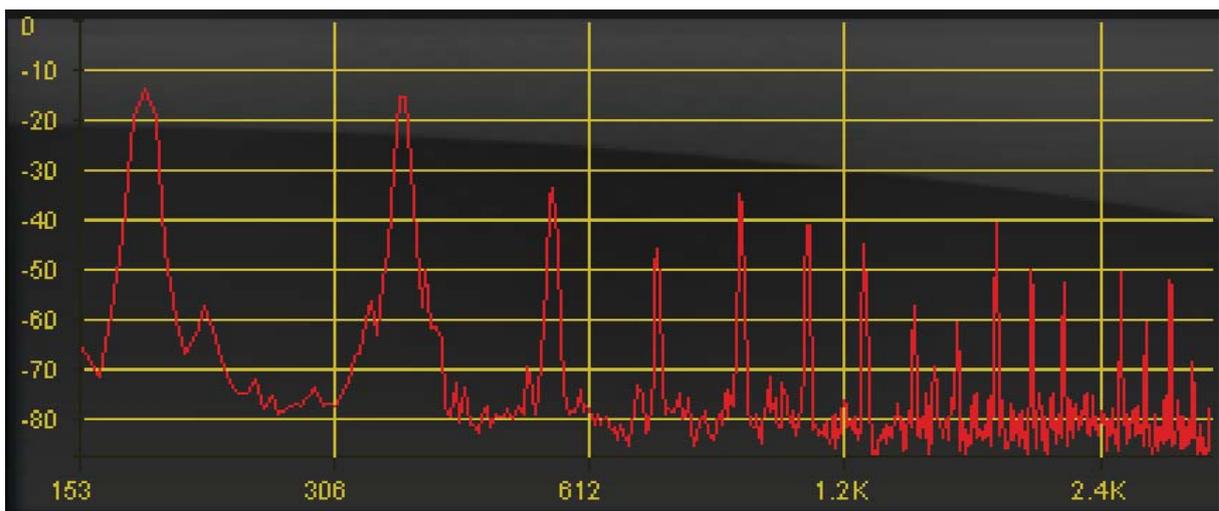


Fig. 5.13. Gráfica que presenta el analizador de frecuencia. El eje horizontal indica la frecuencia (en Hertz) de los componentes (o armónicos) de una nota, mientras que el eje vertical (en dB) indica la amplitud o intensidad de cada una de esas frecuencias.

La relación entre la frecuencia principal y las restantes, llamados armónicos, y sus respectivas intensidades, conforman una “huella” característica para cada sonido, la cual puede ayudar a diferenciar sonidos a pesar de que tengan la misma altura e intensidad. En las Figs. 5.14 y 5.15 se muestran las gráficas para

la misma nota (La, frecuencia de 220 Hz) en dos guitarras diferentes. Nótese la diferente proporción en los picos de las frecuencias.

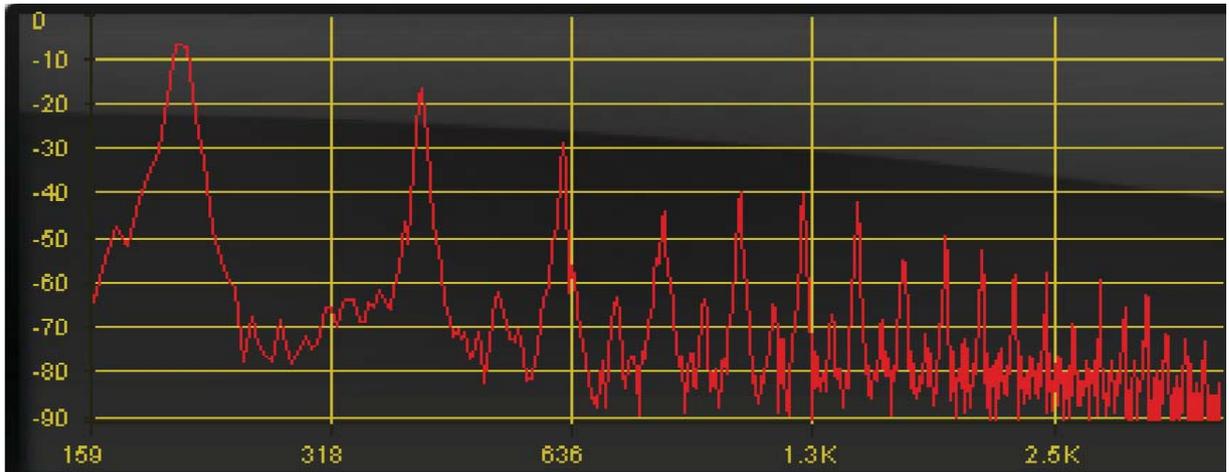


Fig. 5.14. Nivel de los armónicos de la nota La a 220 Hz. Guitarra de paloescrito.

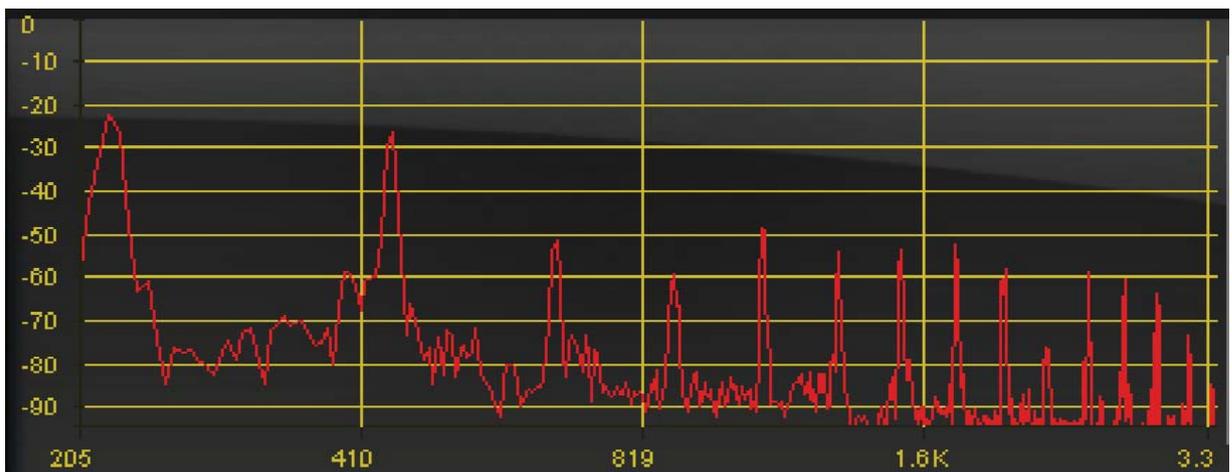


Fig. 5.15. Nivel de los armónicos de la nota La a 220 Hz. Guitarra de mamey.

Debido a que en los sonidos el poder se concentra en los primeros 10 a 20 armónicos, se tomaron en cuenta para el análisis a partir del armónico 1 (la nota fundamental, f) y hasta el 16 (la misma nota pero cuatro octavas más alta, $16f$). Por definición, los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental f , por lo cual se representaron como $2f, 3f, 4f, \dots, 16f$. El analizador de frecuencias tiene como valor máximo de intensidad 0 dB, razón por la cual todas las intensidades se expresan como números negativos.

Se midió la intensidad en dB (la altura del pico en la gráfica) tanto de la nota fundamental como de cada armónico hasta el 16°. Los datos se procesaron en una hoja de cálculo.

Durante la grabación se percibió que algunas notas tenían una intensidad muy amplia (volumen alto) y llegaban a saturar el canal de grabación y provocar distorsión, mientras que otras, pulsadas de la misma forma y utilizando más o menos la misma fuerza, apenas eran audibles. Por esta razón el volumen de entrada de la interfaz fue ajustado a medida que era necesario. Para eliminar el efecto que pudieran tener los cambios de volumen en el sonido grabado, y debido a que el objetivo es analizar la relación de la fundamental f con los armónicos, todas las notas se normalizaron respecto a f , obteniéndose así: $f/f, f/2f, f/3f, \dots, f/16f$ para cada nota. Se agruparon los datos

5.3. Parámetros analizados

Los tres parámetros que se evaluaron fueron: equilibrio horizontal, equilibrio vertical y densidad de armónicos, todos ellos relacionados con el timbre y de acuerdo a como aparecen en García (2010). Están definidos como:

- Equilibrio horizontal: la cantidad de armónicos graves que genera un sonido. Para este parámetro se consideró el promedio de los armónicos 2, 3 y 4.
- Equilibrio vertical: la cantidad de armónicos agudos que contiene una nota. Para este parámetro se promedió a los armónicos 5 al 16.
- Densidad de armónicos²: la cantidad de armónicos perceptibles que enriquecen a una fundamental. Para este valor se promediaron todos los armónicos (2 al 16).

5.4. Análisis

Las guitarras utilizadas fueron clasificadas en dos grupos: por un lado las que tienen tapa de *Picea abies* y por otro las que tienen tapa de *Thuja plicata*. Se ha mencionado antes que la tapa es la parte de la guitarra que más influye en la calidad del sonido, y que el timbre que se produce con cada una de estas especies es distintivo.

Los instrumentos del grupo con tapa de *Picea abies* fueron comparados con dos guitarras de referencia: una con fondo y aros de palosanto de Brasil (*Dalbergia nigra*) y otra con fondo y aros de palosanto de India (*Dalbergia latifolia*). Lamentablemente no se contó con una guitarra de referencia para el grupo de las de *Thuja plicata*. En este caso se optó por comparar a las guitarras del grupo entre ellas.

² En la obra citada este parámetro aparece como "Densidad". Aquí se cambia el nombre a "Densidad de armónicos" para evitar confusiones con la propiedad física.

6. Resultados

El equilibrio horizontal, definido como la cantidad de armónicos graves que acompañan a un sonido, se estimó promediando las intensidades de los armónicos 2, 3 y 4, normalizados respecto a la fundamental, de todos los sonidos evaluados (78 notas). De acuerdo con Jansson, los sonidos que tienen armónicos graves demasiado fuertes pueden producir tonos a los que califica como “huecos, aburridos con ataque indefinido”, lo que se traduce como disminución en la claridad y definición. Los armónicos agudos dan claridad a los tonos, especialmente en el ataque, pero pueden “adelgazar” el sonido, sobre todo si los armónicos graves son débiles. En las Figs. 6.1 y 6.2 se muestran gráficamente los niveles obtenidos por cada guitarra. Debido a que las intensidades con que se realizó el cálculo estaban normalizadas, los niveles se presentan como un parámetro adimensional.

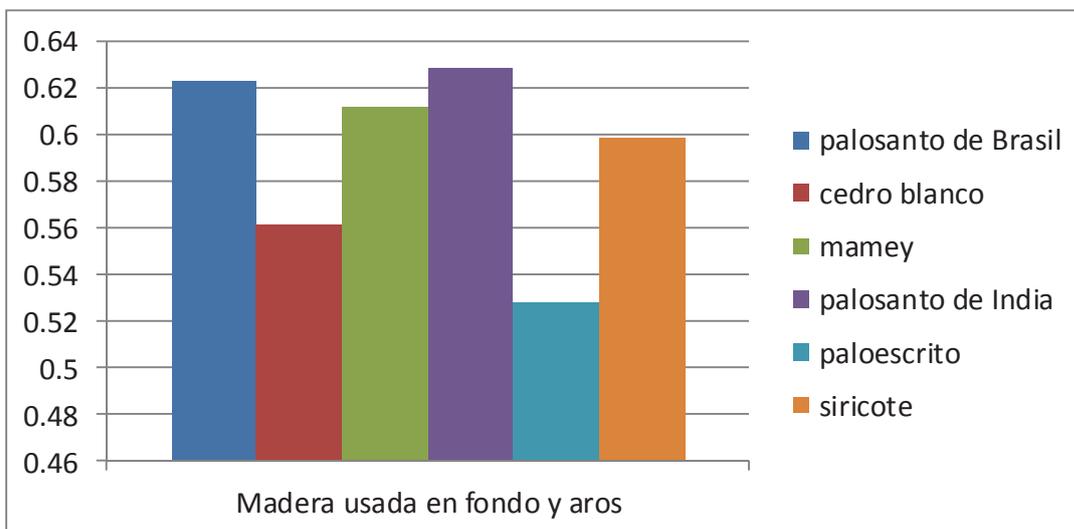


Fig. 6.1 Equilibrio horizontal. Guitarras con tapa de *Picea abies*.

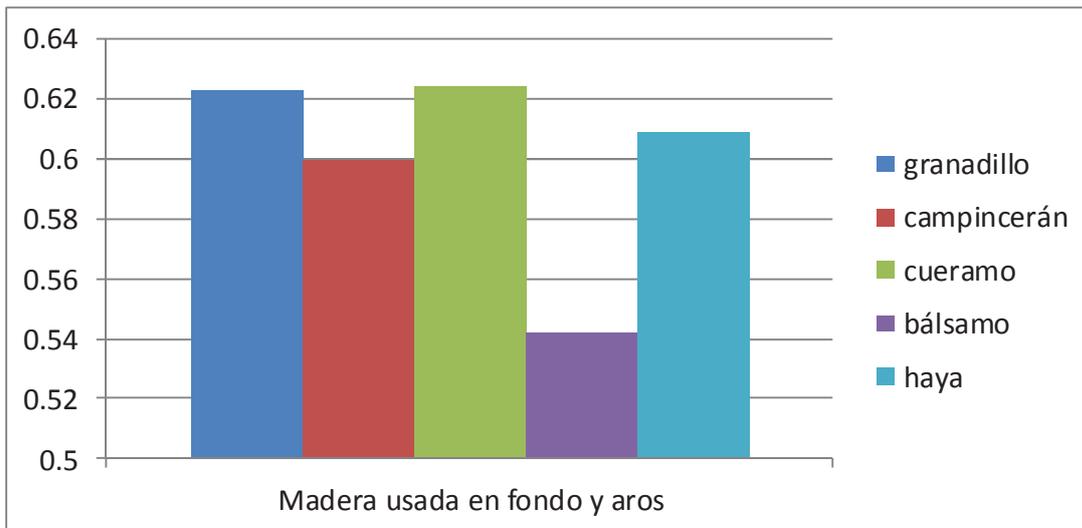


Fig. 6.2 Equilibrio horizontal. Guitarras con tapa de *Thuja plicata*.

Por equilibrio vertical entendemos la cantidad de armónicos agudos que se perciben en un sonido. Para este parámetro se promediaron los valores de los armónicos 5 al 16, también normalizados con la fundamental. En las Fig. 6.3 y 6.4 se presentan los resultados de los valores promediados.

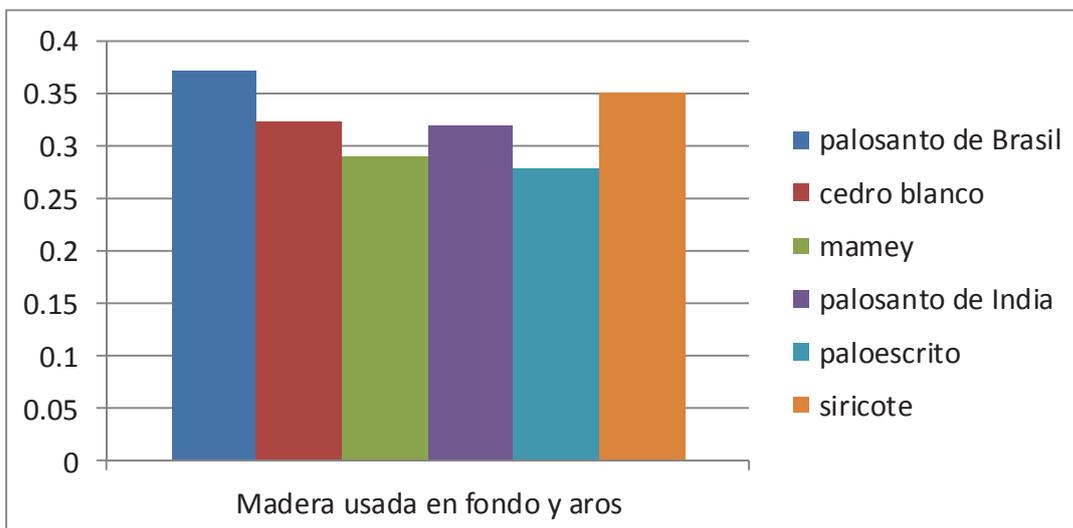


Fig. 6.3 Equilibrio vertical. Guitarras con tapa de *Picea abies*.

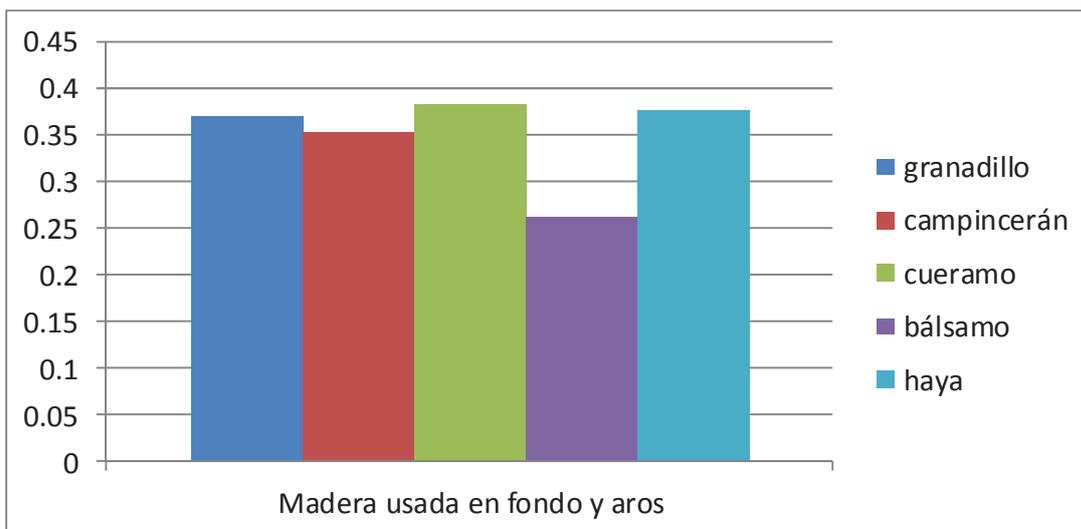


Fig. 6.4 Equilibrio vertical. Guitarras con tapa de *Thuja plicata*

La densidad de armónicos es definida por García (2010) como la cantidad de armónicos perceptibles que enriquecen a la fundamental. Este parámetro consiste en la suma de todos los armónicos normalizados (2 al 16). Las gráficas correspondientes se presentan en las Figs. 6.5 y 6.6.

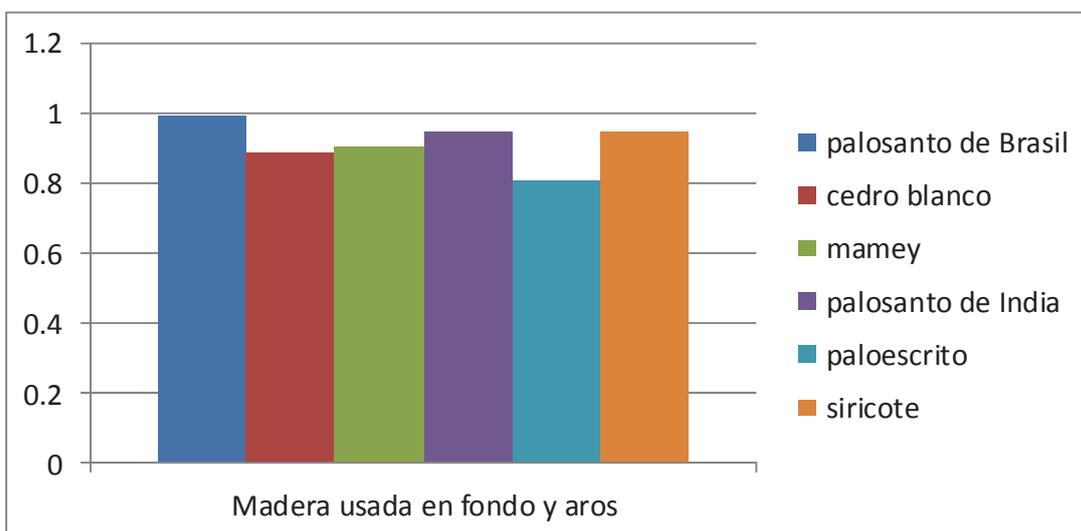


Fig. 6.5 Densidad de armónicos. Guitarras con tapa de *Picea abies*.

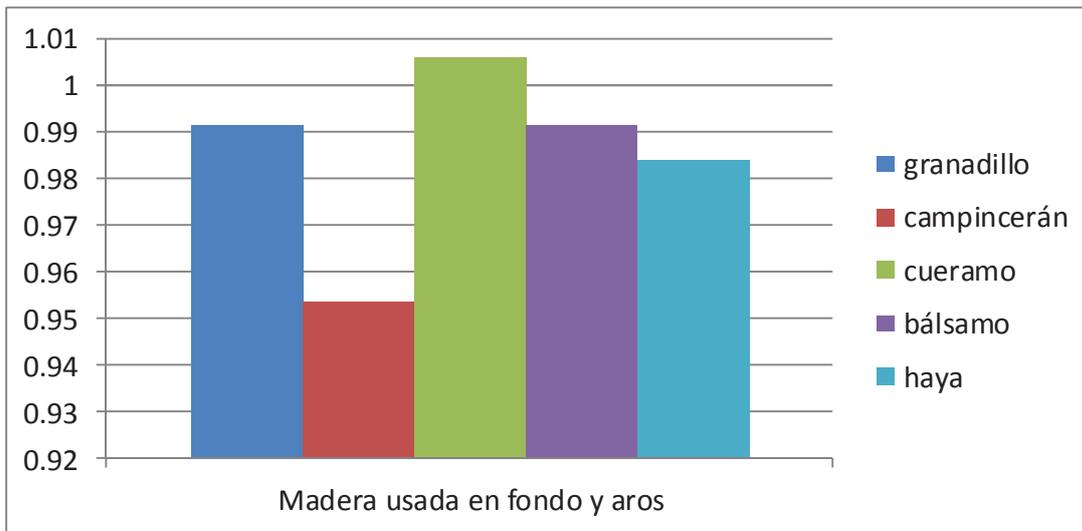


Fig. 6.6 Densidad de armónicos. Guitarra con tapa de *Thuja plicata*.

7. Conclusiones

Cada guitarra posee un sonido particular. Hay algunas cuyo timbre se asemeja al de otra pero hay casos en que fácilmente puede apreciarse diferencia entre dos instrumentos. En las tablas puede apreciarse una diferencia para los distintos parámetros evaluados, aunque en algunos casos esta parezca mínima.

La calidad del sonido de todas las guitarras es excelente, y aunque la evaluación no tiene por objetivo determinar si una guitarra suena “bien” o “mal”, puede darnos una idea de qué tan aproximado es el timbre de cierto instrumento con respecto a otro de referencia, o indicarnos si en su sonido predominan los armónicos agudos o los graves para tener una leve idea de cómo sonará un instrumento aún antes de haberlo escuchado. En estos casos no podría calificarse un timbre como bueno o malo, ya que este parámetro es subjetivo y depende del gusto de cada quien; habrá quien piense que las guitarras con maderas importadas son insuperables, pero también puede haber alguien que prefiera el sonido que proporciona una de las maderas mexicanas

La metodología aquí utilizada sirve primero para tener cierta comprensión en la forma en que se suena un instrumento al utilizar una madera determinada, y eso podría ayudar al diseño de instrumentos con un sonido particular.

Uno de los objetivos de este trabajo era comparar el sonido de guitarras con maderas mexicanas con el de guitarras de maderas importadas, las cuales son más costosas y difíciles de conseguir; la especie *Dalbergia nigra* se encuentra protegida por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES por sus siglas en inglés) y su comercialización está prohibida.

Algunas especies mexicanas comienzan ya a ser apreciadas en el extranjero debido a su calidad, pero eso trae como inconveniente el encarecimiento de esas maderas para los lauderos locales.

8. BIBLIOGRAFÍA

Arellano, S. (2011) *Estudio anatómico de la madera de « Haya » (Fagus mexicana Mart.)*. Reporte de laboratorio de Anatomía de la madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Barajas Morales, J. y León, C. (1989) *Anatomía de maderas de México : especies de una selva baja caducifolia*. Instituto de Biología. Departamento de Botánica. Une AM. México.

Benade, A.H. y Messenger, W.G. (1982) *Sitar spectrum properties*. Journal of the Acoustical Society of America.

Bonds, R. (editor) (2002) *The illustrated directory of guitars*, Chartwell Books.

Brill, A. y Beeson, D. (2007) *The acoustical properties of wood*. University of Illinois.

Brancheriau, L., Baillères, H., Détienne, P., Kronland, R. y Metzger, B. (2006) *Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis*. Ann. Forest Sciences 63.

Bucur, V . (1992) *Le bois de lutherie*. Journal de Physique IV Colloque C1, supplment au Journal de Physique 111

_____ (1995). *Acoustics of wood*. Boca Raton: CRC Press

Bucur, V. Clément, A. Bitsch, M. y Houssement, C. (1999) *Acoustic properties of resonant wood and distribution of inorganic components on the cell wall*. Holz als Roh 57. Springer-Verlag.

- Bucur, V. y Declercq, N. (2006) *The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique* Ultrasonics 44.
- Carral, S. y Paset, M. (2008) *The influence of plectrum thickness on the radiated sound of the guitar*. Acoustics 2008, Paris.
- Corral, M. (1985) *Características anatómicas de la madera de once especies tropicales*. Boletín Técnico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Crocker, M. (editor). (1998) *Handbook of acoustics*. Wiley-Interscience Publication.
- Curtu, I., Stanciu, M., Cretu, N. y Rosca, C. (2009) *Modal Analysis of different types of classical guitar bodies*. 10th WSEAS International Conference on Acoustics & Music: Theory & Applications, Praga, República Checa.
- De Oliveira, F. y Sales, A. (2006) *Relationship between density and ultrasonic velocity in brazilian tropical Woods*. Bioresource Technology 97 2443–2446
- Di Bella, A. Piasentini, F. y Zecchin, R. (S.F.) *On violin top wood qualification: the influence of growth ring distance on the acoustical properties of red spruce*. Dipartimento di Fisica Tecnica, University of Padua, Italy
- Feeney, B. y Chivers, R. (2001) *Macroscopic considerations of ultrasonic propagation of wood – attenuation*. Molecular and quantum acoustics, col 22.
- Fletcher, N. (1999) *The nonlinear physics of musical instruments*. Research School of Physical sciences and Engineering. Australian National University.

- French, M. (2008) *Response variation in a group of acoustic guitars*. Sound and Vibration. www.SandV.com
- French, M. y Handy, R. (2006) *Sustainability and life cycle Management in guitar production*. Proc. of the IJME – Intertech Conference.
- García, A. (2010). *Proceso de fabricación de la guitarra clásica*. Conferencia impartida en la FITECMA, UMSNH.
- García, A. (2010b) *Doce guitarras, caudal sonoro de maderas mexicanas*. Programa de estímulo a la creación y desarrollo artístico de Michoacán. México.
- Gerhards, C. C. (1982). *Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art*. Forest Products Journal
- Giancoli, D. (1997) *Física. Principios con aplicaciones*. Prentice Hall Hispanoamérica. Cuarta Edición.
- Guridi, L. y García, A.(1997). *Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho, Michoacán, México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
- Hansen, H. (2006) *Acoustic studies on Wood*. Tesis. University of Canterbury. New Zealand School of Forestry.
- Hernández, V. (2003) *Historia de la laudería y los instrumentos musicales de la cuenca del río Tepalcatepec*. Tesis. Facultad de Historia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Hernández Maldonado, S. (2010) *Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones*. Tesis. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Horcin, P. y Gubriansky, V. (2005) *Properties of wood in musical instruments making*. Forum Acousticum, Budapest.
- Huerta, J. (1978) *Anatomía de la madera de 12 especies de coníferas mexicanas*. Boletín Técnico. Dirección General de Investigación y Capacitación forestales. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Jansson, E. (2002) *Acoustics for violin and guitar makers*. Dept. of speech, music and hearing. Kungl Tekniska Högskolan. Estocolmo, Suecia.
- Kribs, D. (1968) *Commercial foreign woods on the American market*. Dover Publications, Inc. E.U.
- Kuronen, D. (2000) *Dangerous curves. The art of the guitar*. MFA Publications. Boston, E.U.
- Loureiro, M., De Paula, B. y Yehia, H. (2004) *Timbre classification of a single musical instrument*. Center for Research on speech, acoustics, language and music. Federal University of Minas Gerais. Brasil.
- McIntyre, M., Woodhouse, J., (1978) *The acoustics of stringed musical instruments*. Interdisciplinary science reviews, Vol. 3, No. 2.
- Pedgley, O., Norman, E. y Armstrong, R. (2009) *Materials-inspired innovation for acoustic guitar design*. METU JFA 1.
- Pérez, C., Carmona, T. y Rogel, M. (1980) *Estudio anatómico de la madera de 43 especies tropicales*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México.

- Pérez, C. Serrano, A. Vélez, S. y Rochin, B. (2002) *La madera de las guitarras de Paracho, Michoacán*. Departamento de Biología. UAM-I.
- Petersen, M. (2004) *Musical analysis and synthesis in Matlab*. The College Mathematics Journal.
- Quintanar, A. de Icaza, M. Rivera, L. y Pérez, C. (1998) *Algunas características anatómicas y acústicas de tres especies de angiospermas de Huayacocotla, Ver.* Madera y Bosques 4 (1).
- Rzedowski, J. y Guridi, L. (1988) *El palo escrito, árbol de madera preciosa – una nueva especie mexicana de Dalbergia*. Acta Botánica Mexicana. Instituto de Ecología, A.C. México.
- Schelleng, J. C. (1982) *Wood for violins*. Catgut Acoust. Soc. Newsletter
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2005) *Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas*. Investigación e Ingeniería de la Madera. Publicación del Laboratorio de Mecánica de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2008) *TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas*.formato: 60 x 90 y 30 x 60 cm. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Sotomayor, J., Guridi, L. y García, T. (2010) *Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos.* Investigación e Ingeniería de la Madera. Publicación del Laboratorio de Mecánica de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Wright, H. (1996) *The acoustics and psychoacoustics of the guitar.* Tesis. University of Wales. Department of physics and astronomy.

Yoshikawa, S. (2007) *Acoustical classification of woods for string instruments.* Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 122.

Anexo. Descripción anatómica de las especies

Cedro blanco (*Cupressus Lindley*). Con datos de Huerta (1978)

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Amarillo pajizo en la albura. Amarillo con tonos rosados en duramen.	Sí presenta olor y sabor característicos		Suave	Fina	Recto	Anillos de crecimiento no están bien delimitados.

Características microscópicas					
Transición	Madera temprana		Madera tardía		Longitud
	Diámetro promedio	Pared $6\mu\text{m}$ de grosor	Diámetro promedio	Pared $8\mu\text{m}$ de grosor	
Irregular	$31.68\mu\text{m}$ (18- $58\mu\text{m}$)		$28.88\mu\text{m}$, (18 - $55\mu\text{m}$)		$2786.25\mu\text{m}$, (1011 - $3049\mu\text{m}$)

Parénquima					
Axial	Longitud		Radial		Otros
	Tipo y serie		Alto	Ancho	
Apotraqueal difuso, poco visible	Homogéneos. Uniseriados, raramente biseriados	$22.88\mu\text{m}$ ($13\mu\text{m}$ - $43\mu\text{m}$)	$127.37\mu\text{m}$ ($27\mu\text{m}$ - $355\mu\text{m}$)	$21.03\mu\text{m}$ ($18\mu\text{m}$ - $33\mu\text{m}$)	8.54 rayos por mm lineal (5 – 12),

Haya (*Fagus mexicana*). Con datos de Arellano (2011).

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
castaño naranja a café claro con vetas ligeramente grisáceas	Olor tenue y característico. Sabor suave, ligeramente astringente	Medio	El veteado en la cara radial es de suave a pronunciado y en la tangencial es suave	Textura media a gruesa	Hilo recto a ligeramente ondulado	

Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Difusa	Predominan solitarios. Múltiples radiales de 2 y 3. Múltiples tangenciales de 2. Diagonal de 2.	Abundantes pero poco notorios	78.83 μm (52.5 μm – 102.5 μm)	1178.67 μm (808 μm – 2171.5 μm).	areoladas, pequeñas, con acomodo alterno y opuesto	platina es muy inclinada y perforación escaleriforme de 20 – 35 barras.

Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
apotraqueal difuso y difuso agregado. Paratraqueal vasicéntrico y unilateral	escasos uniseriados de 1 – 26 células de alto, poliseriados abundantes. múltiples agregados	Homogéneos y heterogéneos	6.64 por mm lineal (4 – 10)	2320 μm (970 - 5050 μm)	103.88 μm (57.5 μm – 157.5)	4 - 7

Características microscópicas del Bálsamo (*Myroxylon balsamum*) cont.

Características microscópicas del Haya (*Fagus mexicana*) cont.

Fibras				
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros
Fibrotraqueidas	1844.5 μm (1000 μm - 2600 μm)	41.93 μm (30 μm - 60 μm)	Gruesa	lumen ocupa entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ del diámetro total

Bálsamo (*Myroxylon balsamum*). Con datos de Corral, 1985.

Características macroscópicas

Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Amarillo pálido en albura, duramen castaño rojizo con tonos claros y oscuros	Olor ligero. No tiene sabor	Medio	Pronunciado	Fina	Recto a entrecruzado	Dura y pesada

Características microscópicas

Vasos						
Porosidad	Poros		Diámetro	Longitud	Elementos vasculares	
	Disposición	Cantidad			Puntuaciones	Placa
Difusa	solitarios, múltiples radiales de 2 a 6, oblicuos de 2 y agrupados de 3 a 5	16 por mm^2 (10 - 25)	107 μm (57 μm - 144 μm)	296 μm (231 - 400 μm).	areoladas alternas	.

Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
Vasicéntrico, aliforme y aliforme confluente	Escasos uniseriados, mayoría biseriados y triseriados	Heterogéneos III estratificados	Numerosos, 10 por mm (7 – 12)	271µm (150µm - 540µm)	30µm (10µm - 50µm)	2 (1 – 3)

Fibras				
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros
Libriformes	1067µm (750µm - 1545µm)	14µm (8µm - 20µm)	5µm (3µm - 8µm)	

Inclusiones
Gomas en los vasos y fibras y cristales romboidales en parénquima

Mamey (*Pouteria sapota*). Con datos de Pérez Olvera y col., 1985. Aparece como *Pouteria mammosa*.

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
distintas tonalidades de rosa con jaspeaduras castañas correspondientes a los vasos	No	Leve	Suave	Media	Recto a entrecruzado	

Características microscópicas del Mamey (<i>Pouteria sapota</i>)						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Difusa	Pocos solitarios. Predominan múltiples radiales de 2 a 10	8 por mm ² (3 – 20)	125µm (65 - 223µm)	859µm (515 - 1117µm).	areoladas alternas	Perforación simple.
Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
	uniseriados y poliseriados	heterogéneos	muy numerosos, 11 por mm lineal (6 – 14)	872µm (529 - 1635µm).		
Fibras						
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros		
libriiformes y fibrotraqueidas	1970µm (1330 - 2546µm)	29µm (17 - 41µm)	8µm (5µm - 12µm)			
Inclusiones						
Vasos y fibras sin contenido celular. Parénquima axial y radial presentan sílice abundante						

Cueramo (*Cordia eleagnoides*). Con datos de Barajas Morales, 1989.

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Café amarillento en albura, duramen café oscuro tendiendo al negro, con líneas irregulares de color más claro	Ligero olor en la madera fresca. La seca no tiene olor ni sabor característicos	bajo	Pronunciado	Media a fina	Entrecruzado	
Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Semicircular	principalmente solitarios y abundantes agrupados de 2 y escasos de 3 a 5	6 por mm ²	200µm	240µm (150 - 350µm)	alternas, frecuentemente con aberturas coalescentes	perforación es simple y casi transversal
Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
vasicéntrico y aliforme confluyente	multiseriados	heterogéneos	4 por mm lineal	907µm		4 a 5

Características microscópicas del Cueramo (*Cordia eleagnoides*) cont.

Fibras				
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros
libriformes	1132µm (800 - 1570µm)	14µm	5µm	

Inclusiones

Los vasos presentan tñlides muy abundantes y notorias. El parénquima axial tiene inclusiones de cristales grandes. Los rayos presentan cristales prismáticos abundantes. El lumen de las fibras está casi ocluido.

Siricote (*Cordia dodecandra*). Con datos de Barajas Morales, 1989.

Características macroscópicas

Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
café rojizo a café oscuro con líneas negras irregulares	Ligero olor, no tiene sabor	Medio	Pronunciado (¿)	media	Recto a entrecruzado	

Características microscópicas

Vasos

Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
	solitarios, en grupos radiales de 2 y 3 o en pequeños grupos	pocos a numerosos	150µ (80 - 250µ)		alternas	Perforación simple

Características microscópicas del Siricote (*Cordia dodecandra*) cont.

Parénquima

Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
Marginal, vasicéntrico, aliforme con alas cortas, confluyente formando bandas cortas y onduladas en dirección tangencial, y difuso	Poliseriados principalmente	heterogéneos tipo II y III		50 o más células	85u	4 a 5

Fibras

Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros
libriiformes				Puntuación simple

Inclusiones

Los vasos presentan tilosis y gomas rojizas. Los rayos presentan cristales

Campincerán (*Dalbergia congestiflora*). Con datos de Barajas Morales, 1989.

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Albura de color amarillo grisáceo y duramen color rojo violáceo con vetas de color más oscuro	No presenta	No		media	Entrecruzado	
Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Difusa	principalmente solitarios, abundantes agrupados de 2 y escasos agrupados de 3 y 4	22 por mm ²	71µm	145µm (120 - 180µm).	alternas y ornamentadas	Perforación simple y casi transversal
Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
paratraqueal escaso con tendencia a aliforme de alas cortas.	uniseriados y biseriados	homogéneos	7 por mm lineal	107µm		

Características microscópicas del Campincerán (*Dalbergia congestiflora*) cont.

Fibras				
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros
libriformes	700µm (600 - 930µm)	14µm	4µm	

Inclusiones

Los vasos presentan gomas abundantes. El parénquima axial presenta abundantes cadenas de cristales. Los rayos tienen abundantes cristales prismáticos muy grandes

Paloescrito (*Dalbergia Paloescrito*). Con datos de Rzedowski y Guridi, 1988.

Características macroscópicas

Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Albura color crema, duramen castaño violáceo con vetas casi negras de contorno muy irregular	No tiene.	Medio	Pronunciado	Media	Recto	Se presenta cierta zonación debido a parénquima marginal

Características microscópicas de *Dalbergia Paloescrito*.

Vasos

Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Difusa con ligera tendencia a circular	Principalmente solitarios, grupos radiales de 2 y 3 y algunos en grupos irregulares		De pequeños a grandes			

Parénquima

Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
Marginal y paratraqueal vasicéntrico			numerosos			

**Granadillo o Zangalicua (*Dalbergia granadillo*). Con datos de Richter y Dallwitz, 2000. Aparece como *Dalbergia retusa*.
 *Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
varía entre el amarillo, anaranjado, rojo oscuro y café rojizo, tiene bandas negras irregulares	Olor acre. No tiene sabor	.bajo		Media a fina		
Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
	solitarios y en grupos radiales de 2 a 4		185 μ (81 – 250 μ).	Varían de pequeños a grandes	de a alternas	
Parénquima						
Axial			Radial			
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
Marginal, vasicéntrico y apotraqueal formando líneas tangenciales continuas	Uniseriados muy numerosos, algunos biseriados	homogéneos a heterogéneos tipo III				1 y 2
Fibras						
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros		
Libriiformes				puntuación simple		
Inclusiones						
Presenta gomas rojizas en vasos y rayos. El parénquima axial tiene cristales en cadenas.						

Palosanto de Brasil (*Dalbergia nigra*). Com datos de Kribs, 1968.

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
varía entre tonos de café y violeta con bandas negras irregulares	Olor parecido a las rosas. No tiene sabor	Bajo a medio		Media	recto a ondulado	zonación depende de parénquima marginal y poros más grandes al final de la zona
Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
Difusa	solitarios y en grupos radiales de 2 a 4		242u (192 – 285u)		Alternas	
Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
marginal, vasicéntrico, aliforme con alas cortas, apotraqueal difuso agregado	Biseriados y triseriados	homogéneos a heterogéneos tipo III		8 a 10 células		
Fibras						
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros		
libriformes				puntuaciones simples.		
Inclusiones						
Gomas de color café oscuro en vasos y rayos. Cristales en cadena en el parénquima						

Palosanto de India (*Dalbergia latifolia*). Con datos de Kribs, 1968.

Características macroscópicas						
Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Otros
Violeta o café a morado con líneas oscuras que parecen anillos	Aroma leve. No presenta sabor.	Bajo a medio.		Media	Irregular a entrecruzado	Densidad 0.77-0.93
Características microscópicas						
Vasos						
Poros			Elementos vasculares			
Porosidad	Disposición	Cantidad	Diámetro	Longitud	Puntuaciones	Placa
difusa	Solitarios y en grupos de 2 y 3		85 – 250		Alternas	
Parénquima						
Axial		Radial				
Tipo	Clase	Tipo	Cantidad	Alto	Ancho	Series
Aliforme con alas cortas a muy largas, confluyente formando bandas onduladas tangenciales, apotraqueal difuso	Biseriados y triseriados	Homogéneos y heterogéneos tipo III		15 células		
Fibras						
Tipo	Longitud	Diámetro	Pared	Otros		
Libriformes			Grosor medio	Puntuaciones simples..		
Inclusiones						
Gomas de color café o morado en vasos y rayos. Cristales en cadena en el parénquima						

Índice de Figuras

Fig. 2.1. Foto de guitarra construida por Antonio Stradivari.....	4
Fig. 2.2. Foto de la parte trasera de la palma y detalle de roseta en guitarra construida por Antonio Stradivari.....	5
Fig. 2.3. Foto de guitarra hecha por Fabricatore.....	5
Fig. 2.4. Foto de guitarra hecha por Fabricatore	6
Fig. 2.5. Foto de guitarra hecha por Antonio de Torres.....	6
Fig. 2.6. Foto de la parte interna de la tapa de una guitarra réplica de las de Antonio de Torres.....	7
Fig. 2.7. Partes de la guitarra.....	8
Fig. 2.8. Diagrama del proceso de fabricación de una guitarra clásica.....	15
Fig. 5.1. Foto de guitarra de cedro blanco.....	25
Fig. 5.2. Foto de guitarra de paloescrito.....	25
Fig. 5.3. Foto de guitarra de mamey.....	25
Fig. 5.4. Foto de guitarra de siricote.....	25
Fig. 5.5. Foto de guitarra de bálsamo.....	26
Fig. 5.6. Foto de guitarra de cueramo.....	26
Fig. 5.7. Foto de guitarra de campincerán.....	26
Fig. 5.8. Foto de guitarra de haya.....	26
Fig. 5.9. Foto de guitarra de granadillo.....	27
Fig. 5.10. Foto de guitarra de palosanto de Brasil.....	27
Fig. 5.11. Foto de guitarra de palosanto de India.....	27

Fig. 5.12. Foto de la posición del micrófono al grabar.....	29
Fig. 5.13. Gráfica del analizador de frecuencia.....	30
Fig. 5.14. Nivel de armónicos de la nota La. Guitarra de paloescrito.....	31
Fig. 5.15. Nivel de armónicos de la nota La. Guitarra de mamey.....	31
Fig. 6.1. Equilibrio horizontal. Guitarras con tapa de <i>Picea abies</i>	34
Fig. 6.2. Equilibrio horizontal. Guitarras con tapa de <i>Thuja plicata</i>	35
Fig. 6.3. Equilibrio vertical. Guitarras con tapa de <i>Picea abies</i>	35
Fig. 6.4. Equilibrio vertical. Guitarras con tapa de <i>Thuja plicata</i>	36
Fig. 6.5. Densidad de armónicos. Guitarras con tapa de <i>Picea abies</i>	36
Fig. 6.6. Densidad de armónicos. Guitarras con tapa de <i>Thuja plicata</i>	37

Índice de tablas

Tabla 2.1. Maderas utilizadas en guitarras.....	10
Tabla 2.2. Maderas utilizadas en los diferentes tipos de guitarras.....	11
Tabla 2.3. Usos que se la han dado a distintas maderas en la fabricación artesanal de instrumentos musicales.....	12
Tabla 2.4. Características elásticas de la madera.....	19
Tabla 2.5. Características acústicas de maderas.....	20
Tabla 5.1. Tipo de madera utilizada en guitarras con tapa de <i>Picea abies</i>	24
Tabla 5.2. Tipo de madera utilizada en guitarras con tapa de <i>Thuja plicata</i>	24