

00361

15
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO.

CARACTERISTICAS ANATOMICAS Y ACUSTICAS DE LA MADERA DE ALGUNAS ESPECIES DE ANGIOSPERMAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS
(BIOLOGIA)

P R E S E N T A:

PAZ ALEJANDRA QUINTANAR ISAIAS

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. CARMEN DE LA PAZ PEREZ OLVERA
CODIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL DE ICAZA HERRERA

MEXICO, D. F.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

27/6/61



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Esta Tesis se la dedico:

A los bosques y a toda la leña

A Alfonso

A mis alumnas y alumnos de todos mis cursos y por supuesto al termitario

A mi abuela Cruz
A la Sra Teresa (mi madre)
A mis tios Héctor y Elisa
A mis hermanos Arturo y Claudio
A Emiliano
A mi tía Catalina
A mis amiguitas (tos)
A Juan Pedro y Tila
A mis colegas xilologas (gos)

A mis amigos lauderos

Cuando conocí a Julia Torre le agradecí su existencia

A ella le dedico todo.

Agradecimientos

Trabajar con árboles suena muy atractivo. Pensar en estudiarlos por dentro y hacer colecciones y un sin fin de proyectos sobre sus maderas y sus propiedades tecnológicas también es muy atractivo. El chiste es llevarlos a cabo con compromiso y dedicación. Por eso este trabajo es el resultado de la participación de mucha gente e instituciones que tienen que ver con este recurso.

Les agradezco a los Ings. Jaime Bocanegra, Salvador Juárez Castillo, Laura Medrano, Raúl García de la Cadena, al Sr. Horta, al Sr Osvaldo, así como a los ejidatarios la gentiliza por permitirnos y facilitarnos hacer las colectas en los distintos municipios de los estados de Puebla, Veracruz y Jalisco. A la Biól. Lulú Aguilar (lulucita) y M. en C. Adolfo Espejo por la identificación de las especies. A los Srs. Ingenieros Jaime Carrillo y Avelino Villasalas y por supuesto a Nachito, por las facilidades brindadas para la elaboración de las probetas para el estudio. En este punto también deseo agradecerles al Dr. Raymundo Dávalos Sotelo y al M.en C. Victor Rubén Ordoñez del Instituto de Ecología el apoyo para el procesamiento de parte del material.

En el Centro de Metrología, en el CINVESTAV (IPN), se realizaron algunas de las pruebas iniciales con frecuencias naturales dirigidas amablemente por el Dr. Rafael Trovamala. En el Centro de Instrumentos de la UNAM conocí a los Drs. Felipe Orduña Bustamante y Ricardo Ruíz Boullosa que me permitieron introducirme al arte de la acústica, arte que está ligado por supuesto a mis queridos amigos lauderos, especialmente al Fís. Rafael Cervantes, que hubiera estado muy feliz por ver cómo terminaron nuestras largas charlas en el INIF sobre la acústica y la madera. A Miguel Zenker, a Flor Chavarría, a Daniel Guzmán, que buscaban y buscaban algo entre los anaqueles de la Xiloteca Nacional de aquel INIF y que tardé mucho en entender, pero que nos ha unido durante tanto tiempo a pesar de nuestras muchas historias.

Fué el Dr. Miguel de Icaza Herrera con quien pude concretar parte de la difícil tarea que los lauderos han encomendado y aunque no está resuelta creo que a ambos nos ha enseñado cómo abordarla en el futuro. Agradezco Miguel, tu amistad en primer lugar, y tus reflexiones durante nuestras sesiones de acústica y mucho, mucho las de música. Además te perdono lo de UNIX, pero los agradecimientos los hice en word.

La Maestra Carmen de la Paz Pérez Olvera ha sido importante en mi vida, la personal y la académica, llena de tropiezos y encrucijadas que incluso me llevaron a casi desertar. Sin embargo de ella aprendí a comprometerme con la investigación en la ciencia de la madera. Gracias Carmelita por todas nuestras historias juntas.

Les agradezco a los Drs.: Judith Márquez Guzmán, Raymundo Dávalos Sotelo, Miguel de Icaza Herrera, Hermilo Quero Rico, Guillermo Ángeles Álvarez, Víctor Castaño Meneses, a las Maestras Carmen de la Paz Pérez-Olvera, Abigail Aguilar Contreras y Víctor Rubén Ordoñez, la revisión crítica de esta Tesis cuyos comentarios fueron muy valiosos, importantes y constructivos.

A mis dilectas alumnas, Daría Razo, Laura Rivera, Isabel de la Cruz, Mariana Velázquez, Claudia Paredes, Manuela López y Adoración Sandoval les agradezco que hayan decidido estudiar en la UAM y nos hayamos conocido. Ojalá que su estancia por el Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera, aunque breve, haya sido en beneficio de ustedes y de los recursos naturales.

A mis amigas y amigos, que aunque no son muchos, les agradezco que siempre me dieron ánimos. Angélica Martínez, María Flores, Sara Camargo, Rosaura Grether, Irma Reyes, Maru Fraile, Flor Chavarría, Ricardo López, José Luis Córdova, Salvador Acosta, Fortunato Solares.

A mi amigo de la infancia Enrique Díaz, le agradezco la dedicación que tuvo para revisar el manuscrito, soltarme algunas de sus ideas para el futuro y ayudarme con UNEX . Enrique te agradezco el apoyo que me has brindado en tiempos muy difíciles.

A Julia y a Alfonso les agradezco la paciencia que han tenido para pasar el tiempo sin mí, soportar mis momentos difíciles, confiar y quererme.

Agradezco a todos los que me ayudaron y de los cuales no recuerdo sus nombres, pero recuerdo sus caras, gracias.

Esta tesis se desarrolló con presupuesto de la Universidad Autónoma Metropolitana y estuvo asociada al Proyecto de Investigación *Estudios tecnológicos de maderas mexicanas*, siendo responsable de éste la M. en C. Carmen de la Paz Pérez Olvera.

Contenido

Introducción	i
1 Antecedentes	1
1.1 Estudios anatómicos	2
1.2 Estudios físicos	3
1.3 Estudios acústicos	3
2 La madera	11
2.1 Tipos celulares de la madera	14
2.2 Aspectos macroscópicos de la madera	25
3 Propiedades Físicas de la Madera	29
3.1 Densidad	29
3.2 Contenido de humedad	30
3.3 Propiedades elásticas	31
3.4 Propiedades acústicas	34
3.5 Las ondas longitudinales y transversales	36
4 Metodología	38
4.1 Procedencia del material	38
4.2 Procesamiento del material	39
4.3 Estudios anatómicos	43
4.4 Estudios acústicos	44
4.5 Los Transductores	47
5 Resultados y Discusión	53
5.1 Anillos de crecimiento	53
5.2 Porosidad y elementos de vaso	64

Introducción

Resumen

Se estudiaron las características anatómicas y acústicas de la madera de nueve especies de angiospermas y una conífera, con el fin de encontrar los nexos existentes entre varias estructuras anatómicas y sus respuestas a las velocidades de sonido y a los Módulos de Young en las tres direcciones básicas para este material: axial, tangencial y radial. Las especies que se estudiaron son: *Alnus jorullensis*, *Alnus acuminata*, *Carpinus caroliniana*, *Clethra mexicana*, *Tilia mexicana*, *Arbutus glandulosa*, *Quercus crassifolia*, *Caesalpinia platyloba*, *Gliricidia sepium* y *Abies* sp.

Para los estudios anatómicos microscópicos se obtuvieron cubos de 2 X 2 cm, tablillas de xiloteca para los macroscópicos y, para medir las velocidades de sonido así como para el cálculo del *módulo de Young E*, paralelepípedos con las tres direcciones básicas representadas: axial, radial y tangencial. La nomenclatura utilizada para las características anatómicas cuantitativas y cualitativas se usó la propuesta por el Comité de la IAWA (1989). Para la obtención de las velocidades de sonido se utilizó un generador de pulsos, un amplificador, un osciloscopio y transductores.

Se encontró que las velocidades axiales son mayores a las radiales y tangenciales. Los valores de éstas últimas son menores en estructuras con porosidad difusa. Las dimensiones y número de radios/mm, influyen las velocidades radiales y tangenciales. El grosor y el diámetro de las fibras, así como la lignificación y el incremento en el número de poros están relacionados con valores de velocidad en las tres direcciones. Para estirar una cara axial se requiere de mayor esfuerzo que en las direcciones radiales y tangenciales y éstas últimas son menos deformables que las radiales. *Carpinus caroliniana* se propone como una especie que habrá que investigar con más individuos, dado que sus valores de velocidad de sonido y módulos de Young la hacen

una especie potencial para sustituir otras de importación.

Introducción

La madera es un tejido que resulta del crecimiento secundario o en grosor en tallos leñosos, constituido por células de diversas formas y dimensiones que se arreglan en patrones que van a caracterizar la estructura macroscópica y microscópica de este material. La disposición y abundancia de sus células en sentido axial, tangencial y radial, así como los contenidos ergásticos como cristales, gomas, taninos o resinas, pueden explicar las respuestas físicas de este material al ser sometido a diferentes pruebas tecnológicas. La información derivada de los estudios anatómicos y físicos facilita la caracterización de cada especie y es de gran utilidad para sugerir criterios que ayuden a establecer proyectos de silvicultura y mejoramiento genético de especies.

En Estados Unidos, en Canadá y en algunos países europeos, se han abordado estudios tecnológicos que incluyen aspectos de la anatomía y de las propiedades mecánicas de varios géneros, especialmente de *Pinus* y de *Quercus* [1, 2]. En éstos se han estudiado la influencia de la organización y de los tipos celulares, así como la de la proporción de lo que se ha llamado densidad relativa (sustancia madera), representada por la pared celular, en el comportamiento mecánico y físico. El conocimiento derivado del estudio que relaciona la anatomía y las propiedades tecnológicas ha permitido colaborar con la planeación de plantaciones forestales que se destinan a producir madera de calidades diversas según los requerimientos de las industrias involucradas con el recurso maderero tales como la del papel, la de construcción, la mueblera y la textil entre otras.

México posee una gran riqueza en especies forestales de gran potencial tecnológico [3, 4]. De manera aislada se han estudiado los aspectos antes descritos ya que se conocen las características anatómicas y tecnológicas de especies de los géneros *Pinus*, *Quercus*, de algunas dicotiledoneas templadas y de otras tropicales [5, 6]. Sólo en algunas especies de *Quercus* de los estados de Puebla y Jalisco [7] se han realizado estudios que integran estos dos aspectos, utilizando para la medida de sus propiedades físicas y mecánicas los métodos tradicionales sugeridos por la American Society for Testing and Materials [8].

Con el tiempo se han incorporado, para el estudio de las propiedades mecánicas, métodos que permiten medirlas indirectamente. Estos métodos son los acústicos, para los que se emplea equipo que permite analizar frecuen-

cias naturales de vibración [9] o equipo que produce ondas ultrasónicas [10]. En ambos casos las observaciones que resultan son reproducibles ya que la muestra que se estudia no es destruída. Con las pruebas acústicas se pueden realizar medidas para el cálculo de propiedades mecánicas en probetas de pequeñas dimensiones y estudiar inclusive la variación a lo largo del interior del árbol. En este ámbito la medida de las variaciones intraindividuales, entre individuos y entre grupos de individuos del mismo sitio o de sitios distintos, de rodales naturales o cultivados es un punto que se ha investigado [11, 12, 13, 14, 15, 16] y en el cual estas técnicas podrían aportar mucho para proponer criterios de mejoramiento genético donde el reconocimiento de los distintos niveles de variación de los caracteres es fundamental, ya sea en el orden geográfico o genético. La obtención de las constantes elásticas de la madera a través de estos ensayos puede utilizarse para formular clasificaciones normalizadas (comerciales), que requieren de buenos niveles de confianza. En este punto, las pruebas podrían ajustarse a estos estándares y garantizar productos de calidades diversas esperadas.

Por otro lado, Hutchins [17] y Haines [18] han utilizado las ventajas de éstos métodos para realizar pruebas con instrumentos antiguos, como es el caso de los violines Stradivarii, que actualmente muestran calidades acústicas excelentes y en los que el tipo de madera que utilizaron para construirlos parece importar mucho y con esto han abordado el problema de las calidades de estos y otros instrumentos elaborados recientemente.

Lo señalado por Schelleng [19], que establece claramente que el constructor de violines además de estar interesado como artesano en la buena trabajabilidad del material y como artista, en su belleza, debe como músico, analizar su comportamiento acústico, es atinado ya que el comportamiento de este material puede considerarse como el resultado de fenómenos relacionados con la estructura anatómica, con la densidad del material, con su capacidad de vibrar y amortiguar y con su rigidez, entre otros factores.

Últimamente se han impulsado estudios sobre cuáles sean los aspectos de la anatomía de la madera que están relacionadas relacionadas con las propiedades acústicas [20]. Es por esto que varios investigadores se han abocado a esta tarea y han tenido resultados interesantes, mediante la determinación de las constantes elásticas (*Módulos de Young*) obtenidos con métodos acústicos ultrasónicos. Así se encuentra, por ejemplo, que Bucur [10] utiliza estos métodos para medir las constantes elásticas de madera en muestras cilíndricas obtenidas de árboles en pie, o las viscoelásticas en maderas que se usan para tapas de resonancia y con esto trata de relacionar estas propiedades

con la estructura celular [22] así como con sus respuestas anisotrópicas [23]. De aquí se sigue que los valores obtenidos con los métodos ultrasónicos son tan confiables como los estándares tradicionales. Con esto ha realizado una cantidad importante de investigaciones sobre maderas provenientes de varios países [24, 25], así mismo investigado las repercusiones de las condiciones de crecimiento como es el caso de la presencia de madera de reacción [26], así como la evaluación de la pudrición a través de métodos no destructivos [27, 28]. También se ha investigado como afectan las formas de las probetas [29] en las medidas acústicas y recientemente los comportamientos mecánicos de productos reconstituídos como la madera contrachapada [30] y otros compuestos con madera y cemento [31]. Por último se tiene el estudio sobre la relación de algunas características anatómicas y sus velocidades de sonido y Módulos de elasticidad [32].

Objetivos

En este trabajo se plantearon los siguientes:

- Estudiar las características anatómicas y acústicas de seis maderas mexicanas de clima templado: *Alnus acuminata*, *Alnus jorullensis*, *Carpinus caroliniana*, *Tilia mexicana*, *Clethra mexicana* y *Arbutus glandulosa*
- Comparar los resultados de estas especies con las características anatómicas y acústicas de *Quercus crassifolia* [47], que presenta patrones celulares distintos, con dos especies tropicales que tienen cantidades importantes de extractivos (*Caesalpinia platyloba* y *Gliricidia sepium*) y finalmente con una especie de conífera cuyo madera se considera regular, (*Abies* sp).
- Hacer una comparación de las características histoquímicas de las paredes celulares de todas las especies estudiadas con el fin de relacionarlas con los valores de velocidad y módulos de Young

Capítulo 1

Antecedentes

Los bosques templados mexicanos varían en la cantidad de elementos arbóreos que presentan dependiendo de la latitud o altitud así como por su origen. Un tipo de bosque que contiene una gran diversidad de géneros es el mesófilo de montaña o de neblina, siendo *Carpinus caroliniana* una de las especies típicas que conviven con géneros como *Ostrya* y *Styrax*, entre otros [33]. Los bosques de pino-encino se caracterizan por ser más fríos y presentar menor diversidad de géneros. En estos bosques destacan géneros como *Alnus*, *Tilia*, *Clethra*, *Arbutus* y *Quercus*. Por otro lado en selvas altas perennifolias habitan géneros como *Caesalpinia* y *Gliricidia* cuyas características anatómicas como el grosor de la pared influyen en sus densidades y por esto son aprovechadas para usos donde se requiere una alta durabilidad natural, resistencia al impacto y al deterioro. La madera de estos géneros provenientes de estos tipos de vegetación, de acuerdo con resultados obtenidos de estudios de su anatomía, tiene características estéticas y estructurales que la hacen muy atractiva para usos diversos como muebles, instrumentos musicales, o incluso en escultura, entre otros. Sin embargo, debido al limitado conocimiento de su tecnología, la explotación de estos taxa se ha reducido a la fabricación de objetos artesanales y a su uso como leña. Es por esto que investigando los aspectos tecnológicos y conectandolos con los resultados de su anatomía podremos conocer mejor nuestras especies forestales y sabremos aprovechar con mayor eficiencia nuestros bosques.

1.1 Estudios anatómicos

Para *Carpinus* se conoce la descripción de De la Paz Pérez *et al* [34] que reportan porosidad difusa para la especie *Carpinus caroliniana*, con poros de contorno angular, puntuaciones areoladas alternas y placa perforada simple. Los radios son de dos tipos, uniseriados y agregados y de clase homogénea. Para *Alnus*, se han estudiado las especies *A. firmifolia* [35], *A. jorullensis* [36, 3] y *A. arguta* [37]. De acuerdo con estos estudios las principales características son porosidad difusa, con poros de contorno angular, puntuaciones areoladas opuestas y alternas, placa perforada escaleriforme cuyo número de barras varía dependiendo de la especie. Los radios son de dos tipos, uniseriados y agregados y de clase homogénea.

Para el género *Tilia*, se conoce *T. mexicana*, descrita por De la Paz Pérez y Corral [37], que presenta porosidad difusa, con poros de contorno oval, puntuaciones areoladas alternas y placa perforada simple. Los radios son multiseriados, de dos a tres series y de clase homogénea.

Para el género *Clethra*, se conoce *C. mexicana* descrita por Barajas [36] y *C. lanata* por De la Paz Pérez y Corral [37], que tiene porosidad difusa, con poros de contorno angular, puntuaciones areoladas alternas y placa perforada escaleriforme con muchas barras. Los radios son multiseriados de tres series y de clase heterogénea.

Para el género *Arbutus*, se han estudiado las especies *A. xalapensis* [37] y *A. glandulosa* [4]. De acuerdo con los resultados citados, estas especies presentan caracteres tales como: porosidad difusa con poros de contorno redondeado, puntuaciones areoladas alternas, placa perforada escaleriforme, cuyo número de barras depende de la especie y engrosamientos helicoidales. Los radios son multiseriados, de tres a cuatro series y de clase heterogénea. Las fibras presentan engrosamientos helicoidales.

Asimismo, según lo antes reportado, todas estas especies presentan poros de moderadamente numerosos a muy numerosos, de tamaño mediano y fibras de paredes finas a medianas. Los radios son de finos a medianos y bajos, de pocas series a excepción de los agregados presentes en los géneros *Alnus* y *Carpinus*.

Para el género *Caesalpinia* se tiene el estudio de Rebollar *et al* [38]. Para *Gliricidia* el de Quintanar *et al* [39], en el que destacan presencia de vasos y fibras de paredes gruesas formadas por pectinas esterificadas, ligninas y gran cantidad de pectatos de calcio en las láminas medias, así como la presencia de tílides esclerosadas, cristales y gomas en sus cavidades.

1.2 Estudios físicos

Desde el punto de vista tecnológico, para estas especies se tiene poca información acerca de sus propiedades físicas y mecánicas. Hoadley [40] ubica los géneros dentro de las maderas con densidades relativas que van desde 0.35 en *Tilia*, 0.40 en *Abies*, 0.41 en *Alnus*, 0.45 en *Clethra*, 0.60 en *Arbutus*, 0.70 en *Carpinus*, 0.72 en *Quercus* spp, 0.88 en *Caesalpinia* y 1.1 en *Gliricidia*. De acuerdo con la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) [41] se observan tres grupos de acuerdo con este tipo de densidad: la madera de las primeras cuatro es ligera, mediana la de las siguientes tres y pesada la de las dos últimas. En este sentido, Kollman [42] y Panshin y de Zeeuw [43] consideran que la densidad relativa un indicador de las propiedades físicas y mecánicas (resistencias de distintos tipos). Este índice puede ayudar a elegir madera para ser utilizada en partes para instrumentos musicales [44]. Sin embargo aunque este índice refleja la cantidad de sustancia madera o pared celular contenida en un volumen verde, no sugiere la distribución de las células, sus formas, arreglos y dimensiones, por lo que no está necesariamente relacionado con el patrón anatómico. Un ejemplo de esto es la información que Quintanar y De la Paz Pérez [44] dan de las densidades relativas de maderas de importación empleadas para tapas, fondos y costillas así como las densidades de maderas nacionales usadas para las mismas partes de instrumentos de cuerda. Los valores de las densidades relativas de estos tres grupos de madera son muy similares, pues caen dentro de las maderas ligeras, medianas y pesadas y sin embargo la calidad de las maderas mexicanas que se usan para tapas de resonancia no puede competir con aquella de las de importación. Las especies de importación son seleccionadas y manejadas para que la proporción de madera temprana y tardía sea la requerida en tapas de resonancia, sin embargo, las nacionales presentan anillos de crecimiento de anchura variable que sólo es posible mejorar con manejo silvícola.

1.3 Estudios acústicos

La madera de algunas especies de angiospermas templadas y algunas tropicales, que tienen importancia en la construcción de instrumentos musicales, ha sido investigada desde el punto de vista acústico [21] destacando aquellas que presentan porosidad difusa (*Acer campestre*, *Acer pseudopla-*

tanus, *Populus* spp) y poca proporción de madera tardía representada con fibras radialmente comprimidas, lo que puede estar relacionado con valores pequeños de velocidades de sonido (Tabla 1.1). Lo contrario ocurre para especies que presentan porosidad circular (como es el caso de *Quercus*) y mayor proporción de madera tardía en el anillo de crecimiento. El valor de las velocidades puede estar influido por el gran sistema rectangular de tubos transversalmente homogéneos, embebidos en una matriz de ligninas que le proporciona rigidez, por la orientación longitudinal de las fibras y por el sistema horizontal de células o radios que variarán en anchura, altura y número dependiendo de cada especie. Por otro lado es interesante notar que los valores de velocidades que reporta para *Caesalpinia brasiliensis* (especie tropical) cuya densidad es alta, presenta paredes de fibras gruesas y mayor cantidad de extractivos, posee velocidades axiales mayores a las del maple (*Acer pseudoplatanus*) y menores a las del *Quercus* o *Fagus* (Tabla 1.1) lo que hace reflexionar sobre las dimensiones de las paredes celulares y la presencia de cantidades importantes de extractivos. Por otro lado, de acuerdo con este autor y siguiendo el modelo tubular interrumpido por radios, parece ser que son estos últimos los responsables de los valores anisotrópicos de las distintas maderas, es decir, entre más anchos son los radios, el valor de anisotropía es mayor y viceversa, lo que puede explicar las distintas velocidades alcanzadas en los dos sentidos transversales al eje de la madera (el sentido radial y el sentido tangencial vistos como planos de polarización).

Especie	v_{ax}	v_{ra}	v_{ta}	ρ
<i>Acer campestre</i>	4695	2148	1878	623
<i>Acer pseudoplatanus</i>	4350	2590	1914	700
<i>Aesculus hippocastanum</i>	4782	2311	1383	510
<i>Caesalpinia brasiliensis</i>	4935	2435	2034	932
<i>Fagus sylvatica</i>	5074	2200	1560	674
<i>Liriodendron tulipifera</i>	5625	2047	1511	574
<i>Quercus petraea</i>	5071	2148	1538	600
<i>Populus</i> spp	5074	2178	1646	326
<i>Platanus acerifolia</i>	5060	2178	1646	620

Tabla 1.1: Valores de la velocidad del sonido (m/s) en tres sentidos y densidad ρ de la madera (kg/m^3) de varias especies templadas y tropicales según Bucur [21]

Ordóñez [45] estudió *Alnus jorullensis* con pruebas tradicionales y obtiene un Módulo de Young en flexión E al 12% de C.H. de 9420 MPa y obtiene una densidad relativa de 0.40. También estudia *Quercus crassifolia* al 12% de C.H. y obtiene un módulo de Young E de 14000 MPa y una densidad relativa de 0.67.

El Wood-Handbook #72 [46] reporta para *Arbutus menziesii*, bajo un 12% de C.H., un E de 8646.9 MPa, para *Picea glauca* un E de 10045.8 MPa y una densidad relativa de 0.35 y propone además una relación empírica para determinar el E , expresado en MPa, a partir de su densidad relativa, tanto para coníferas como para angiospermas:

- Para coníferas : $E = 3.13G^{0.90}$ (MPa)
- Para angiospermas $E = 2.33G^{0.65}$ (MPa)

Donde G es la densidad relativa, esto es, la relación peso anhidro/volumen verde.

Por otro lado, Rocaboy y Bucur [20], en un estudio sobre las tapas de resonancia de los violines de Carleen Hutchins, construidos con madera de *Picea excelsa*, obtienen valores de velocidades de sonido axiales (en dirección al eje del árbol) del orden de 5085 hasta 5852 m/s y en sentido tangencial (en dirección longitudinal y perpendicular al parénquima radial) desde 916 hasta 1188 m/s. Con métodos de frecuencias naturales en un rango de 350-750 Hz se mostró que la madera de *Picea* usada para tapas de resonancia se caracteriza por una fricción interna baja y un alto módulo de Young en dirección longitudinal.

Los valores para los Módulos de Young en sentido axial fueron de 12 a 18 GPa y los datos de fricción interna del orden de 0.46 hasta 0.58. En sentido radial de 0.7 a 1.1 GPa con una fricción interna de 0.552 hasta 0.434. Asimismo reportan que la longitud de traqueidas de la madera tardía va de 4 hasta 4.81mm y anillos de crecimiento de 1.2 hasta 1.7 mm de ancho, con un 23% de madera tardía. En este mismo trabajo investigaron el ángulo microfibrilar en las cadenas de celulosa para relacionarlo con la fricción interna y sus datos revelan que el E aumenta cuando los ángulos son más altos y la distribución de las microfibrillas es más estrecha en la capa S2 de la pared secundaria. Esto significa que cuando los ángulos son más pequeños entonces los módulos son de valores más bajos con una fricción interna mayor. Por otro lado Bucur *et al* [26], cuando estudian la madera de reacción encuentran que la velocidad de sonido en la madera tardía es siempre más alta

que en la madera temprana. La madera de compresión exhibe velocidades ligeramente más bajas comparada con las que se obtienen para madera normal. Las traqueidas en la madera de compresión son más cortas y presentan menor cantidad de lignina. En la madera de tensión las fibras son más largas que las normales, contienen más hemicelulosas y sustancias pécticas, y por supuesto, menos lignina. En este tipo de fibras, las velocidades de sonido fueron mayores. Asimismo reportan que la madera juvenil, que es la que se forma en los primeros nueve años de vida del árbol, las velocidades se van incrementando gradualmente desde el anillo 1 hasta el 9. En este tipo de madera las paredes de los elementos celulares van cambiando en composición química, pues en los primeros años de vida es básicamente de celulosa y con la edad el fenómeno de lignificación va aumentando. Posteriormente se vuelven más constantes los valores para velocidades. Bucur y Perrin [48] observan que el xilema que presenta porosidad difusa y poca proporción de madera tardía en el anillo anual es más regular, lo que es más cercano a la idea de un conjunto de tubos dispuestos axialmente y que sólo son interrumpidos transversalmente por paquetes de tubos dispuestos de manera horizontal, estructura que propone la Teoría del *Continuum*. Esta aparente estructura regular es difícilmente encontrada en el xilema de una angiosperma cuya porosidad sea circular. Según estos autores, esta estructura regular de porosidad difusa, que consideran como una *estructura en desorden*, induce una aparente homogeneidad. Por otro lado, tanto la estructura de coníferas como la que presenta porosidad circular, como es el caso del género *Quercus*, tiene valores acústicos similares. Lo anterior puede estar ocurriendo en las coníferas, porque su madera tardía genera zonas de mayor densidad y en el caso de maderas con porosidad circular, las regiones de madera tardía también son zonas de alta densidad en contraste con las zonas de madera temprana. Schelleng [19] investigó 19 especies que se emplean para violines y encontró una relación muy interesante entre la densidad y las velocidades de sonido, y en general señala que entre más densa es una madera presenta velocidades menores (Tabla 1.2).

Por otro lado Quintanar *et al* [32] estudiaron algunas características anatómicas y acústicas de la madera de algunas angiospermas de Veracruz y encontraron que aparentemente la eficiencia en la conducción del sonido puede deberse al grosor de las paredes de las fibrotraqueidas o fibras, y pocos poros, lo que está relacionado directamente con la densidad. Por otro lado las características que contribuyen a una estructura poco eficiente pueden ser un gran número de poros, paredes delgadas y diámetro de lumen de las

Especie	aplicación	v	ρ
<i>Ochroma lagopus</i>	T. de R.	5500	280
<i>Populus canadensis</i>	T. de R.	5100	416
<i>Picea excelsis</i>	T. de R.	5400	432
<i>Populus alba</i>	T. de R.	5550	500
<i>Tilia europea</i>	T. de R.	4550	418
<i>Pterocarpus indicus</i>	fondos	5600	648
<i>Abies pectinata</i>	fondos	4900	615
<i>Pinus silvestris</i>	fondos	4150	510
<i>Larix europea</i>	fondos	4400	632
<i>Junglans nigra</i>	fondos	4300	664
<i>Swietenia mahogani</i>	fondos	3990	632
<i>Fraxinus excelsa</i>	fondos	4380	740
<i>Acer platanoides</i>	fondos	3800	670
<i>Acer pseudoplatanus</i>	fondos	3500	638
<i>Platanus orientalis</i>	fondos	3550	625
<i>Dalhbergia nigra</i>	fondos	3900	732
<i>Quercus ilex</i>	fondos	4100	840
<i>Pirus communis</i>	fondos	3810	800
<i>Caesalpinia echinata</i>	fondos	5950	1250

Tabla 1.2: Valores de la velocidad de sonido v (m/s), de la densidad ρ (kg/m^3) y aplicación de la madera de varias especies templadas y tropicales de acuerdo con Schelleng [19]. T. de R. es la tapa de resonancia en violines

fibras grande.

Bucur y Chivers [24] investigaron el comportamiento de especies australianas y europeas y encontraron que en general presentan propiedades acústicas muy similares –calculadas a partir de las velocidades del sonido reportadas en la Tabla 1.3. En general, plantean que a pesar de las bajas densidades en las coníferas, respecto de las angiospermas, los altos valores de la velocidad del sonido en sentido axial parecen estar relacionados con las longitudes de las traqueidas, que en general son más largas que las fibras en las angiospermas.

Bucur *et al* [27] estudiaron el porcentaje de pudrición en términos de sus velocidades de sonido para *Fagus* (Tabla 1.5) y para *Pinus* (Tabla 1.6) y encontraron que aunque el porcentaje de disminución de las velocidades en las

de sus radios. El otro grupo, estructuralmente más heterogéneo, está formado por especies con porosidad circular como *Quercus*, con anillos de crecimiento bien marcados como *Abies* y por otras dos especies tropicales que tienen grandes cantidades de extractivos. La estructura de estos dos grupos de especies –expresada en dimensiones celulares, patrones de radios, vasos y parénquima axial así como extractivos– permite clasificar grupos estructurales de maderas con propiedades acústicas distintas

Capítulo 2

La madera

La madera está formada por elementos celulares verticales y horizontales que se arreglan o agrupan en patrones diversos, dando como resultado distintas arquitecturas internas. La madera en uso está sometida a movimientos de hinchamiento o contracción afectados por factores externos como la humedad relativa, la temperatura y la exposición al sol, entre otros. Este comportamiento está relacionado con los patrones celulares que influirán en el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas. Asimismo la ultraestructura de la pared celular tiene un papel muy importante en los procesos mecánicos y físicos dada la orientación de las microfibrillas de celulosa, la cantidad y el arreglo de las ligninas, pectinas y hemicelulosas. Cuando la madera responde de manera diferente, dependiendo de la orientación celular, se relaciona con la anisotropía, por esta razón la insistencia en la necesidad de buscar la conexión entre la anatomía, algunos aspectos de la composición química y la física.

En el grupo de las coníferas, los elementos conductores y de sostén son las traqueidas y los de reserva son las células de parénquima que forman los radios principalmente. Su madera puede tener canales resiníferos o no, dependiendo del género (fig 2.1).

En el grupo de las angiospermas que forman crecimiento secundario¹ se encuentran elementos celulares que se disponen verticalmente, como es el caso de las fibras, vasos, traqueidas vasculares o vasicéntricas, parénquima axial y canales gomíferos; por otro lado, el parénquima radial dispuesto horizontalmente se organiza en estructuras conocidas como radios (Fig. 2.4).

¹El crecimiento secundario típico produce xilema secundario o madera.

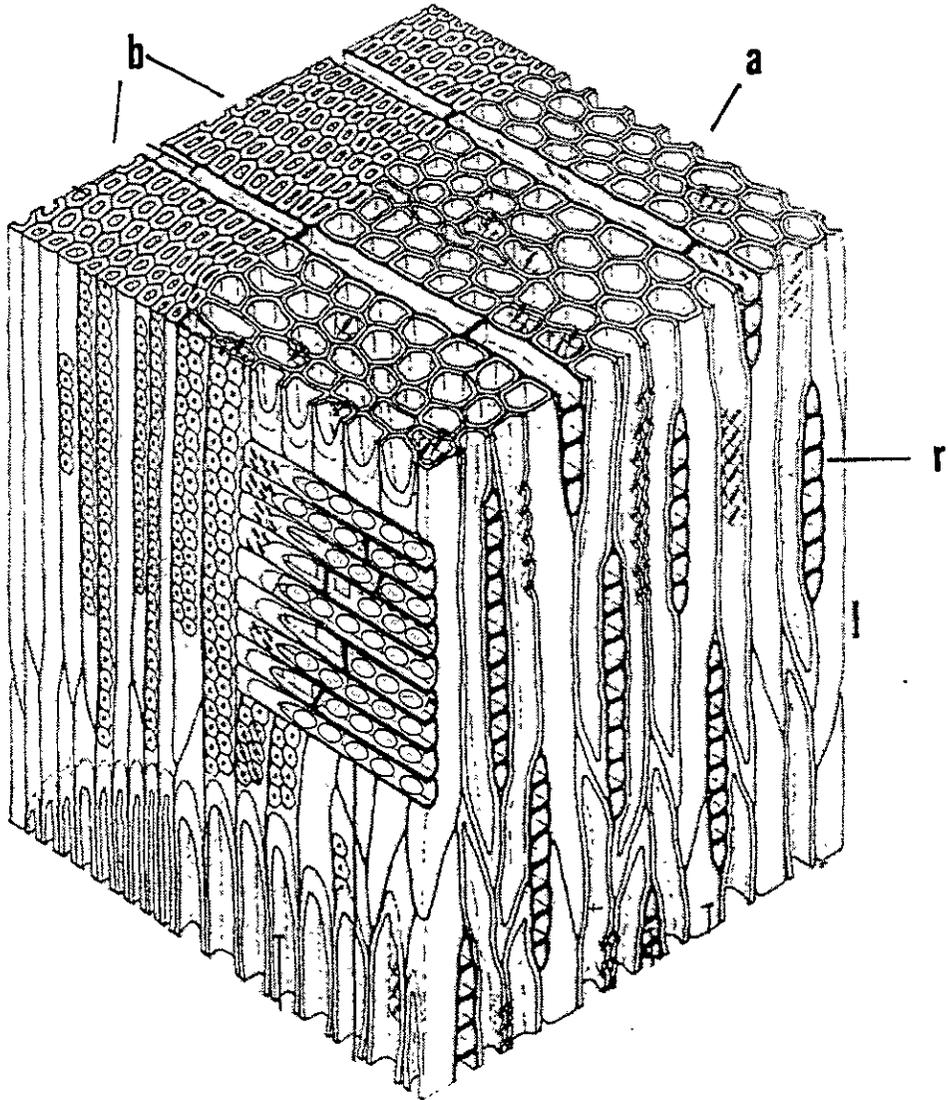


Figura 2.1: Estructura microscópica de la madera de coníferas. a. traqueidas de madera temprana, b. traqueidas de madera tardía, c. canales resiníferos y r. radios

Todas estas células están formadas por pared celular cuyo estudio resulta útil para entender algunos fenómenos mecánicos. En las siguientes subsecciones se explica de manera general estos aspectos.

Ultraestructura de la pared celular [49]

La pared celular de las plantas leñosas está estructurada por largas cadenas de celulosa, por cadenas cortas de hemicelulosa, por ligninas, por sustancias pécticas y por ácidos galacturónicos, entre otras. Estas moléculas se organizan de manera que le proporcionan a la planta resistencia, elasticidad y propiedades de hinchamiento y contracción asociadas al agua. La celulosa, responsable de otorgar el armazón a la pared celular, está constituida por moléculas de glucosa que se entrelazan entre sí por la unión del grupo hidróxilo glucósido del carbono 1 de una molécula, con el grupo hidróxilo alcohólico del C4 de la siguiente molécula (Fig. 2.2). Esto origina uniones fuertes de hidrógeno, posibilitando la formación de cadenas lineales muy largas. Estas cadenas pueden unirse transversalmente con otras cadenas paralelas del mismo tipo, también por puentes de hidrógeno o con asociaciones de moléculas menores de hemicelulosas, con lo cual logran formar macromoléculas (polímeros). Por otro lado, las cadenas de celulosa presentan regiones, donde las fuerzas de los enlaces de hidrógeno son menores, por lo que allí se puede llegar a encontrar mayor cantidad de moléculas de agua unidas por enlaces de hidrógeno, aunque estos no son tan fuertes como los que ocurren entre glucosas y glucosas. Estas regiones conocidas como *amorfas*, tienen la capacidad de hincharse o contraerse más fácilmente. Por otro lado, aquellas en las que las cadenas de celulosa no presentan estas regiones se conocen como cristalinas. De esto último se deriva el concepto de que la celulosa es cristalina. En este polímero se reconocen diferentes niveles de organización, desde grandes cadenas lineales, micelas (varias cadenas de celulosa) hasta fibrillas. Estas últimas son muy importantes para la descripción y la comprensión del comportamiento de las distintas zonas de la pared celular. Por otro lado, la lignina representa la sustancia matricial que envuelve el armazón de celulosa y hemicelulosas que lleva incluidas, proporcionando dureza a la pared celular. Esta sustancia está formada por derivados fenólicos que se estructuran de manera ramificada, cualidad que le permite funcionar como matriz. Algunas hemicelulosas pueden estar en forma de pectinas esterificadas cuya probable abundancia en la pared celular se deba a factores externos de crecimiento de la planta. Un ejemplo de esto se da cuando se pre-

sentan las conocidas regiones de reacción (tensión y compresión). En éstas, las paredes celulares de los elementos de conducción acumulan mayor cantidad de hemicelulosas, que son moléculas de carbohidratos de bajos pesos moleculares, lo que hace que las paredes se vuelvan gelatinosas. En resumen, estas sustancias pécticas se presentan en menores cantidades bajo condiciones normales de crecimiento. Sin embargo, son muy comunes en la región conocida como lámina media, que es la zona localizada entre célula y célula, y básicamente funciona como cementante celular. En el grupo de plantas que nos ocupa, las diferencias en el arreglo ultraestructural de las microfibrillas de celulosa que conforman la pared celular, son de acuerdo con el ángulo en el que se disponen respecto del eje de la célula (ángulo microestructural) y de la cantidad de zonas amorfas que se presenten. De manera que se distinguen las siguientes regiones: pared primaria, pared secundaria, la cual esta formada por la zona S1, adyacente a la pared primaria, la S2 y la S3 dispuestas hacia el lumen celular. La última capa, no muy distinguible en todas las angiospermas es la capa rugosa.

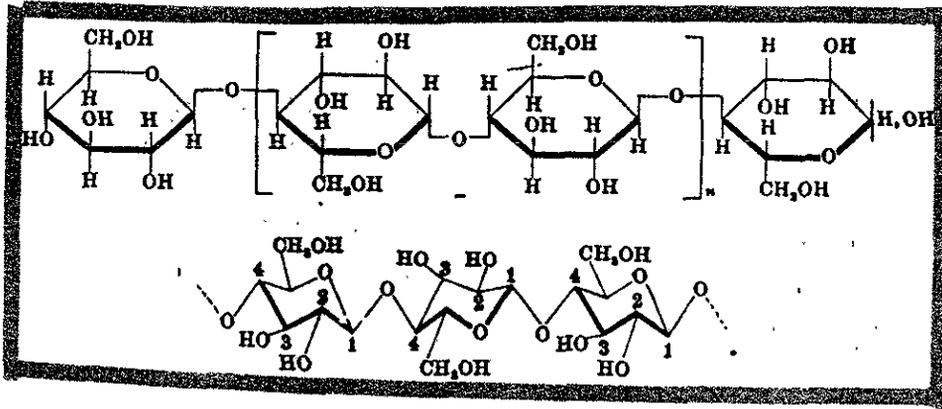
En las fibras se observa que la zona S2 siempre es mayor en proporción a las demás. La pared primaria presenta microfibrillas orientadas como una red. Las de la S1 están arregladas casi en ángulo recto respecto del eje de las fibras siguiendo un patrón helicoidal, mientras que las microfibrillas de la lámina S2 presentan un ángulo de 20 a 30 grados respecto del eje de la célula. Finalmente la S3 presenta un patrón similar al arreglo microfibrilar de la S1.

En cuanto al parénquima y los vasos, la estructura es similar a la pared primaria y secundaria de las fibras, pero a veces es muy clara la capa rugosa. En cuanto a la S1 y S3 pueden llegar a tener un ángulo microfibrilar de 60 a 80 grados y la S2 con microfibrillas orientadas casi paralelamente al eje de las células (fig. 2.2).

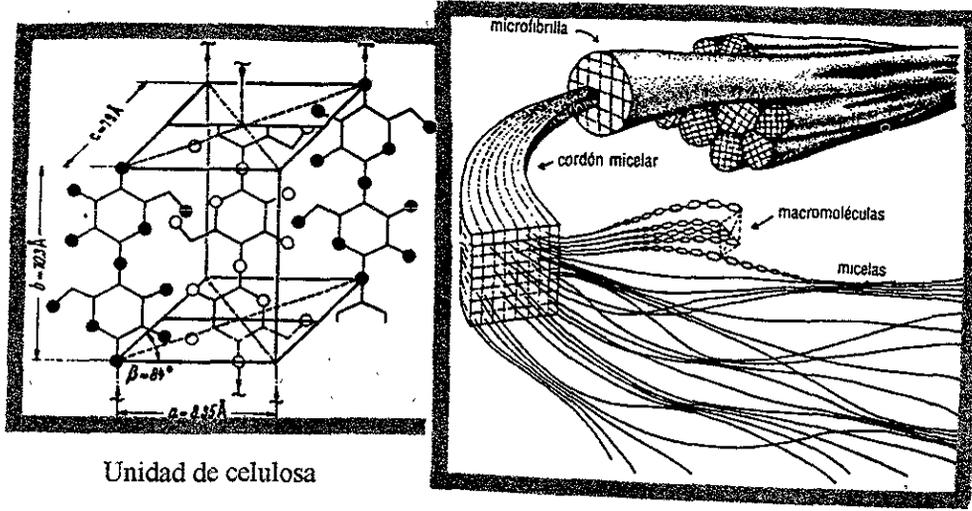
2.1 Tipos celulares de la madera

Coníferas

Las traqueidas son los elementos verticales que forman el leño de las coníferas. Forman zonas más densas de madera tardía y zonas menos densas de madera temprana. Son atravesadas horizontalmente por paquetes de células parenquimatosas (radios). Pueden presentar canales secretores de resina que se



Estructura química de la celulosa



Unidad de celulosa

Figura 2.2: Organización ultraestructural y química de la pared celular

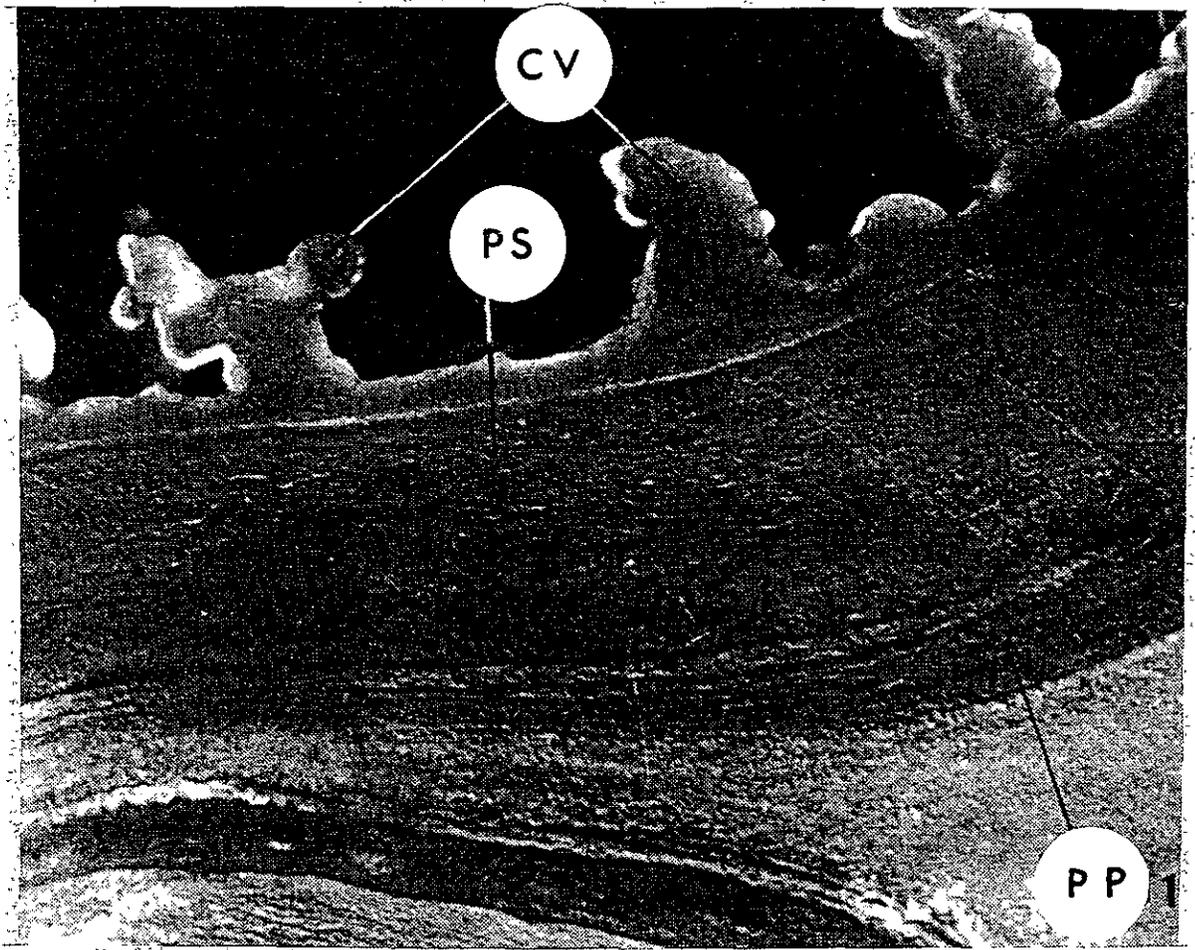


Figura 2.3: Pared celular: vista microscopio electrónico. Pared primaria (pp), pared secundaria (ps) y lámina rugosa (cv)

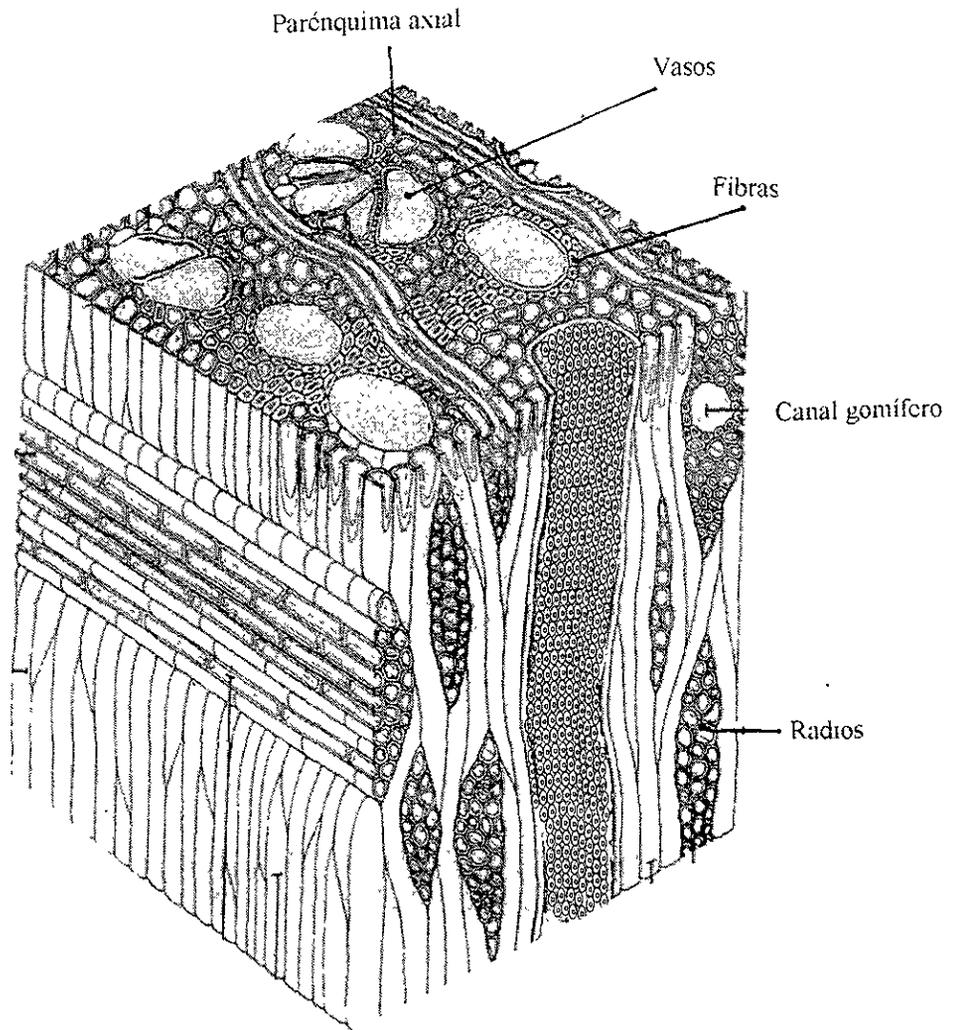


Figura 2.4: Estructura microscópica de la madera de angiospermas [42, 43, 50]

disponen verticalmente o presentarse envueltos por las células de parénquima radial en posición horizontal (Fig. 2.5).

Angiospermas

Elementos de vaso

Son células cuya principal función en el árbol es la conducción de agua y sales minerales. Presentan en sus paredes puntuaciones areoladas y en los extremos estructuras conocidas como placas perforadas. Según la especie, las paredes pueden formar engrosamientos de tipo helicoidal. Estas células se agrupan longitudinalmente formando columnas cortas o largas que se conocen como vasos. En caras transversales, es decir, perpendiculares al eje del árbol, los vasos aparecen como pequeños orificios conocidos como poros. El arreglo que guardan en el leño se denomina porosidad y se conocen tres tipos: la difusa, la semianular y la anular [41]. (Fig. 2.6)

Por otro lado el arreglo que los elementos de vaso presentan entre sí, permite reconocer diversos patrones como los solitarios, los múltiples radiales y tangenciales, los dendríticos o los agrupados, entre otros. La cantidad y dimensiones de los vasos probablemente influyen en la conducción de savia así como en su absorción.

Parénquima axial

Está formado por células de forma rectangular, a veces cuadrada, cuyas paredes muestran puntuaciones simples. Por sus características morfológicas son adecuadas para almacenar agua o productos del metabolismo celular como gomas, taninos, resinas y cristales entre otros. Este parénquima está dispuesto verticalmente por lo que forma cordones longitudinales que pueden ir desde dos hasta más de ocho células. En las caras transversales se reconocen patrones de arreglo muy diversos: el apotraqueal, es decir, parénquima que se presenta no asociado a los vasos como de tipo difuso, y el difuso en agregados; el paratraqueal que está asociado a los vasos, en el que se encuentra el vasicéntrico y aliforme entre otros, (ocho tipos [41]). Y por último el parénquima en bandas, que puede estar asociado o no a los vasos, presentándose en 6 modalidades [41]. Su influencia en el peso de la madera (Fig 2.7), depende de la cantidad de estas células en el leño.

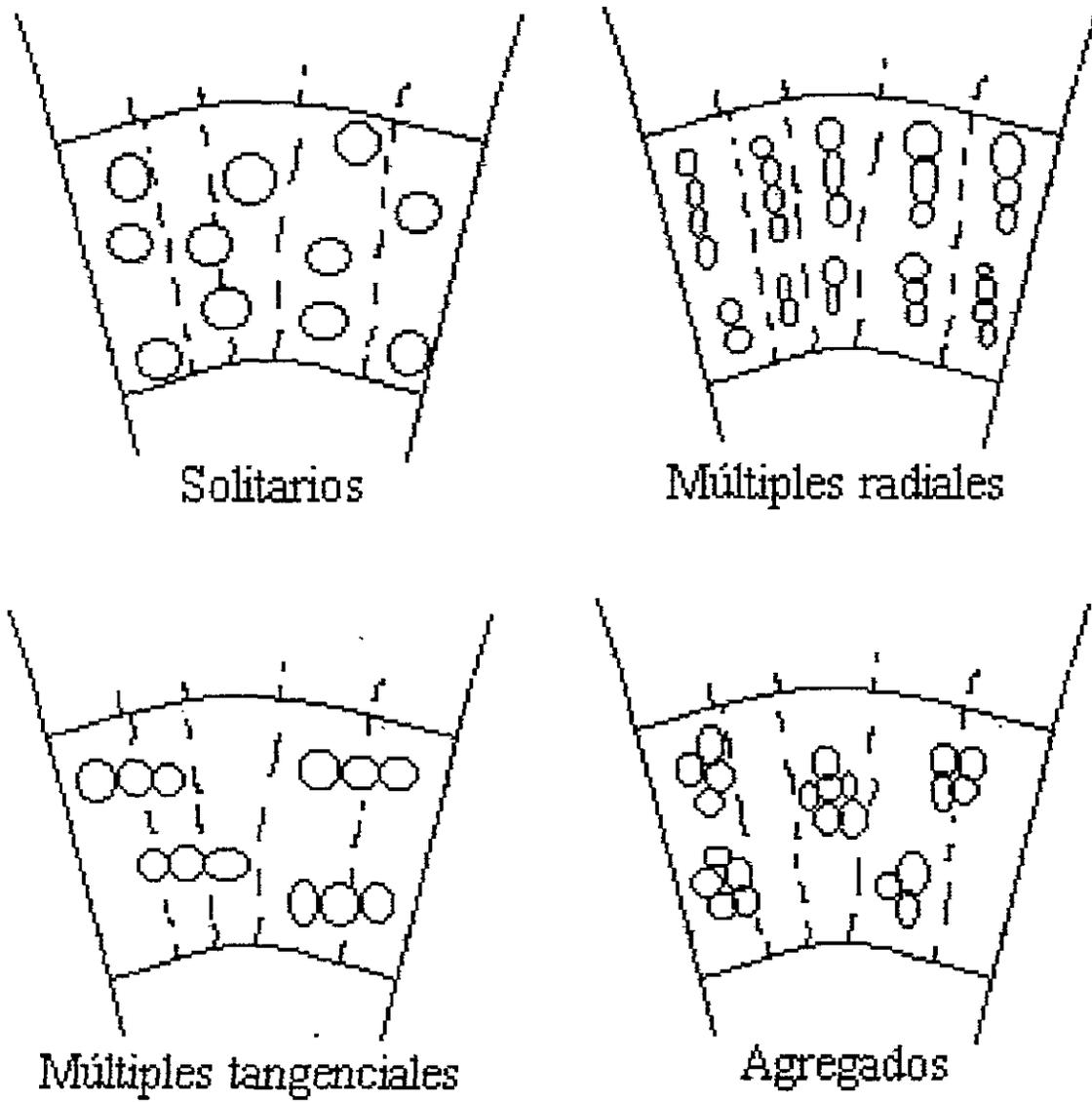


Figura 2.6: Los vasos y su arreglo en el leño

APOTRAQUEAL

PARATRAQUEAL

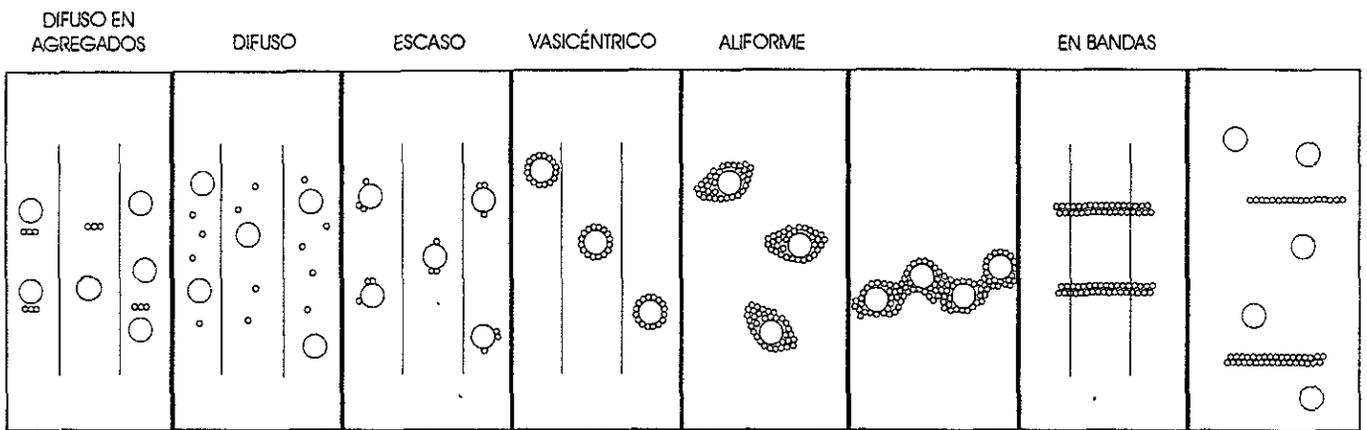


Figura 2.7: Tipos de parénquima axial



Figura 2.8: Tipos de radios

Parénquima radial

Este tipo de parénquima se organiza en paquetes horizontales que reciben el nombre de radios y su función es similar a la del parénquima axial. Los radios pueden estar formados por un tipo celular (homogéneos) o por dos tipos de células (heterogéneos). En las caras tangenciales estos se organizan en una o más series (de uniseriados a multiseriados) (Fig. 2.8). Estas estructuras están relacionadas con procesos de contracción tangencial, lo cual está asociado con el número de series que lo forman. Por otro lado, dependiendo de la cantidad de células presentes, puede influir en la densidad relativa.

Fibras

Éstas son células de forma alargada que se disponen verticalmente, de diámetros y paredes de dimensiones variables, que pueden presentar puntuaciones simples o areoladas pequeñas. Su función principal es dar sostén al árbol. Las dimensiones de las fibras, al igual que las de los vasos, varían dependiendo de la especie y de las condiciones ambientales en las que ha crecido el árbol, pero en general existe un mínimo y un máximo de longitud [51] que al parecer esta controlado genéticamente. (Fig. 2.9). Este tipo celular

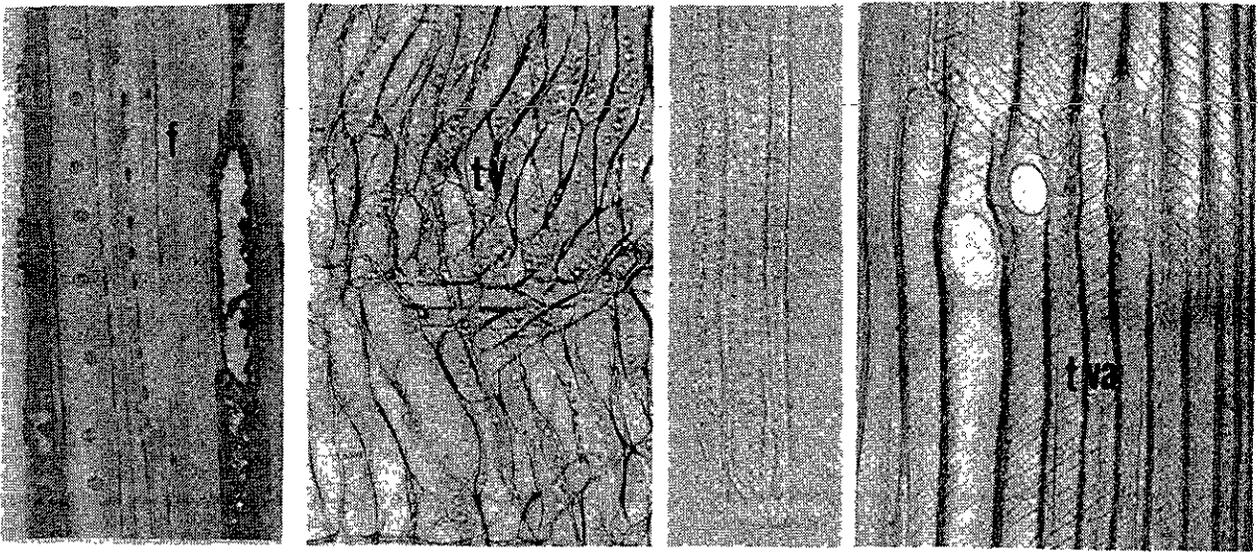


Figura 2.9: Fibras (f), traqueidas vasculares (tv) y vasicéntricas (tva)

así como los anteriores, también influye en el valor de la densidad relativa, debido principalmente a las dimensiones de sus paredes, por lo que puede tener un impacto directo en los valores elásticos.

Traqueidas vasculares y vasicéntricas

Estas células son verticales cuyos extremos no están perforados, sus paredes presentan puntuaciones areoladas alternas y están asociadas a los vasos. Las que son de tipo vasculares forman parte de las columnas longitudinales de los vasos, ubicándose en los extremos de dichas columnas, situación que varía dependiendo de la especie. Las de tipo vasicéntrico se ubican a los lados de los vasos (Fig. 2.9).

Como se observa de lo antes descrito, los elementos celulares se arreglan de tal manera que presentan patrones de organización que se reflejan en las características macroscópicas. Es por esto que también es necesario abordarlas en especímenes en las que se observen los planos macroscópicos típicos de las caras transversales, tangenciales y radiales.

La madera de las especies de angiospermas de clima templado presenta, zonas de crecimiento marcadas, tanto microscópica como macroscópicamente

por dos regiones asociadas al régimen de lluvias de verano. Algunas maderas de este grupo, como *Alnus* y *Arbutus*, presentan una zona compuesta por fibras con lúmenes (o cavidades) grandes y otras por fibras de cavidades más pequeñas radialmente comprimidas, ambas dispuestas concéntricamente.

En otras maderas, como es el caso de muchos encinos, es característico encontrar que los vasos son los que varían de anchura dependiendo de la época del año, por lo que se observa que en las regiones donde los vasos presentan grandes lúmenes corresponde a la época de lluvias y conforme se va acercando la sequía, los lúmenes de este tipo de células se van haciendo de menores dimensiones. Aquella zona que se produce en la época de lluvias se conoce como madera temprana o de verano y aquella que se forma en época de sequía se conoce como tardía o de invierno. Ambas zonas de la madera constituyen un anillo de crecimiento.

En el caso de muchos encinos, estos anillos se nombran porosos y, como se mencionó anteriormente, son los responsables de la existencia de la porosidad circular. En el caso de *Alnus* y *Arbutus*, referidos como ejemplos, sus anillos de crecimiento están sencillamente marcados por fibras de madera tardía, de lúmenes pequeños y radialmente comprimidas y la madera temprana por las de lúmenes más grandes. En este caso los vasos no están relacionados con los anillos de crecimiento. En el caso de las coníferas, como el oyamel, son las traqueidas las que marcan la época de lluvias y de sequía, pues al igual que las fibras de *Alnus* y *Arbutus* cambian de dimensiones.

Finalmente el caso de las especies tropicales, la marcación anual no está estrictamente relacionada con fibras o vasos sino con parénquima axial de tipo marginal o en bandas que igualmente dibuja zonas de crecimiento. Los casos de *Caesalpinia* y *Gliricidia* resaltan por la presencia de gran cantidad de extractivos, que las vuelve menos porosas y más densas. Conocer y delimitar estas regiones es importante para identificar las caras en las que se apoyan los estudios macroscópicos. La cara o plano transversal es aquella perpendicular al plano del árbol, la tangencial es longitudinal, paralela a los anillos de crecimiento y perpendicular a los radios y la radial es longitudinal, perpendicular a los anillos de crecimiento y paralela a los radios, esta última atravie a la zona de la médula del tronco. De acuerdo con la Fig. 2.10, se observa que en las caras o planos transversales destacan zonas oscuras y zonas claras dispuestas concéntricamente, que en realidad son los anillos de crecimiento. Estos anillos se pueden observar como líneas paralelas en caras o planos radiales y en aquellas tangenciales los anillos forman Vs invertidas.

Estos tres planos son importantes para entender la anatomía y las pro-

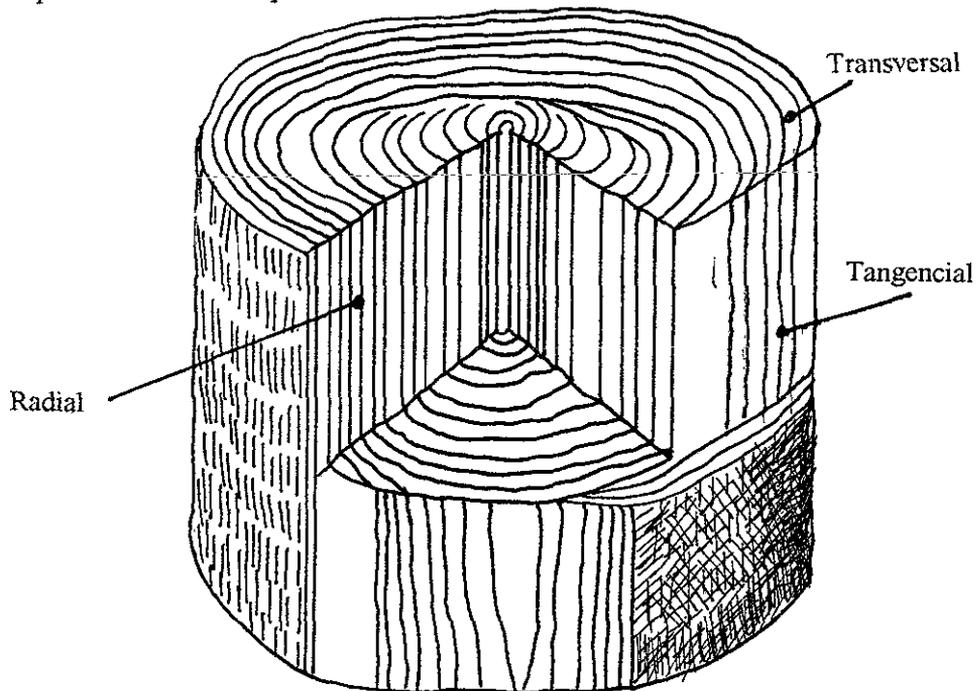


Figura 2.10: Planos macroscópicos de la madera

propiedades físicas y mecánicas de este material. Ciertamente cuando se estudia la madera desde el punto de vista tecnológico en muestras en los que están representados los tres planos, las respuestas a las distintas pruebas serán diferentes. A esta característica se le conoce como *anisotropía*. Si la madera fuera un material homogéneo, entonces sus respuestas serían exactamente las mismas en cualquier dirección, a esto se le conoce como *isotropía*, como en el caso de la mayoría de los metales.

2.2 Aspectos macroscópicos de la madera

Las características macroscópicas se estudian y observan a simple vista o con ayuda de una lupa de 10X. Se reconocen dos tipos de características macroscópicas, aquellas estéticas como el color, olor, sabor y brillo y las que son el resultado de su anatomía como la textura y el hilo. El veteado es un carácter que puede ser el resultado de características estéticas, anatómicas o ambas [52].

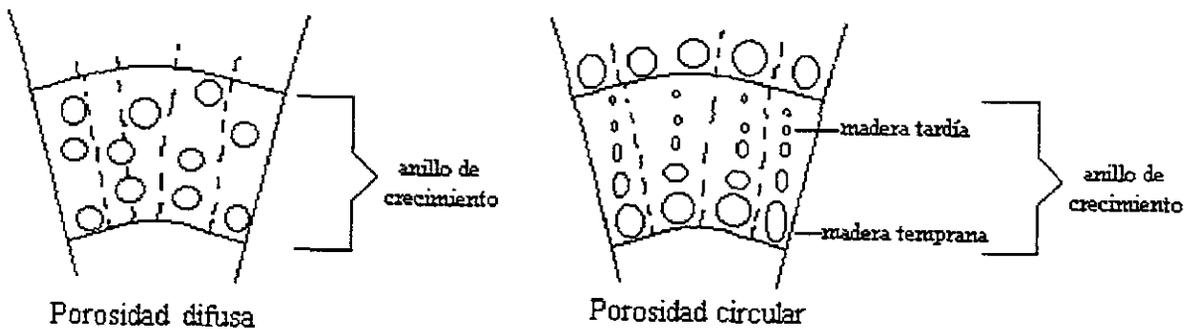


Figura 2.11: Tipos de anillos de crecimiento

Los anillos o zonas de crecimiento

Estas regiones pueden estar marcadas por una o varias hileras de fibras de madera tardía, radialmente comprimidas y por fibras de madera temprana (si se trata de coníferas por traqueidas). Dependiendo del número de fibras de madera tardía, los anillos pueden estar poco marcados o muy marcados, de manera que esto se ve reflejado a nivel macroscópico. Un caso distinto es el que se refiere a los anillos de crecimiento de la madera de encino, el cual está marcado por poros de la madera temprana, que consecuentemente se reconocen microscópica y macroscópicamente como anillos porosos. (fig. 2.11). Por otro lado se denominan zonas de crecimiento aquellas marcadas por bandas concéntricas de parénquima axial y generalmente están presentes en la madera de especies tropicales.

Textura

En ésta característica es importante el tamaño de los elementos constitutivos, por lo que la textura se ve, no se siente. Lo que se ve, son los vasos, el parénquima radial o radios, el parénquima axial o de leño y los anillos de crecimiento. Debido a lo anterior entonces se pueden establecer tres cate-

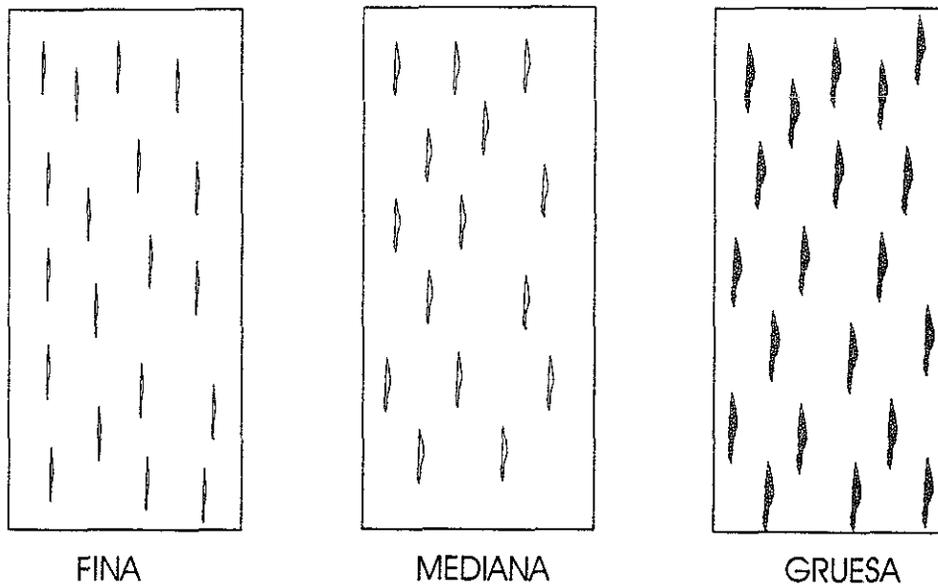


Figura 2.12: Tipos de textura en la madera

rías (Fig. 2.12)

- Textura fina. En la que los elementos constitutivos no se ven a simple vista o acaso con lupa, generalmente son menores a 0.150 mm.
- Textura mediana. En la que los elementos constitutivos se ven a simple vista, sin esfuerzo, y generalmente van de 0.150-0.250 mm de anchura.
- Textura gruesa. En la que los elementos constitutivos son más anchos de 0.250 mm.

Aunque estos intervalos son muy discutibles, generalmente son muy útiles para hacer las comparaciones.

Hilo

El crecimiento de la madera está determinado por la actividad del *cambium vascular*. Esta región meristemática produce además de los elementos horizontales, los verticales. Estos últimos pueden crecer siempre con el eje celular principal paralelo al del árbol, por lo que se produce un hilo “derecho o recto” (dirección de la fibra). Sin embargo este *cambium vascular* puede producir

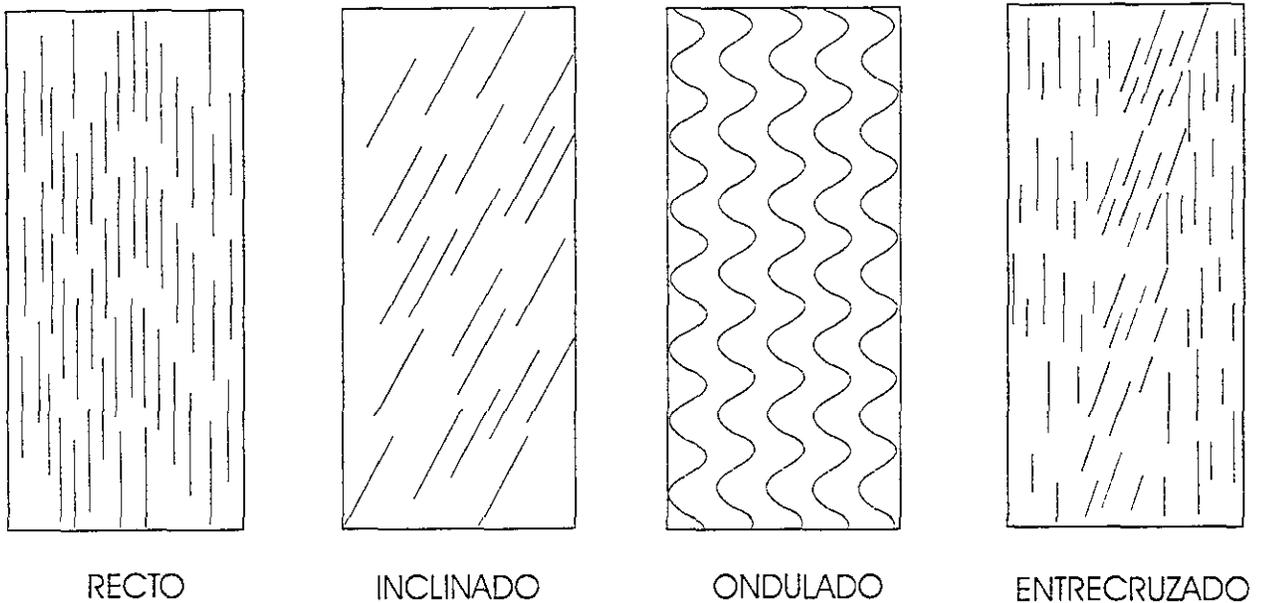


Figura 2.13: Tipos de hilo en la madera

elementos longitudinales cuyos ejes celulares además de crecer en dirección paralela al eje del árbol, crezcan inclinados lo que origina que se vayan alternando zonas con elementos derechos y con elementos inclinados produciendo un hilo *entrecruzado*. Existen otro tipos de hilo: el *ondulado* que se forma cuando la dirección de los elementos celulares se alterna de un lado a otro formando una figura zigzageante. Por otro lado en el hilo *inclinado* la dirección del eje celular forma un ángulo con respecto al eje del árbol. Otro tipo de hilo que es muy común encontrar en las regiones cercanas a los nudos es el *irregular*, que debido a esta posición, está dependiendo de factores de crecimiento como ramas (Fig. 2.13).

Las características antes descritas están relacionadas con la conducción o absorción del sonido y con la capacidad de vibrar o amortiguarlo. La disposición vertical de traqueidas, fibras parénquima axial y vasos así como su abundancia y la orientación con respecto al eje del árbol (es decir el tipo de hilo), puede explicar que los valores de velocidad dados por Bucur (1994) sean más altos (aunque variables entre especies) que los registrados para las velocidades que atraviesan transversalmente la estructura.

Capítulo 3

Propiedades Físicas de la Madera

Como se vió en el capítulo anterior, la madera es un material heterogéneo y anisótropo. Tales características explican algunos fenómenos relacionados con las respuestas acústicas en distintas direcciones, debido a esto, para estudiarse se debe recurrir a sus planos básicos anatómicos y a sus direcciones anisotrópicas. Los parámetros físicos que son de interés conocer y estudiar son aquellos relacionados con las propiedades elásticas, por lo que en este capítulo se revisan los conceptos básicos necesarios para entender como surgen las medidas de los valores elásticos. Por otro lado el conocer estos valores permite calcular los *Módulos de Young*, que son parte de las propiedades mecánicas de este material.

A continuación se definen las variables que se han utilizado y medido en este trabajo para relacionarlas posteriormente con las propiedades acústicas.

3.1 Densidad [43, 42, 45]

Esta variable mide la masa contenida en la unidad de volumen y se calcula de acuerdo con la expresión:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad, m es la masa y V es el volumen. En el sistema de unidades MKSA la masa se mide en kilogramos (kg) y el volumen en metros cúbicos (m^3), por lo que la densidad queda expresada en kilogramos por

metro cúbico (kg/m^3). La densidad de la madera depende del contenido de la pared celular distribuido en todos los elementos que la componen. Asimismo los componentes químicos de la pared estarán influenciando la masa de este material debido a la proporción de ligninas, celulosas, hemicelulosas, pectinas, y otros componentes que forman la compleja estructura de ésta.

3.2 Contenido de humedad [43]

La madera es un material higroscópico, esto es, que intercambia agua con el ambiente. Esta capacidad está directamente relacionada con la ultraestructura, es decir, con los enlaces entre cadenas de celulosa. En este nivel los monómeros de glucosa que forman estas cadenas presentan radicales ^-OH y H^+ que al acercarse forman puentes conocidos como fuerzas de van der Waals [53]. Los enlaces de éstos radicales en realidad forman un tipo de agua: la de constitución. Otro tipo de agua, conocida como *higroscópica*, es la adsorbida de las cavidades celulares, cuyas moléculas se asocian a los espacios ocupados por las fuerzas de van der Waals para formar a continuación, mediante un fenómeno conocido como *solvatación*, zonas con moléculas de agua enlazadas con radicales ^-OH y H^+ , incrementando así las dimensiones y el volumen total de la pared celular. Si se extrae el agua higroscópica, el proceso inverso da lugar a una disminución del volumen de la madera. Otra forma de agua es la libre, ésta destaca porque se encuentra ocupando las cavidades de las células y puede encontrarse en forma de vapor de agua, que es la más común o la líquida. Este movimiento de entrada y salida de agua afecta directamente la densidad del material y otras propiedades mecánicas asociadas con el agua. Resumiendo, el contenido de humedad en la madera es una medida de qué tanta agua existe, básicamente en forma higroscópica o libre en una pieza de madera, de manera que su presencia influye directamente en su densidad y en todas sus propiedades físicas y mecánicas.

El contenido de humedad puede medirse directamente por la diferencia del peso P_1 , madera con humedad, y del peso P_2 , madera secada al horno. Sin embargo, resulta más útil dividir esta diferencia mediante P_2 , ya que así resulta un valor independiente de la cantidad de madera investigada. En este trabajo reportamos el contenido de humedad $C.H$ después de calcularlo utilizando la expresión:

$$C.H = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100, \quad (3.2)$$

3.3 Propiedades elásticas

Al aplicar cargas sobre un sólido se producen todo tipo de deformaciones. Sin embargo, si las cargas son suficientemente pequeñas, entonces las deformaciones que las acompañan, también pequeñas, desaparecen cuando se retiran tales cargas. Es precisamente en estas condiciones en que se pueden definir y medir las principales propiedades elásticas. Hay un límite, que varía de un material a otro, por debajo del cual el comportamiento es elástico. Este límite puede verse desde el punto de vista de la deformación o desde el de las cargas aplicadas. En un caso se tiene la deformación límite y en el otro se habla de esfuerzo límite. Aquí hace falta precisar lo que se entiende por deformación y ver porqué se pasa del concepto de cargas al de esfuerzo. La deformación se manifiesta en el cambio de forma, es decir, en el cambio en las dimensiones de un cuerpo. Al deformar un cuerpo en una dirección es indispensable medir sus dimensiones tanto en la dirección en que se deforma como perpendicularmente. Si se representa mediante l_0 la longitud inicial y mediante l la longitud del cuerpo deformado, se puede definir la deformación ϵ , siguiendo el modelo que se propuso al medir el contenido de humedad, de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l} \quad (3.3)$$

Se puede utilizar esta misma expresión para cuantificar la deformación que ocurre en la dirección "x", en cuyo caso conviene incluir una etiqueta para recordarlo, es decir, escribir ϵ_x , y calcularlo mediante

$$\epsilon_x = \frac{l_x - l_{0x}}{l_x} \quad (3.4)$$

Lo anterior permite medir la deformación en las tres direcciones principales. Para definir el concepto de 'esfuerzo' es indispensable

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

donde F es la fuerza aplicada y A es la superficie en la que está aplicada. De hecho, el resultado depende también de la orientación en el espacio de la superficie en que está aplicada la fuerza. Por tal motivo el esfuerzo es una matriz y no un vector. Aquí conviene hacer notar que cuando la fuerza es paralela al vector perpendicular a la superficie, el esfuerzo correspondiente

tiende a estirar o a comprimir el cuerpo. En tal caso el esfuerzo corresponde a lo que llamamos presión, y se mide utilizando exactamente las mismas unidades, es decir, de fuerza por unidad de área. La unidad para medir el esfuerzo o la presión, es el pascal (Pa), que se define como la presión producida por una fuerza de un newton aplicada sobre una superficie de un metro cuadrado, es decir,

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \quad (3.6)$$

También se le pueden añadir índices al esfuerzo, que establecen en qué dirección actúa la fuerza y cuál es la dirección de la cara en la que actúa. En estas condiciones podemos establecer la ley de Hook:

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.7)$$

donde E es el módulo de Young.

Más abajo se muestra la conexión que existe entre el módulo de Young E , la densidad ρ , y la velocidad del sonido c . Aquí conviene recordar que si se aplica una fuerza en la dirección "a" sobre las caras del sistema perpendiculares a esta dirección, las dimensiones del cuerpo cambian de acuerdo con:

$$\frac{a - a_0}{a} = \frac{\sigma}{E} \quad \frac{b - b_0}{b} = -\sigma \frac{a - a_0}{a} \quad (3.8)$$

La primera ecuación establece que la deformación es rigurosamente proporcional al esfuerzo, mientras que la segunda, relativa a la deformación transversal, establece que es proporcional pero de signo contrario a la deformación a lo largo de la dirección "a". Hay un resultado idéntico para la deformación en la dirección "c". Resumiendo, la elasticidad se refiere a aquellas deformaciones producidas por pequeños esfuerzos sobre un cuerpo sólido, que desaparecen completamente cuando se quitan estos. Las propiedades elásticas son características para cuerpos sólidos por debajo de ciertos límites de esfuerzos, ya que por arriba de éstos, pueden presentarse deformaciones plásticas o rupturas. Las propiedades elásticas están relacionadas con el contenido de humedad presente en la madera e incluso con la composición molecular de ésta, pues el agua higroscópica que representa un $C.H.$ está influyendo directamente en los valores elásticos o de deformabilidad. Por otro lado pequeñas deformaciones impuestas por un cierto periodo de tiempo se pueden convertir en deformaciones plásticas.

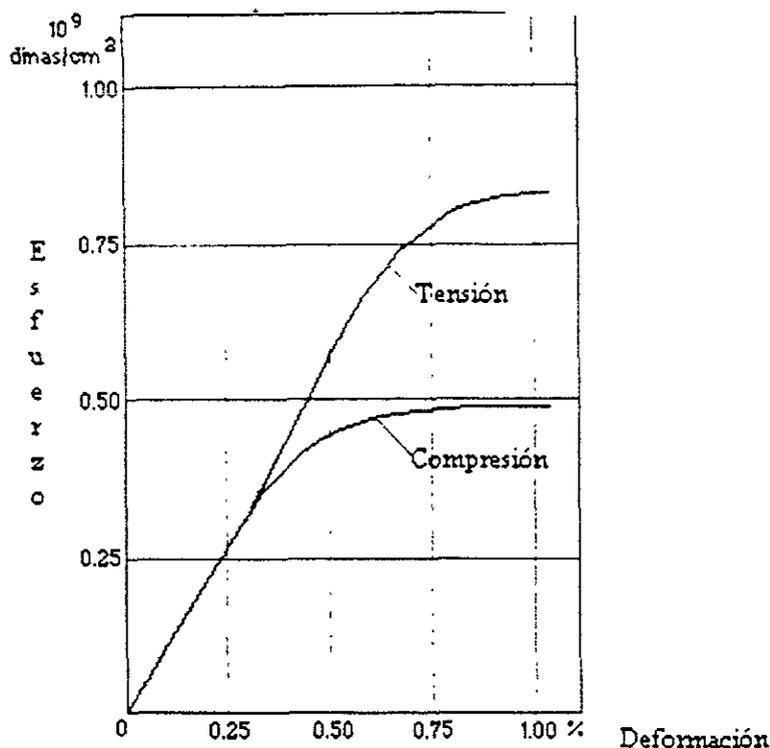


Figura 3.1: Relación entre el esfuerzo y la deformación

En la figura (3.1) se representa una curva Esfuerzo-Deformación, en la que la línea recta representa la región elástica, y en ésta el esfuerzo es rigurosamente proporcional a la deformación. El punto donde la línea se curva se conoce como “Límite proporcional (LP)”: más allá de este punto el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación: si se quita la carga, la pieza no recupera sus dimensiones originales. En la madera el módulo de elasticidad a la tensión y compresión son aproximadamente iguales, pero el límite elástico es considerablemente más bajo a la compresión que a la tensión. De manera general éstos son los valores físicos necesarios para comprender el concepto de elasticidad y la obtención de los módulos de Young que se hacen generalmente con métodos tradicionales destructivos. Con métodos acústicos, los módulos de Young E se pueden determinar midiendo tanto las velocidades de sonido c como las densidades ρ . Esto último se detalla en la siguiente sección.

3.4 Propiedades acústicas

Sonido

Cualquier fenómeno de vibración que genere ondas mecánicas en un medio elástico, con frecuencia entre 16 Hz y 20 kHz (ciclos por segundo) y que por lo tanto se considera audible, se llama sonido. Si un pedazo de madera es golpeado, el material entra en vibración a una frecuencia resonante o natural.

Frecuencias naturales de oscilación

Estas son ciertas frecuencias a las que algún objeto particular responde con una amplitud máxima de vibración. Estas frecuencias son las resonantes o naturales. En la madera es posible reconocer cuatro tipos de movimientos resonantes vibratorios:

- Ondas longitudinales: Cuando el movimiento del material ocurre en sentido paralelo a la misma dirección de propagación.
- Ondas transversales o de corte: Cuando el movimiento del material ocurre en una dirección perpendicular a la dirección de propagación.
- Ondas de torsión: Cuando el movimiento del material es de rotación alrededor de la dirección de propagación.
- Ondas de Flexión: El movimiento que propagan estas ondas corresponde a la deformación producida al flexionar el material.

En cualquiera de estos casos, si no existen fuerzas periódicas externas actuando en el material, el cuerpo vibrante retorna a su condición estática. Gráficamente lo que ocurre es que al alcanzarse la máxima amplitud cuando es golpeado o se hace vibrar el objeto de madera en cualquier modalidad y posteriormente se retira la fuerza externa, la amplitud va decreciendo hasta desaparecer (Fig. 3.4).

Esto se explica debido al hecho de que la energía se va disipando parcialmente por la radiación de sonido y por el amortiguamiento interno, que transforma esa energía mecánica en calor. La velocidad del sonido c_l está dada por la siguiente expresión:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.9)$$

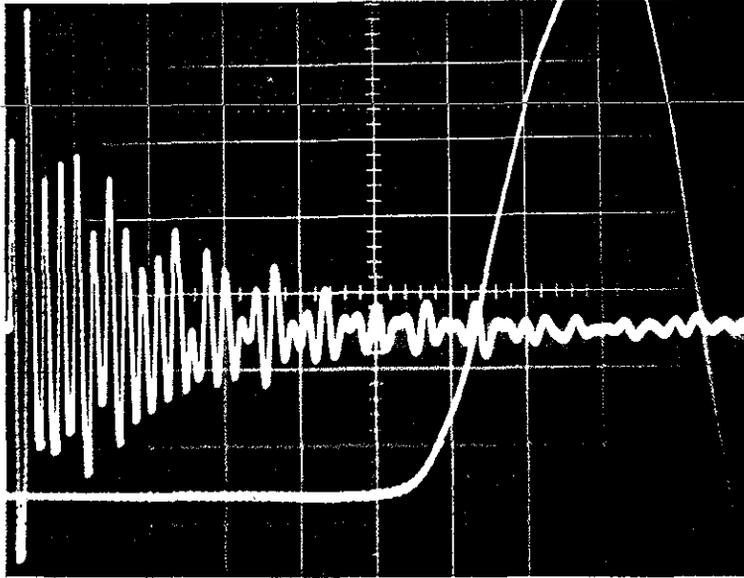


Figura 3.2: Gráfica amplitud vs tiempo de una prueba de vibración libre

donde E es el módulo de Young en Pa (Pascuales) y ρ es la densidad. Esto ocurre cuando se trata de ondas de tipo longitudinal. La velocidad de propagación c_t de las onda transversales, depende del módulo de rigidéz G , está dada por

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.10)$$

Para analizar la anisotropía estructural de la madera en función de los diferentes valores medidos de la velocidad del sonido es necesario calcular los cocientes de tales velocidades en las direcciones radial y tangencial a la de la velocidad axial. Como la densidad ρ no depende de la dirección tenemos:

$$v_{ra}/v_{ax} = \sqrt{\frac{E_{ra}}{E_{ax}}} \quad v_{ta}/v_{ax} = \sqrt{\frac{E_{ta}}{E_{ax}}} \quad (3.11)$$

donde E_{ra} , v_{ta} y E_{ax} son los módulos de Young medidos en las direcciones radial, tangencial y axial respectivamente. La anisotropía es tanto más grande cuanto estos cocientes difieren de 1. La escasa rigidéz (o flexibilidad) en las direcciones radial y tangencial se destaca al observar los valores bajos de estos cocientes.

3.5 Las ondas longitudinales y transversales

Los estados de polarización de una onda pueden comprenderse mediante un experimento muy sencillo, realizado con un alambre, que resulta más fácil de entender si el alambre es delgado, digamos de 0.2 mm de diámetro, y además es largo, digamos de un metro de longitud. Haciéndole un nudo, aproximadamente a la mitad e instalándole tenso entre dos soportes. Se pueden inducir ondas en esa cuerda que se propaguen a lo largo del alambre rascando directamente el nudo con la uña. Con el objeto de describir tales ondas coloquemos un sistema de coordenadas "XYZ", de manera que el eje "X" coincida con el alambre cuando está libre de ondas. Las ondas producidas tienen entonces una dirección de propagación dada por el eje "X". Como se dijo más arriba, se pueden inducir en este alambre ondas de presión rascando el nudo que se hizo previamente. El punto importante es que al rascar el nudo, el desplazamiento producido sobre el mismo puede tener componentes en las direcciones correspondientes a los tres ejes. Si se frota el nudo a lo largo del eje "Y" se producen desplazamientos en el alambre que son paralelos al eje "Y", y que corresponden a ondas que se propagan en la dirección "X". Tales ondas las se pueden representar escribiendo "YX". Si por el contrario, se frota a lo largo del eje "Z" entonces se obtienen ondas que ponen a vibrar el alambre perpendicularmente a las ondas anteriores, y que también se desplazan a lo largo del eje "X". Tales ondas se pueden representar mediante el símbolo "ZX". Todavía se puede frotar el nudo a lo largo del mismo eje "X" y producir ondas que no se pueden ver. A estas ondas se les puede llamar ondas "XX". No se pueden ver estas ondas pero se les podría oír: Si instalamos uno de los extremos del alambre en una hoja metálica, entonces es posible "oir" las ondas. Para esto es necesario tomar la tapa de una lata, hacerle un agujerito en el centro y luego pasar el alambre por el agujero. Para sostener este extremo del alambre bastará con hacerle un segundo nudo. Las ondas "XX" se llaman longitudinales, ya que la dirección en que se frota coincide con la dirección de propagación. Las ondas "YX" y "ZX" se denominan transversales, por producir estados de vibración perpendiculares a la dirección de propagación. Los sólidos presentan, en general, tres direcciones diferentes de vibración para una dirección de propagación dada, sean sólidos cristalinos o no, mientras que los fluidos sólo pueden transmitir ondas longitudinales. Existe otra forma de producir ondas longitudinales en el alambre que se consideró más arriba: basta hablar delante del disco metálico. Sin embargo, para comprobar que hay ondas puede ser necesario montar otro disco

metálico, de la misma manera, en el otro extremo: El conjunto constituye un “teléfono” mecánico. Si en lugar de alambre tenemos un paralelepipedo de madera, los fenómenos son los mismos, aunque el estado vibratorio es tan pequeño que no resulta visible a simple vista. Posiblemente el concepto más importante sea el de la velocidad del sonido. Todas las ondas se desplazan a la misma velocidad, a condición de que sean suficientemente pequeñas, ya que de lo contrario pueden destruir el material o inducir en él alteraciones definitivas. Esta velocidad depende del material y de las condiciones físicas, es decir, de su temperatura y la presión, a las que se encuentra sometido. También depende de la polarización de las ondas, siendo máxima en el caso de las ondas longitudinales. Representemos mediante c_l y c_t las velocidades del sonido correspondientes a las ondas longitudinales y transversales respectivamente. En el caso de un material homogéneo e isótropo, en el caso de ondas rigurosamente planas, tales velocidades están dadas por:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1 - \sigma)}{\rho(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}} \quad (3.12)$$

Capítulo 4

Metodología

4.1 Procedencia del material

El material estudiado procede de once árboles de diferentes taxa, recolectados en distintos tipos de vegetación como se muestra en la Tabla 4.1.

Especie	N. común	Familia	Procedencia	Registro
<i>Alnus acuminata</i>	ailite	Betulaceae	Jalisco(p)	UAMIZ-M60
<i>Alnus jorullensis</i>	ailite	Betulaceae	Puebla(p)	UAMIZ-M57
<i>Carpinus caroliniana</i>	mora	Betulaceae	Jalisco(m)	UAMIZ-M65
<i>Tilia mexicana</i>	cirimo	Tiliaceae	Jalisco(m)	UAMIZ-M56
<i>Clethra mexicana</i>	palo rojo	Clethraceae	Jalisco(p)	UAMIZ-M59
<i>Arbutus glandulosa</i>	madroño	Ericaceae	Puebla(p)	UAMIZ-M61
<i>Quercus crassifolia</i>	encino	Fagaceae	Puebla(p)	UAMIZ-M71
<i>Caesalpinia platyloba</i>	palo colorado	Leguminosae	Q. Roo(s)	UAMIZ-M2
<i>Gliricidia sepium</i>	mataratas	Leguminosae	Q. Roo(s)	UAMIZ-M39
<i>Abies</i> sp	oyamel	Cupressaceae	Puebla(o)	sin registro

Tabla 4.1: Vegetación de Procedencia. Bosque de pino-encino (p), Mesófilo (m), Selva Alta Perennifolia(s), oyamental (o)

La selección de las siete primeras especies se basó en su amplia distribución y abundancia en las zonas templadas de las dos entidades, indicadas en la Tabla 4.1. Las muestras de las especies tropicales provienen de tablillas depositadas en la Xiloteca de la UAM-Iztapalapa. Cada especie

está representada por un árbol y sus ejemplares de herbario se encuentran depositadas en UAMIZ, el Herbario Metropolitano de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa [54], a excepción de las probetas provenientes trozo de *Abies* que se consiguió en un establecimiento que compra madera en rollo proveniente del estado de Puebla, por lo que no existe respaldo de tablillas en la Xiloteca, ni de herbario. Exceptuando el oyamel, todos los árboles, que representan las especies que fueron estudiadas aquí, provienen de las colectas realizadas en los años de 1992 y 1994, con las que se hicieron los estudios anatómicos descriptivos. Estos árboles tenían fustes rectos, con diámetros a la altura del pecho de 25 cm y alturas de 8 a 10 m. Cada árbol se seccionó para obtener trozas de 1 m de largo, aproximadamente, para después obtener las probetas en las cuales estudiar algunos caracteres anatómicos cuantitativos así como para medir las velocidades de sonido y calcular valores mecánicos (Figs. 4.1,4.2).

4.2 Procesamiento del material

Para las primeras siete especies de la Tabla 4.1, fué seleccionada una troza de 30 cm de largo a una altura de 60 cm por encima del tocón. De cada troza se obtuvieron piezas rectangulares de 30 cm de largo que se sumergieron en una solución de permatox durante dos semanas, para prevenir el crecimiento de microorganismos. Del extremo de cada piezas rectangular se obtuvieron cubos de 1x1 cm y astillas con los que se trabajaron aspectos anatómicos microscópicos cuantitativos como: No. de hileras de fibras de madera tardía, No. de poros x mm², dimensiones de los vasos, fibras y radios.

También se obtuvieron las características cualitativas como: tipo de porosidad, arreglo de poros, tipo de puntuaciones en los vasos, placa perforada escaleriforme, tipo de radios. El resto del material se dimensionó para obtener probetas de 25 x 3 x 1 cm siguiendo las consideraciones sugeridas por Haines [18] y por Schelleng [19], los cuales proponen especímenes de forma rectangular con el eje axial más largo, para el encino y el oyamel se elaboraron probetas también rectangulares pero con el eje transversal mas ancho, como se muestra en la (Fig. 4.2). Con las muestras de xiloteca se estudiaron las características macroscópicas: textura, hilo, y visibilidad de elementos. Para la textura e hilo se siguió a Tortorelli [52].

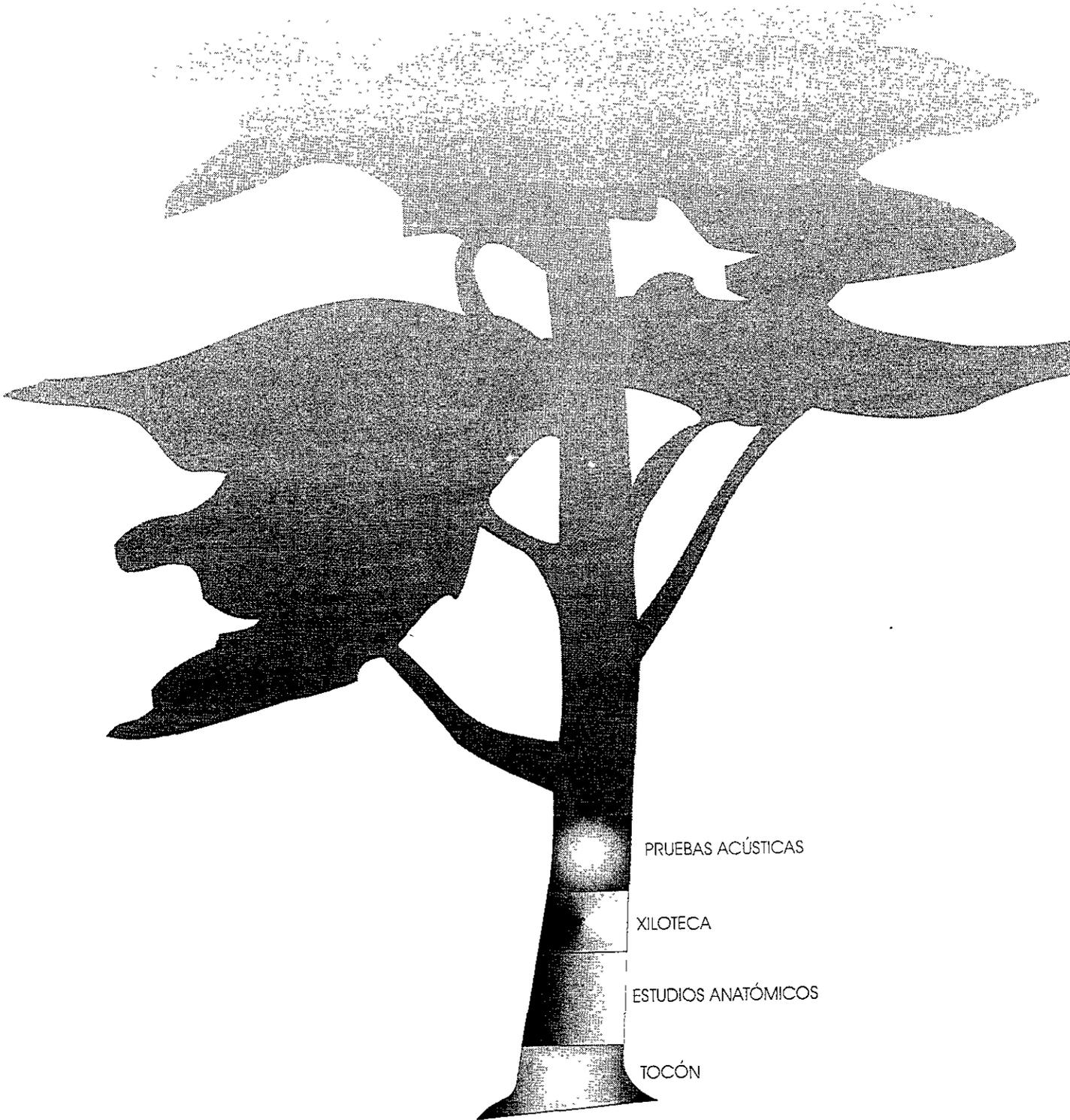


Figura 4.1: Fuste

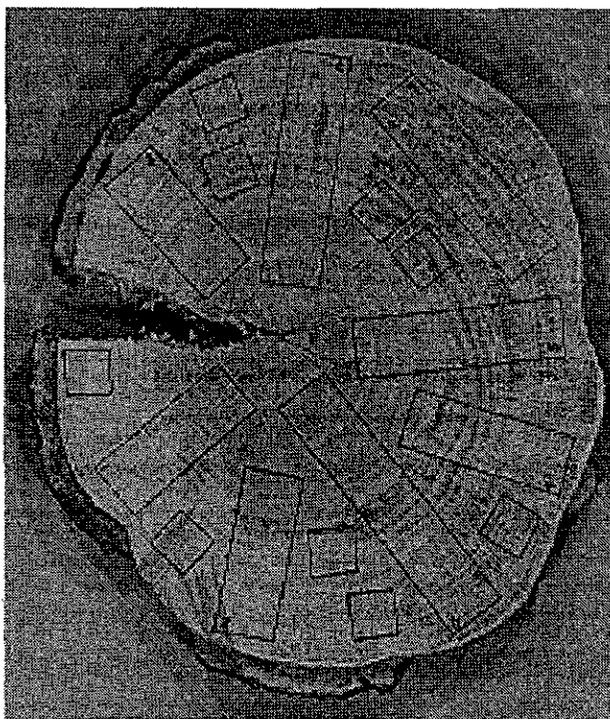


Figura 4.2: Muestreo del árbol para obtener los dos tipos de probetas



Figura 4.3: Procesamiento del material

4.3 Estudios anatómicos

Para medir y describir los caracteres anatómicos cuantitativos y cualitativos fue necesario elaborar preparaciones fijas y material disociado que requieren de los siguientes procedimientos.

Preparaciones fijas

De cada probeta destinada a pruebas acústicas se obtuvo un cubo de 1X1 cm. Estos cubos se ablandaron en una solución de etilendiamina al 4%. Cuando estuvieron listos se colocaron en el xilotomo de deslizamiento para obtener cortes de aproximadamente 25 micras, de las tres caras típicas: transversal, tangencial y radial. Algunos de estos cortes se pasaron por una solución de agua-hipoclorito 1:1. Posteriormente se lavaron y tiñeron con verde iodo.

El colorante se removió con agua destilada e inició el proceso de deshidratación: las muestras se pasaron por recipientes con diferentes concentraciones de alcohol durante 5 minutos en cada uno, comenzando por el de 50%, después los de 70%, 80%, 96% y absoluto, finalmente se pasaron por xilol durante 2 minutos para aclarar. Los cortes se colocaron en portaobjetos, cubriéndolos en resina sintética y con cubreobjetos [56].

Material disociado

Este se obtuvo a partir de astillas provenientes de las probetas aún no dimensionadas destinada a pruebas acústicas. Los extremos de las probetas se cortaron posteriormente para obtener el valor de densidad relativa, así como el contenido de humedad. Para disociar las astillas se colocaron en tubos de ensaye con una solución de Jeffrey (ácido crómico-ácido nítrico) al 50%. Esta solución desintegra la lámina media, esto es, el material cementante que permite mantener unidas a las células, haciendo que éstas se separen. Las astillas se lavaron con agua destilada y se tiñeron con pardo de Bismarck durante un día. Se volvieron a lavar con agua destilada y se montaron en gelatina glicerinada [57]. En las caras transversales de las preparaciones fijas se observaron y describieron los anillos de crecimiento, la porosidad, el tipo y la forma de los poros, así como el parénquima axial; se contó el número de poros y se midió el diámetro tangencial de éstos. En las caras tangenciales se describieron las paredes de los elementos de vaso, los engrosamientos helicoidales (si había) y el tipo de parénquima radial (radios), así mismo se

midió la longitud de los vasos, la altura y la anchura de los radios.

En las caras radiales se describieron las puntuaciones de vaso-radios, las placas perforadas de los elementos de vaso y la composición celular de los radios. En el material disociado se midieron: la longitud, el diámetro y el grosor de la pared celular de las fibras y el tipo de puntuaciones que presentan. También se verifica la longitud de los elementos de vaso. La denominación de los caracteres se hizo con base en las proposiciones sugeridas por Chattaway [58] y los Comités de la IAWA [59, 60, 41]. Las propiedades acústicas se midieron de acuerdo como se describe en la siguiente sección.

Pruebas Histoquímicas

Las reacciones histoquímicas no enzimáticas, son aquellas que permiten reconocer algunos compuestos químicos de las paredes celulares y ayudan a entender la blandura o dureza de una pared celular. Con algunos cortes transversales se hicieron dos pruebas. Para lignina se usó la tinción con azul de Toluidina y fluroglucinol y para celulosa y polisacáridos carboxilados de la pared celular (pectinas y hemicelulosas) con azul de Toluidina (Krishnamurty, 1988). Los resultados sobre la presencia o ausencia de estos componentes están expresados en términos de intensidad a través del símbolo +, en una Tabla y fotos comparativas.

4.4 Estudios acústicos

Las primeras ocho especies tuvieron probetas del tipo A y sólo *Quercus* y *Abies* del tipo B. Para *Caesalpinia* y *Gliricidia* se usaron especímenes de la xiloteca que tienen dimensiones de $15 \times 7 \times 1$ cm que también se emplearon para medir sus valores acústicos en planos anatómicos tangenciales y radiales. Las probetas de tipo A tuvieron dimensiones de $25 \times 3 \times 1$ cm y las de tipo B tuvieron dimensiones variables.

La densidad del material se determinó midiendo las dimensiones de los paralelepípedos y obteniendo sus pesos. Por otro lado para continuar con la explicación metodológica de este tipo de trabajo será necesario revisar lo que son los transductores.

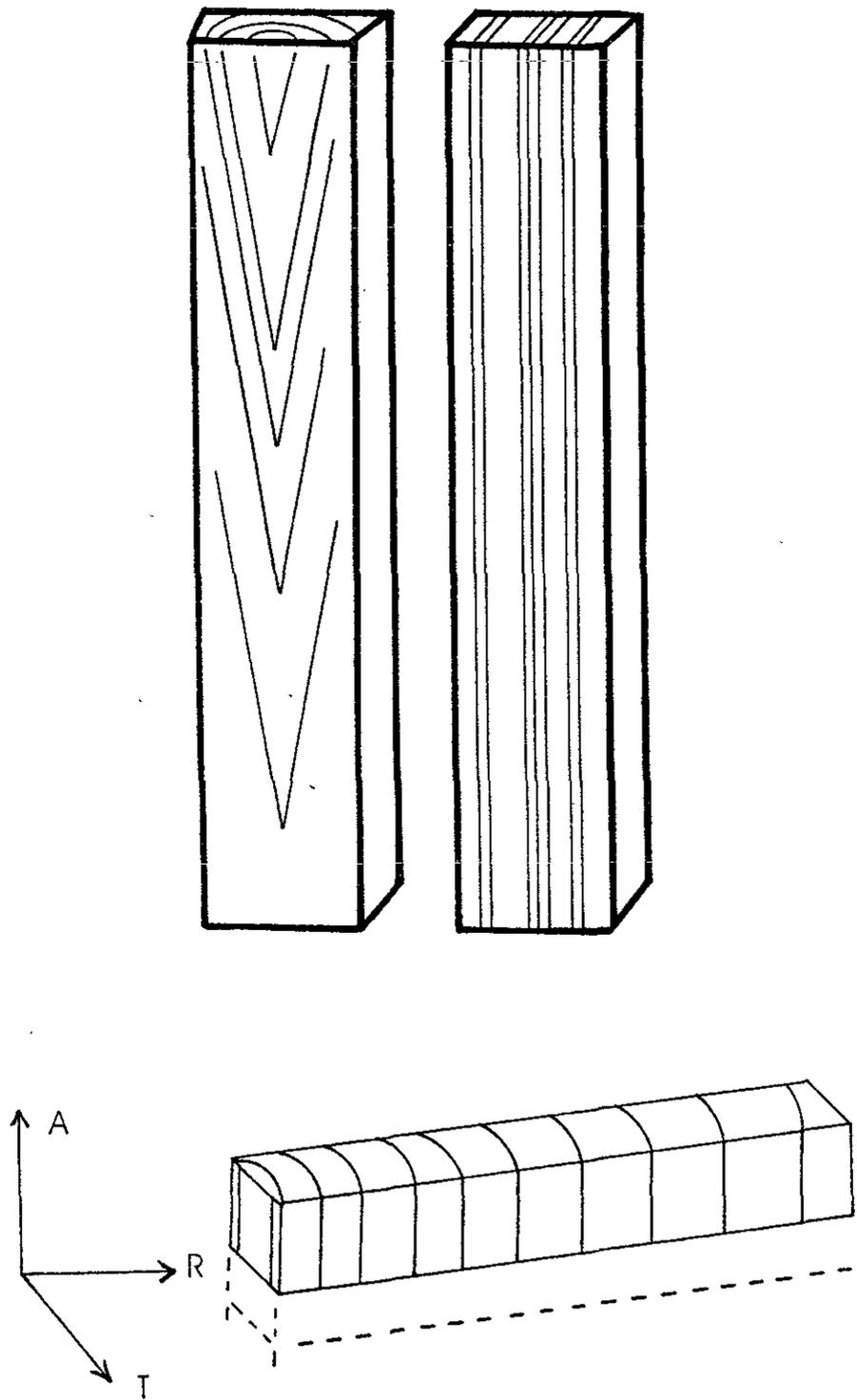


Figura 4.4: Direcciones anisotrópicas para las probetas (A y B)

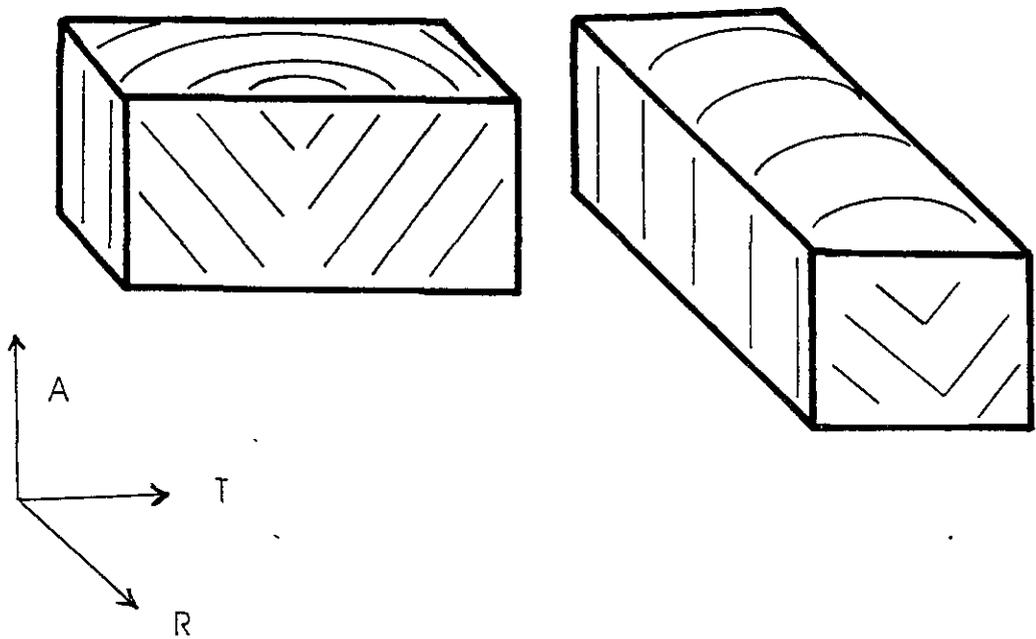


Figura 4.5: Direcciones anisotrópicas para las probetas (C y D)

4.5 Los Transductores

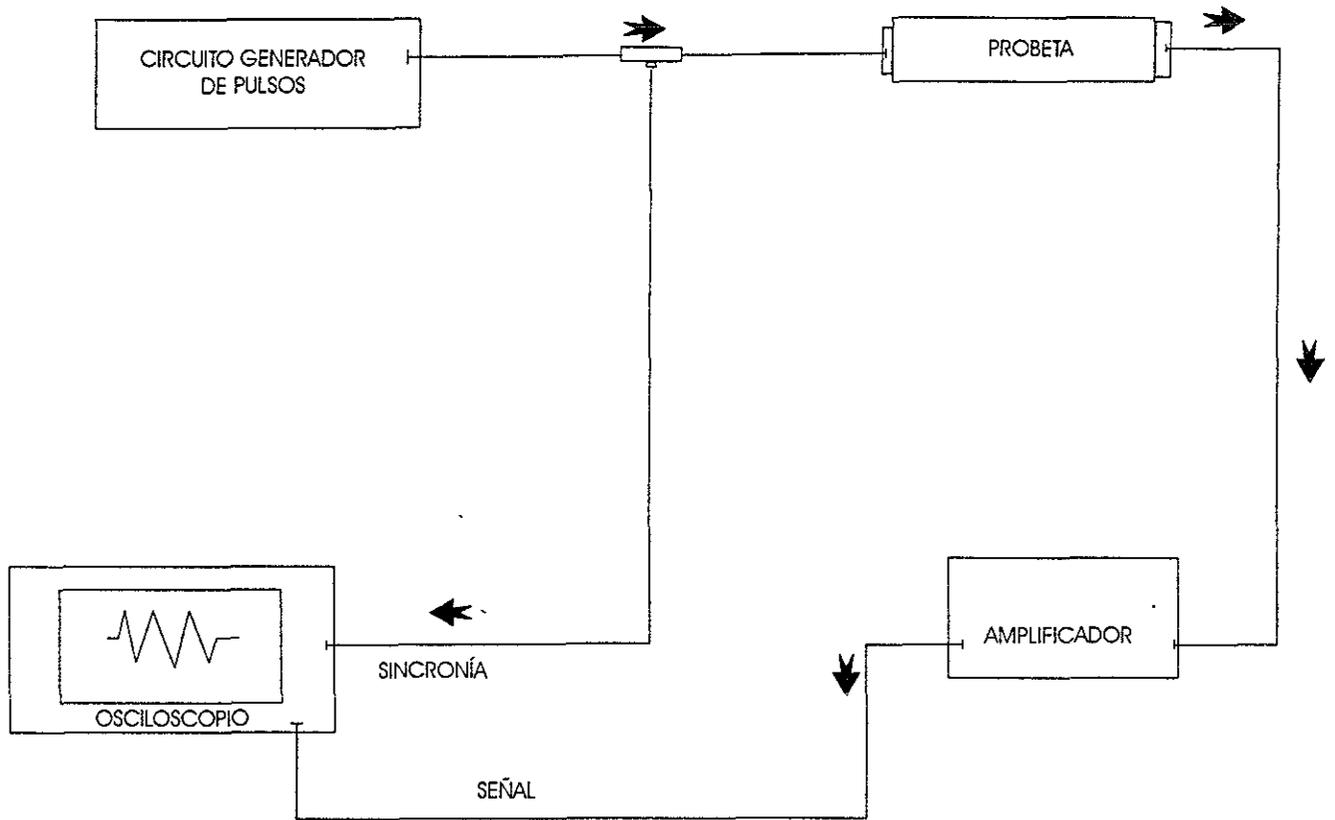
Los transductores se utilizan para producir y recibir las ondas acústicas. Los que se emplearon para realizar este trabajo están formados por un disco de cerámica piezoeléctrica colocada entre dos discos metálicos que desempeñan el papel de electrodos. Uno de estos discos es de acero, de 20 mm. de diámetro y de 0.2 mm de espesor. Cuando se conectan tales electrodos a las terminales de una batería, la diferencia de potencial eléctrico aplicada a la cerámica hace que ésta modifique ligeramente su espesor, ya sea aumentando o disminuyendo. Si se invierte la polaridad de la batería ocurre exactamente lo contrario. Supongamos que representamos mediante η el espesor del disco de cerámica cuando el conjunto no está conectado a la batería, y mediante η' cuando se conecta a la batería. Si se conecta la batería de manera que la cerámica se estire tendremos $\eta' > \eta$, entonces el hecho de conectar repentinamente los electrodos se traduce en que la cerámica empuja rápidamente el disco de acero, lanzándolo. El disco ya lleva una cierta velocidad cuando la cerámica alcanza el espesor η' , por lo que el disco de acero continúa estirando el disco de cerámica más de lo debido, hasta que finalmente se para, cuando tal espesor es η'' . Como el espesor de la cerámica es mayor que η' , la cerámica se encuentra jalando el disco. En ese instante se pone en movimiento el disco pero ahora en sentido contrario, comprimiendo el disco de cerámica y nuevamente, al pasar por el espesor η' que le corresponde a la cerámica, de acuerdo con la diferencia de potencial de la batería, el disco se encuentra en movimiento, comprimiendo la cerámica más y más, hasta que se para, alcanzando un espesor mínimo de η''' . Si no hubiera pérdidas por fricción el espesor del disco de cerámica se mantendría oscilando, entre η''' y η'' . Sin embargo, en efecto tales fuerzas y el espesor del disco de cerámica termina por alcanzar un valor constante, precisamente el que mencionamos más arriba, η' .

Este fenómeno es idéntico al que ocurre con un péndulo: Si se le da un golpe comienza a oscilar de manera que la amplitud de sus oscilaciones va disminuyendo hasta desaparecer por completo. Las ondas acústicas que se utilizaron en este trabajo se produjeron conectando estos transductores a una batería de 14 volts y se encontró un máximo de eficiencia al conectar la batería durante un periodo de $17 \mu s$ y repitiéndolos cada 40 ms. De esta manera se produjeron los pulsos usados en el trabajo. En el caso de estos transductores la frecuencia de oscilación corresponde aproximadamente a 7 kHz, rigurosamente audible, cercana a la nota más aguda del piano. Cuando

se pone uno de estos transductores en contacto con una muestra de madera no se induce nada observable. Para poder inducir una onda en tales materiales es indispensable, además de contar con una superficie lisa, “mojar” el contacto mecánico entre el transductor y el material. Para esto se puede utilizar aceite espeso o un champú. Aquí se usó gel de carboximetilcelulosa (CMC) que tiene la ventaja de ser inocuo. El objetivo es utilizar un “acoplante” que no dañe las superficies de los transductores y los especímenes de madera.

Ahora, si se coloca uno de estos transductores en contacto con una de tales especímenes de madera, efectivamente se induce una onda acústica en ellos. Para constatar que efectivamente es el caso, todo lo que hay que hacer es colocar un transductor idéntico, del otro lado de la muestra, conectándolo directamente al osciloscopio. El primero de estos transductores hace las veces de “emisor”, mientras que el segundo, de receptor. El emisor hace el papel de una “bocina” mientras que el receptor, de un “micrófono”. No se usan los términos de bocina y micrófono por que el uso los identifica con las ondas acústicas en el aire y aquí se está trabajando con ondas acústicas en materiales porosos. Aquí puede verse que el funcionamiento del “receptor”, que no es sino otro transductor idéntico, es exactamente el opuesto del emisor: Las ondas mecánicas incidentes sobre el disco de acero del receptor son transmitidas a su disco de cerámica, deformándolo, lo que da lugar a un campo eléctrico, y por lo tanto a una diferencia de potencial entre sus electrodos, que se hace visible mediante el osciloscopio antes mencionado. El osciloscopio es una ayuda invaluable, ya que permite observar los desplazamientos microscópicos del disco de acero del transductor, y esto gracias a las diferencias de potencial producidas por la cerámica. De esta manera se puede conocer la forma de la onda que llega al receptor y medir dos propiedades de ella, muy importantes: El primero es el tiempo que se tarda la onda en llegar, desde que es emitida por el emisor, hasta que es recibida por el receptor. De allí calculamos la velocidad del sonido mediante el cociente de la distancia recorrida al tiempo empleado. La otra propiedad importante es la amplitud de la onda recibida. Tal amplitud disminuye conforme aumenta la distancia recorrida, ya que en parte, la onda va perdiendo energía conforme es absorbida por el material. Cuando la amplitud de onda es demasiado pequeña es indispensable colocar un amplificador entre el transductor receptor y el osciloscopio, ya que de lo contrario no se observa nada.

Montaje: las probetas se sitúan horizontalmente, de manera que se puedan colocar los transductores en posición plana sobre los cantos de las caras transversales. Uno de los transductores es responsable de mandar el pulso



PRODUCCIÓN Y DETECCIÓN DE PULSOS:
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO

Figura 4.6: Montaje para medir velocidad de sonido

y el otro de recibirlo. Cuando se obtiene la respuesta en el osciloscopio, se observa una señal en la que se pueden distinguir dos zonas (cf. Fig. 4.7), la [zona a] y la [zona b]

La zona a Es la señal del tiempo que tarda el pulso en viajar de un extremo a otro.

La zona b Es la señal producida por muchos pulsos imbricados o sobrepuestos.

La pantalla del osciloscopio está dividida en 10 columnas y 10 filas, cada una tiene un valor según la calibración y el tiempo al que se este barriendo la señal, de manera que el tiempo se calcula multiplicando el número de divisiones de la pantalla del osciloscopio por el tiempo de barrido y entonces la velocidad será, la longitud de la pieza de madera entre el tiempo calculado. Esta velocidad es producida por un pulso que hace que el material piezoeléctrico que forma el medio elástico del transductor, se mueva de manera paralela a la dirección de la onda por lo que es una velocidad en sentido axial, producida por ondas longitudinales, y como viaja en sentido axial, se ha abreviado VLA. Por otro lado como la madera es un material anisotrópico (página 25), entonces fue necesario medir este mismo tipo de velocidades en sentido tangencial y en sentido radial, así que sus abreviaciones fueron: VLT y VLR respectivamente. Otro tipo de medición es aquella con la que se obtiene la velocidad de sonido producida por ondas transversales (página 34). Para producir este tipo de ondas, los transductores se colocan en los cantos de las caras transversales de la probeta tipo "B" como se muestra en la Figura 4.8; esta posición permite que el pulso mandado haga que el material piezoeléctrico del transductor vibre perpendicularmente a la dirección de la onda.

Para obtener estas velocidades la forma de éstas probetas (Figura 4.5) permite hacer seis tipos de mediciones que hacen que el medio vibre (la probeta) en las siguientes direcciones: axial-tangencial (TAT), axial-radial (TAR), radial-axial (TRA), radial-tangencial (TRT), tangencial-axial (TTA) y finalmente tangencial-radial (TTR). Con las velocidades de sonido y las densidades se calculó el Módulo de Young para cada pieza de madera, de acuerdo con las ecuaciones 3.1 y 3.9.

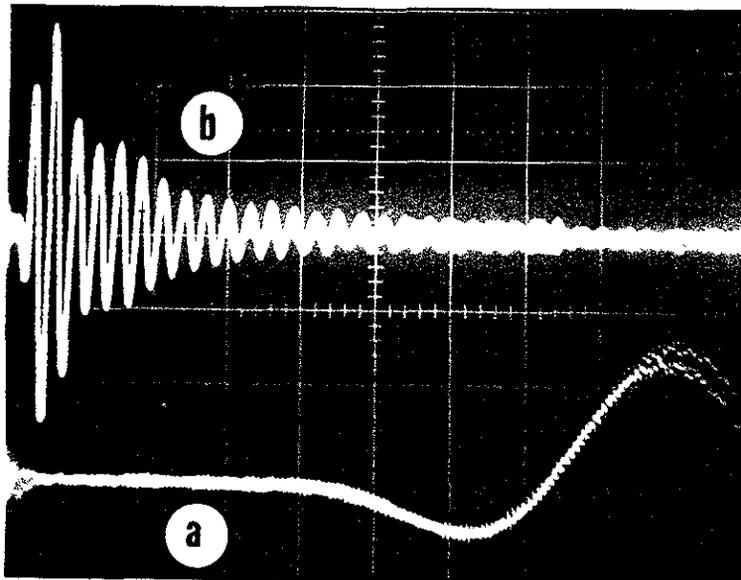


Figura 4.7: Señal registrada en el osciloscopio

Capítulo 5

Resultados y Discusión

Las especies aquí estudiadas presentan una arquitectura interna que puede explicar algunas de las distintas respuestas acústicas que se encontraron (Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6,5.7, 5.8, 5.9,5.10).

Cuando a la madera se le inducen ondas en sentido axial, ésta se comporta como un filtro [21] en el que las paredes celulares proveen un camino continuo para la onda y la cual probablemente choca con los extremos de las traqueidas (coníferas) o con las fibras o vasos (angiospermas). El camino por el cual puede transitar la onda debe depender del diámetro y longitud de traqueídas o de fibras y vasos. Es probable que también el grosor de las paredes celulares de estos elementos influyan en ese tránsito, pues dependen de sus dimensiones, composición química y presencia o ausencia de extractivos. Por esta situación resulta interesante presentar de manera comparativa las características anatómicas para relacionarlas posteriormente con las acústicas que se estudiaron.

5.1 Anillos de crecimiento

Algunas de las especies presentan este carácter, marcadas por un número variable de hileras de fibras radialmente comprimidas (Tabla 5.1).

Las velocidades radiales y tangenciales pueden estar influidas por zonas de fibras de madera tardía, que, por las mayores dimensiones de sus paredes y sus lúmenes más pequeños, alteren las propiedades de transmisión del medio. Es posible que la gran cantidad de este tipo de células en *Abies*, sea la causa de sus bajas velocidades radiales.

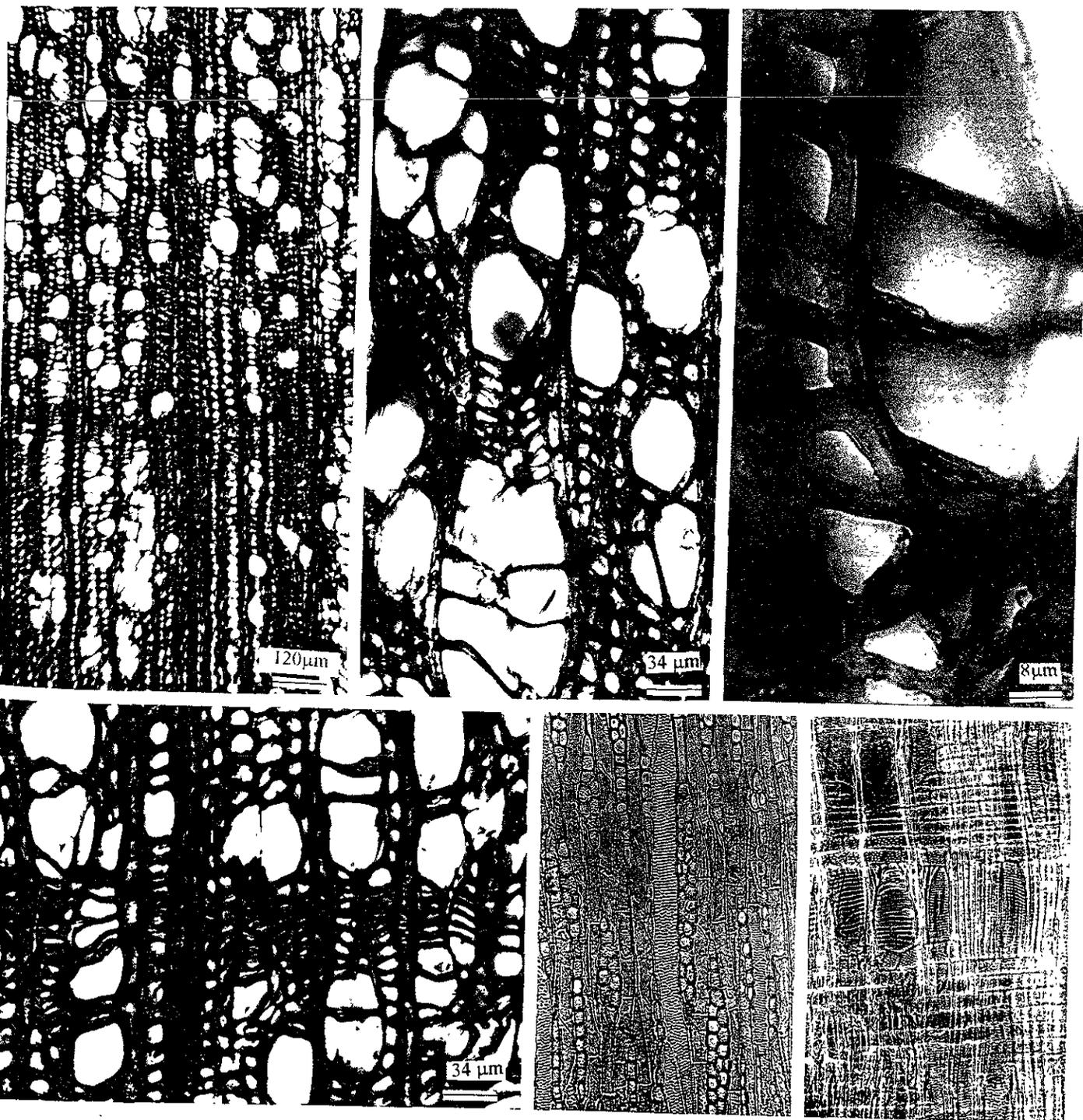


Figura 5.1: Estructura microscópica de la madera de *Alnus acuminata*.

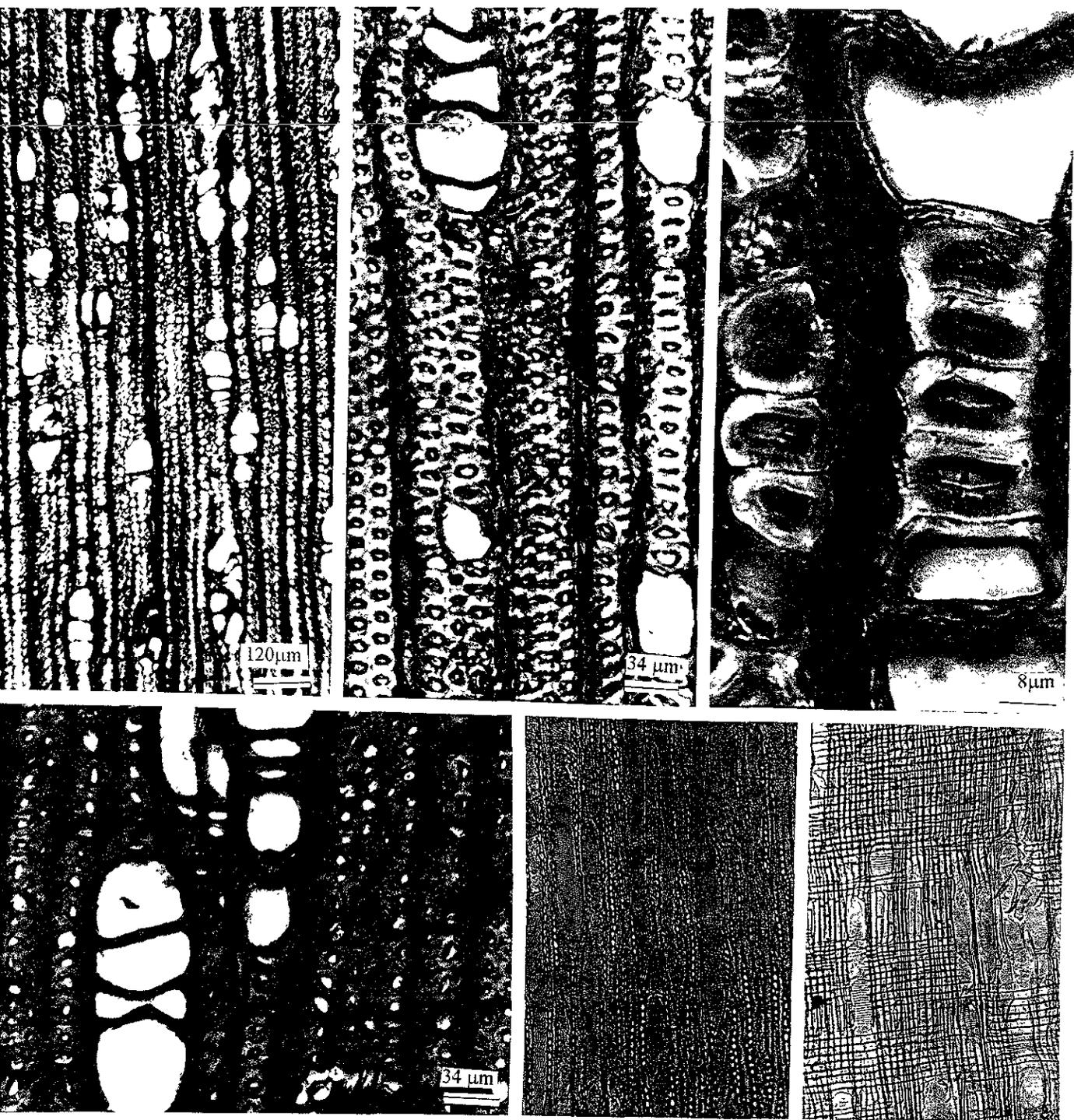


Figura 5.2: Estructura microscópica de la madera de *Alnus jorullensis*.

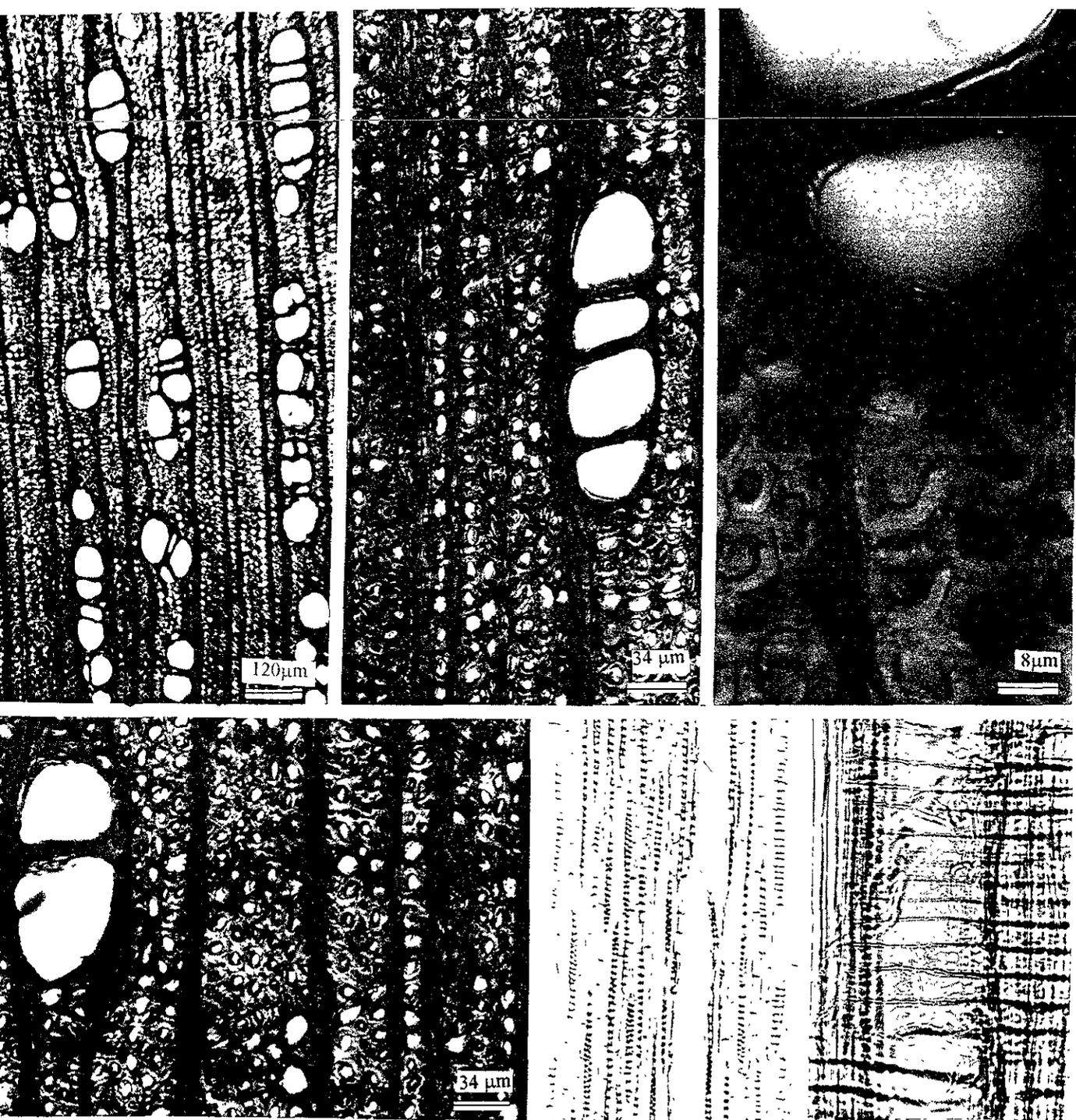


Figura 5.3: Estructura microscópica de la madera de *Carpinus caroliniana*.

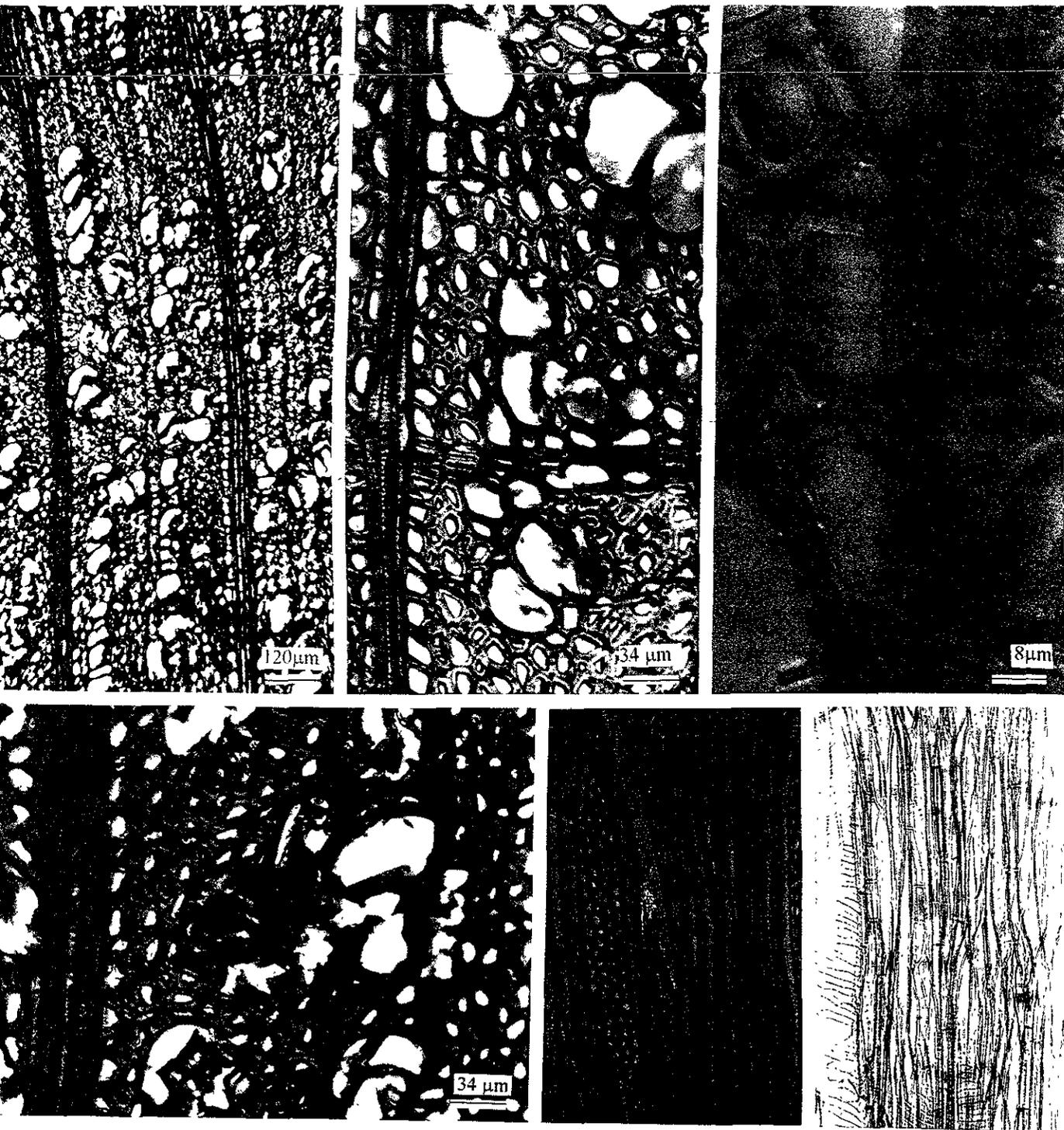


Figura 5.4: Estructura microscópica de la madera de *Tiha mexicana*.

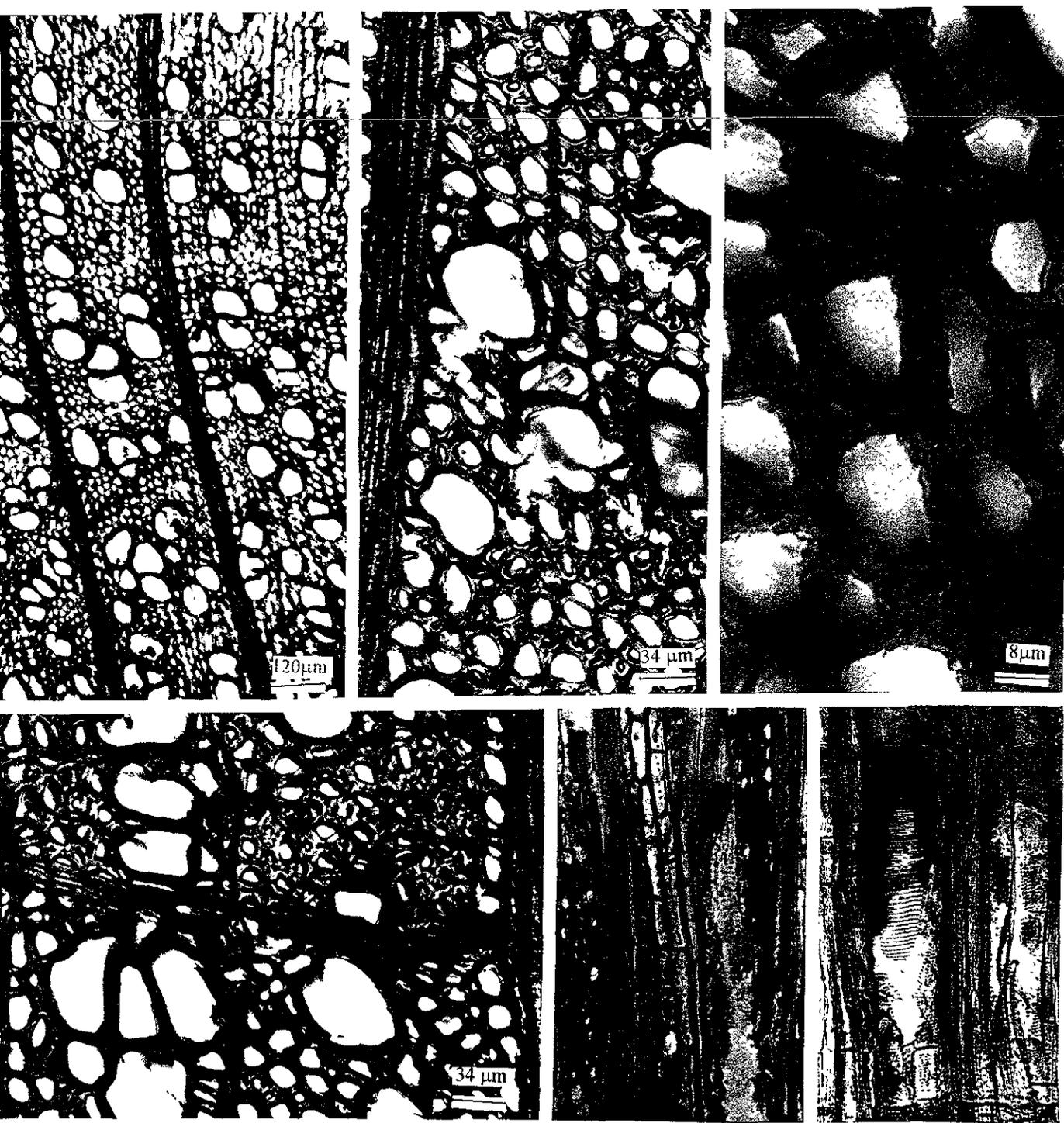


Figura 5.5: Estructura microscópica de la madera de *Clethra mexicana*.

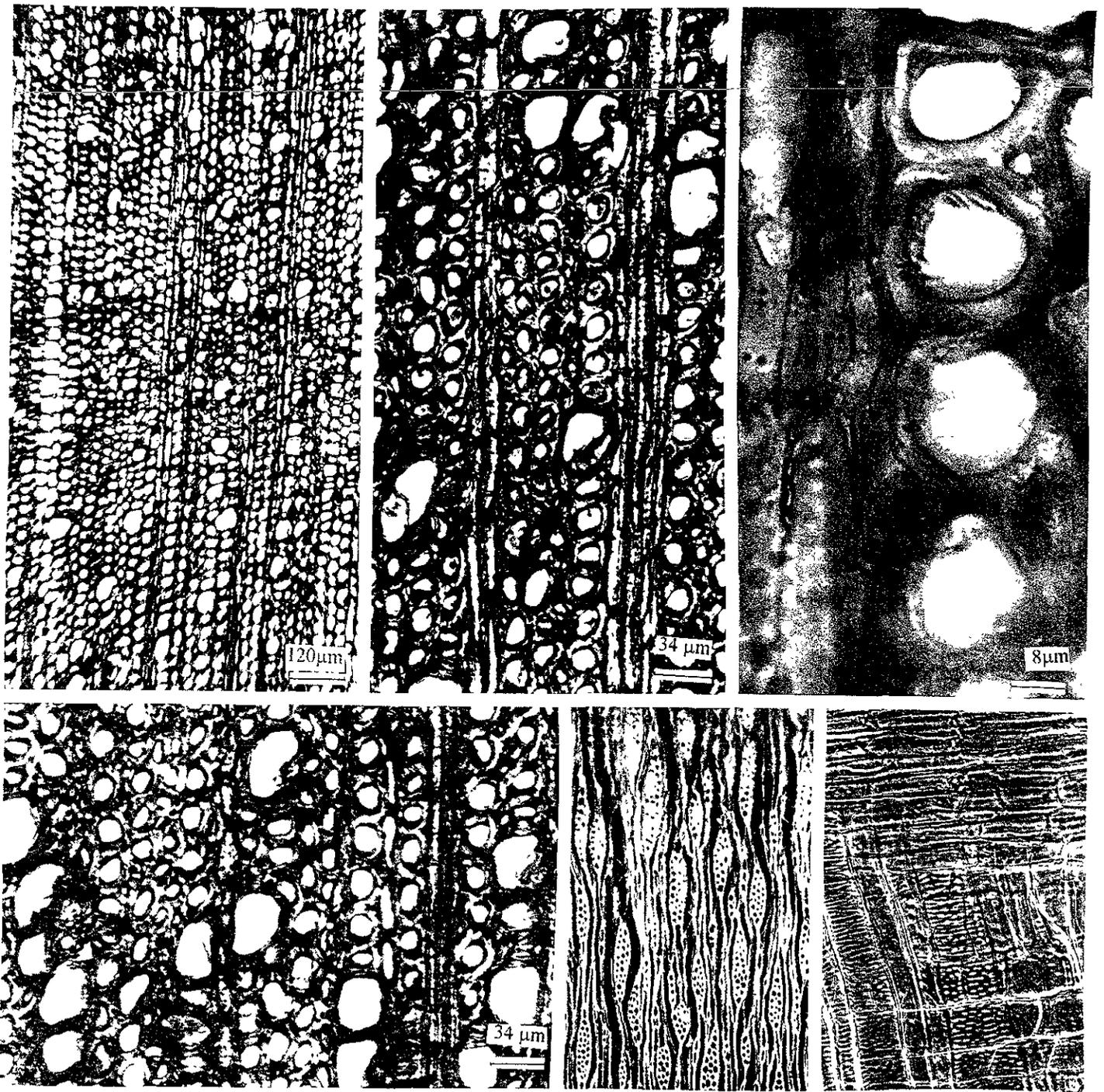


Figura 5.6: Estructura microscópica de la madera de *Arbutus glandulosa*.

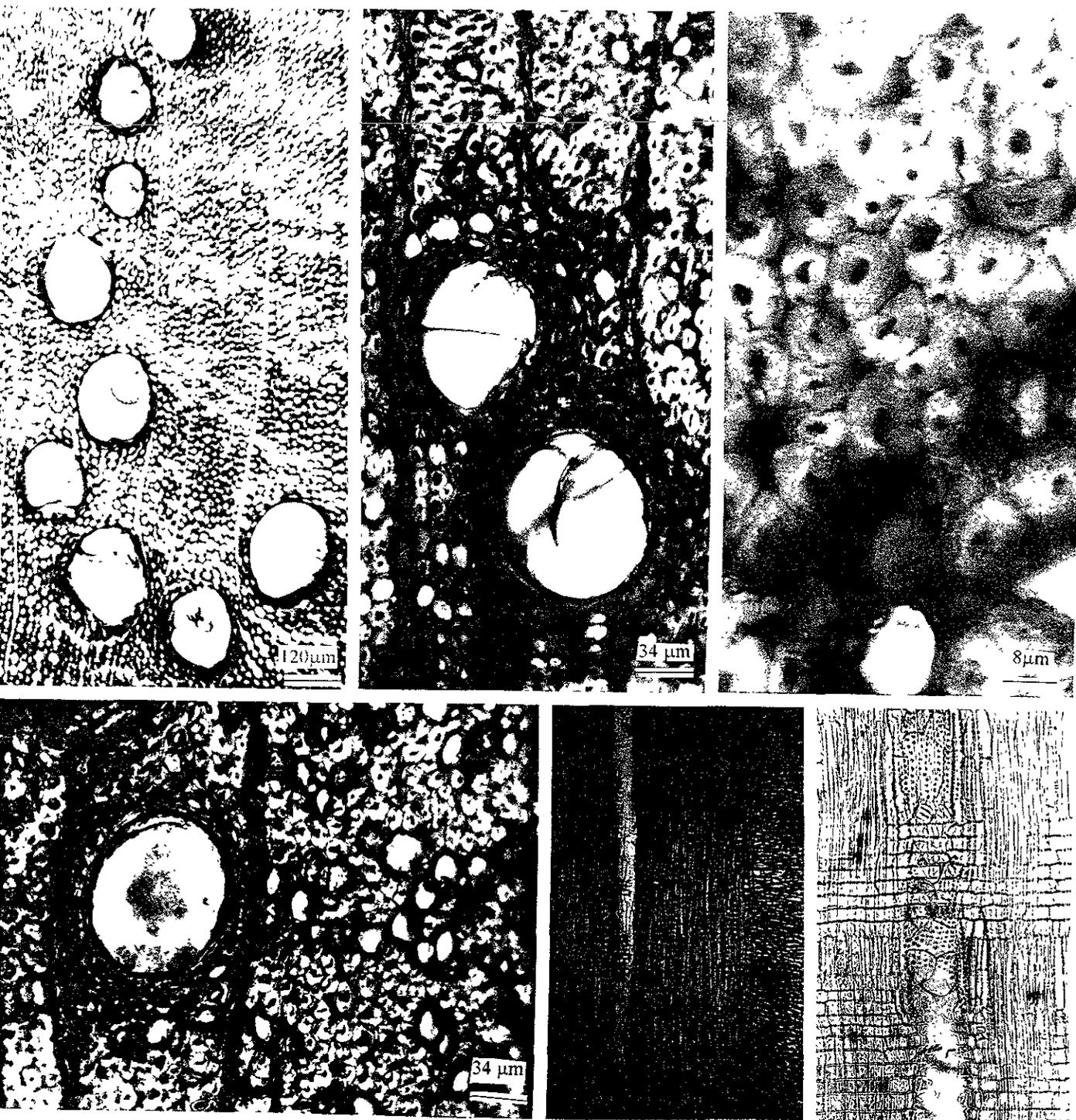


Figura 5.7: Estructura microscópica de la madera de *Quercus crassifolia*.

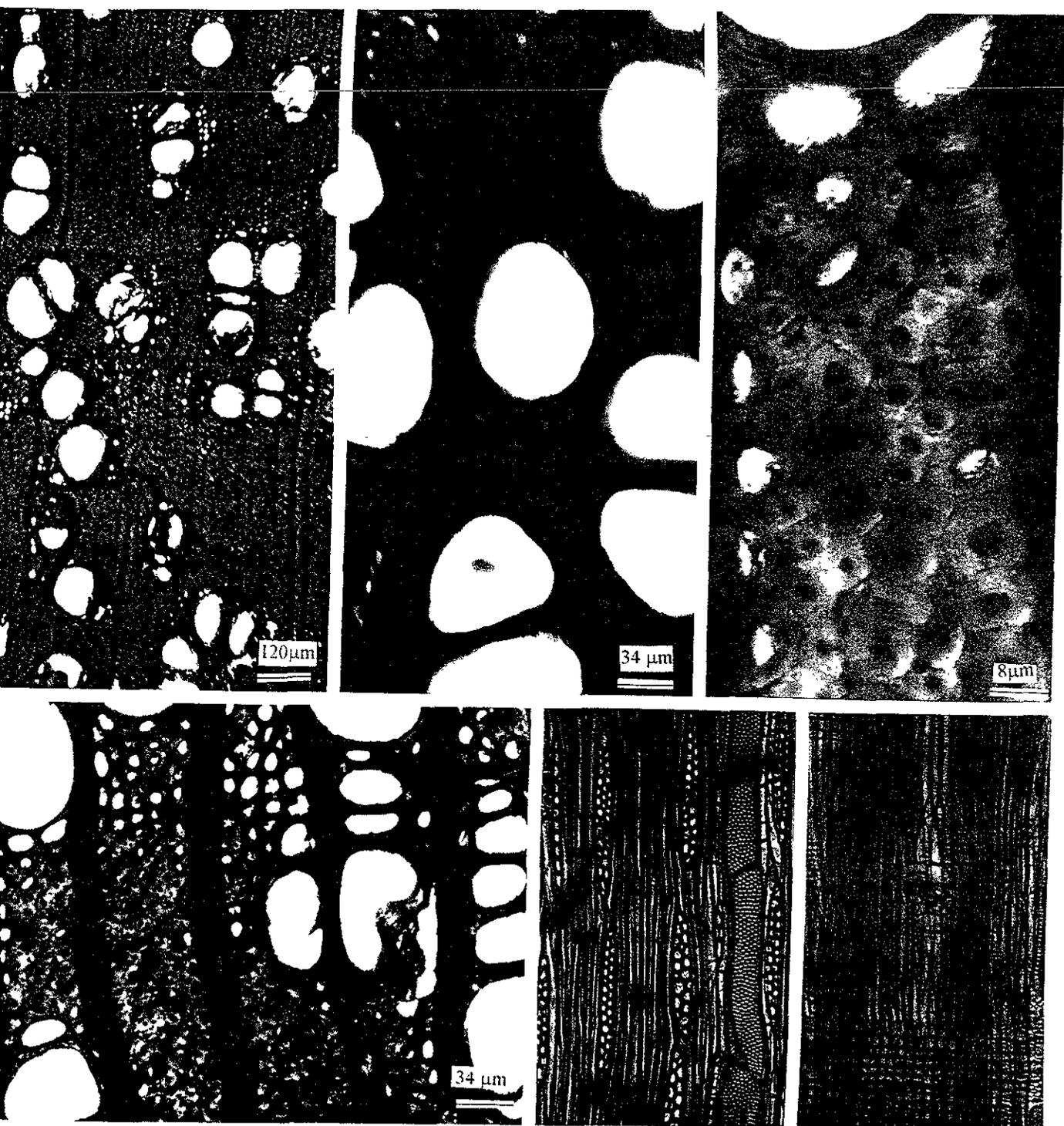


Figura 5.8: Estructura microscópica de la madera de *Caesalpinia platyloba*.



Figura 5.9: Estructura microscópica de la madera de *Gliricidia sepium*.

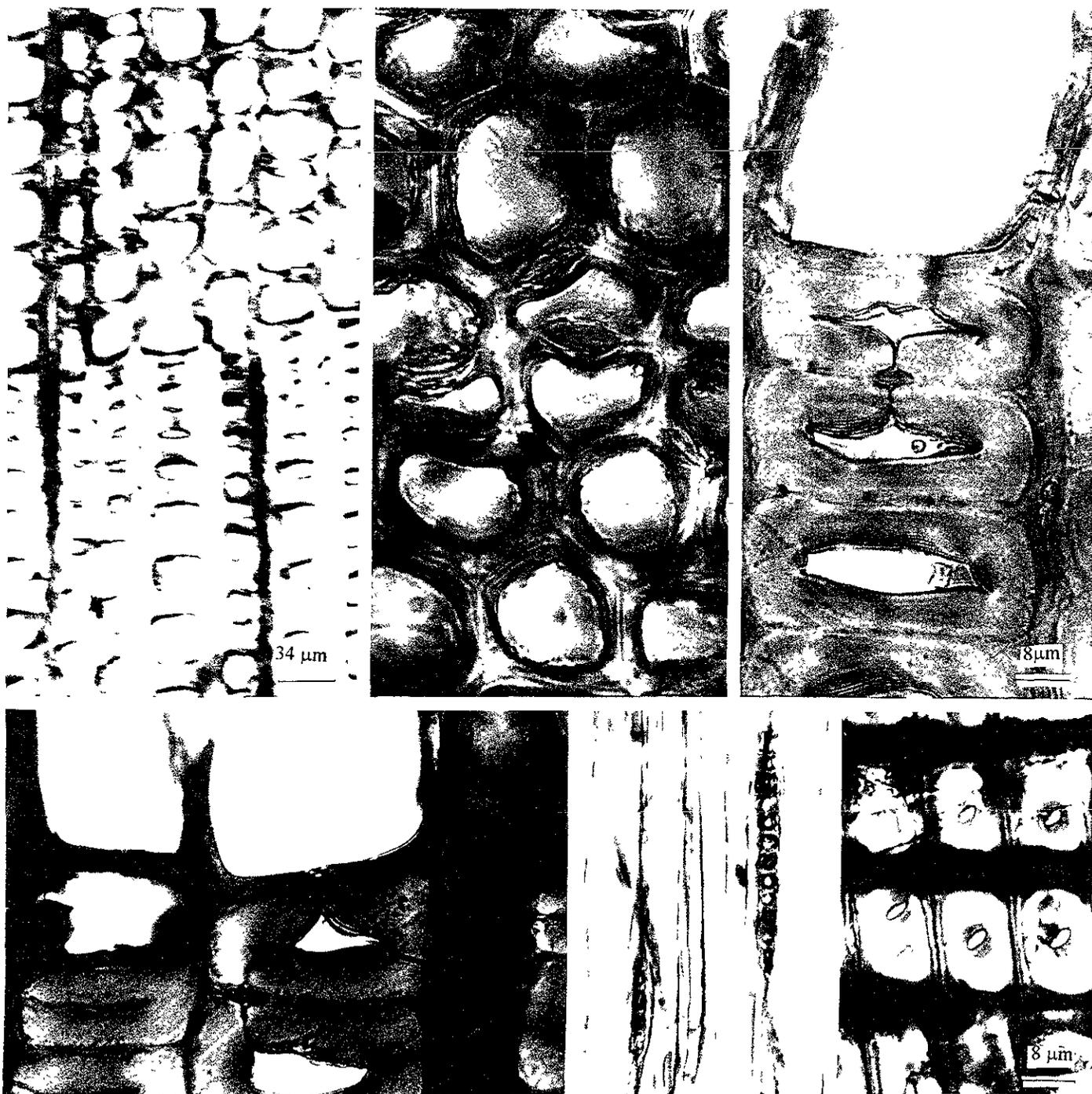


Figura 5.10: Estructura microscópica de la madera de *Abies* sp.

Especie	# Hileras de fibras de madera tardía	Anchura de anillo de crecimiento (mm)
1. <i>Alnus acuminata</i>	6(5-10)	8(7-11)
2. <i>Alnus jorullensis</i>	4(3-6)	4(3-5)
3. <i>Carpinus caroliniana</i>	3(2-5)	6(5-7)
4. <i>Tilia mexicana</i>	3(2-5)	5(3-8)
5. <i>Clethra mexicana</i>	2(1-3)	5(3-6)
6. <i>Arbutus glandulosa</i>	4(2-5)	3(2-4)
7. <i>Quercus crassifolia</i>	2(1-3)	4(3-5)
8. <i>Caesalpinia platyloba</i>	no presenta	-
9. <i>Gliricidia sepium</i>	no presenta	-
10. <i>Abies</i> sp	20(18-21)	5(3.5-5.5)

Tabla 5.1: Características de los anillos de crecimiento. El número externo es la media y los incluidos en el paréntesis representan los mínimos y máximos. La especie 7 presenta anillos porosos; las especies 8 y 9 presentan zonas de crecimiento apenas marcadas por una banda de parénquima, mientras que la 10 tiene zonas oscuras de madera tardía.

La madera de *Abies* sp está excluida de todas las características vinculadas con los vasos.

5.2 Porosidad y elementos de vaso

La porosidad en casi todos estos taxa es difusa y los poros se arreglan en patrones radiales. La madera de *Quercus crassifolia* es la única que presenta porosidad circular. Los poros se organizan principalmente en poros múltiples radiales y solitarios aunque su frecuencia (o abundancia) depende de la especie. Para la mayoría de las especies los poros caen dentro de la categoría de numerosos con tres niveles, a excepción de *Quercus*, *Caesalpinia platyloba* y *Gliricidia sepium*, que tienen una gran cantidad de fibras (Tabla 5.2). Esta última destaca pues presenta en sus vasos una cantidad importante de tílides con abundantes cristales y gomas. La porosidad difusa puede influir positivamente para que el paso de la onda sea más regular, pero si se presentan dos tamaños de poros, conjuntamente con los extractivos y otros caracteres como el grosor de las paredes celulares, el paso de la onda puede ser más

rápido. Destaca que *Quercus crassifolia* y *Gliricidia sepium* presentan un bajo número de poros por milímetro cuadrado.

Especie	Arreglo de poros	CA	N	Contorno
<i>Alnus acuminata</i>	a(2-8) b(4%)	C	75 (50-100)	angular
<i>Alnus jorullensis</i>	a(2-4) b(4%)	A	13(8-14)	oval
<i>Carpinus caroliniana</i>	a(2-8) b(4%) c(3-6)	B	29(20-40)	oval
<i>Tilia mexicana</i>	a(2-8) b	A	15(12-17)	oval
<i>Clethra mexicana</i>	a(2-3) b(6%)	A	13 (8-14)	oval
<i>Arbutus glandulosa</i>	b a(2-6) c(2-4)	C	70 (60-80)	angular
<i>Quercus crassifolia</i>	b	D	6 (3-10)	circular
<i>Caesalpinia platyloba</i>	b a(2-6) c	A	19(13-27)	oval
<i>Gliricidia sepium</i>	b	D	3 (2-4)	circular

Tabla 5.2: Caracteres cuantitativos y cualitativos de los poros. Arreglo de poros: múltiples radiales (a), solitarios (b) y múltiples tangenciales (c). Categoría de abundancia (CA): moderadamente numerosos (A), numerosos (B), muy numerosos (C), pocos(D). N es el número de poros por mm².

Los elementos de vaso, (Tabla 5.3), son en general de longitud mediana, no así en *Clethra mexicana* en que son muy largos. Los diámetros son moderadamente pequeños salvo en *Tilia mexicana* que los tiene moderadamente grandes. Tanto ésta última especie como *Arbutus glandulosa* presentan engrosamientos helicoidales en todo el vaso. Es interesante tener en cuenta que, cuando una pared celular presenta engrosamientos helicoidales, el esqueleto celular se rigidiza y aunque en *Tilia mexicana* las paredes de los vasos y fibras no son gruesas probablemente la situación de sus paredes influya en los valores de velocidades de sonido y no en la densidad, por lo que hay una relación directa entre c y E . Por otro lado *Quercus crassifolia* presenta diámetro tangencial mediano. *Carpinus caroliniana*, *Tilia mexicana*, *Caesalpinia platyloba* y *Gliricidia sepium* se distinguen por poseer placas perforadas simples a diferencia del resto que las tiene escaleriformes .

Las puntuaciones intervasculares de los elementos de vaso son areoladas y en general se presentan opuestas y/o alternas. También sus formas pueden variar, como se muestra en la Tabla 5.4 .

Las puntuaciones de vaso-radio se presentan de dos tipos: aquellas cuyos rebordes son reducidos y tienen apariencia de puntuaciones simples, presentes

Especie	Longitud(μm)	Diámetro(μm)	Placas perforadas
<i>Alnus acuminata</i>	530 (316-759)	50 (40-60)	E 15(9-20)
<i>Alnus jorullensis</i>	702(576-840)	84(56-100)	E 14(12-17)
<i>Carpinus caroliniana</i>	788(520-1200)	97(62-140)	S
<i>Tilia mexicana</i>	487(432-600)	266(120-336)	S
<i>Clethra mexicana</i>	1464(1184-2040)	95(62-117)	E 31(24-57)
<i>Arbutus glandulosa</i>	376(310-480)	51(45-80)	E 5(1-7)
<i>Quercus crassifolia</i>	530(260-780)	160(70-250)	S
<i>Caesalpinia platyloba</i>	305(210-360)	101(58-130)	S
<i>Gliricidia sepium</i>	160(150-185)	128(114-135)	S

Tabla 5.3: Características cuantitativas y cualitativas de los elementos de vaso. E=escaleriformes; S=simples

en *Carpinus caroliniana*, *Arbutus glandulosa* y *Quercus crassifolia*, aunque en esta última especie se arreglan verticalmente. El otro tipo de puntuaciones tiene dos rebordes claramente distinguibles, semejantes a las puntuaciones intervasculares que se presentan en el resto de las especies. A pesar de estas características es probable que la presencia de placas escaleriforme y simples pueda influir directamente en el paso de la onda. Vale la pena notar que las especies con placas escaleriformes presentan menores velocidades axiales que las que tienen placas simples.

5.3 Parénquima axial

Se observan dos tipos de parénquima axial, el *apotraqueal* de tipo difuso, presente en todas las especies, y el *paratraqueal*, de tres tipos (Tabla 5.5). Por otro lado los cordones longitudinales del parénquima axial varían en cuanto al número de células que lo componen. Finalmente, en relación a los contenidos celulares, tanto *A. jorullensis* como *T. mexicana*, muestran gomas de color ambar, *A. acuminata* presenta cristales en células especializadas, *Quercus crassifolia* presenta taninos, *Gliricidia* cristales y gomas que pueden estar incluidas en el parénquima axial, radial y en tílides, *Caesalpinia* presenta gomas y *Abies* sólo resinas en radios y en canales traumáticos. En este aspecto los parénquimas axial y radial no tienen una relación directa con la velocidad, pero la presencia o ausencia de extractivos pueden disminuir la

Especie	Puntuaciones Areoladas				
	Opuesta	Alternas	Angular	Oval	Circular
<i>Alnus acuminata</i>	•		•		
<i>Alnus jorullensis</i>	•			•	
<i>Carpinus caroliniana</i>		•			•
<i>Tilia mexicana</i>		•		•	
<i>Clethra mexicana</i>	•			•	
<i>Arbutus glandulosa</i>		•		•	
<i>Quercus crassifolia</i>		•			•
<i>Caesalpinia platyloba</i>		•			
<i>Gliricidia sepium</i>		•			

Tabla 5.4: Tipos de puntuaciones presentes en las especies estudiadas

velocidad del sonido, como lo ejemplifica *Gliricidia sepium*.

5.4 Parénquima radial

En general los radios de las especies estudiadas presentan de una hasta 35 series de células, como se indica en la Tabla 5.6. Se observan dos grupos de maderas con anchura de radios angosta (*Alnus acuminata*, *Caesalpinia platyloba*, *Gliricidia sepium* y *Abies*); otro grupo presenta radios un poco mas anchos a excepción de *Quercus crassifolia*. Desde este punto de vista se espera una influencia importante en las velocidades radiales y tangenciales. En relación a los agregados, en *A. acuminata* son altos y muy anchos. En *A. jorullensis*, al ser los multiseriados los que forman estos radios, son anchos aunque algo bajos y presentan gomas al igual que *Tilia mexicana* y *Clethra mexicana*. Los radios uniseriados y multiseriados caen dentro de la categoría de numerosos con cuatro posibilidades como se muestra en la Tabla 5.6. La anchura varía dependiendo del número de series que poseen. Solo tres de las especies presentan gomas de color ambar. Los radios son estructuras que están directamente relacionadas con la v_{ta} y la v_{ra} , como se verá posteriormente.

Especie	Apotraqueal	Paratraqueal	#/cordón
<i>Alnus acuminata</i>	D		5-8
<i>Alnus jorullensis</i>	D		4-6
<i>Carpinus caroliniana</i>	D	U	> 8
<i>Tilia mexicana</i>	D	U	8
<i>Clethra mexicana</i>	D	V	4-8
<i>Arbutus glandulosa</i>	D		1-2
<i>Quercus crassifolia</i>	D2		8
<i>Caesalpinia platyloba</i>		V y A	4
<i>Gliricidia sepium</i>		V y A	6
<i>Abies</i>	D		

Tabla 5.5: Tipos de parénquima axial. D=difuso, D2=difuso en agregados, U=unilateral, V=vasicéntrico, A=aliforme. El número de células que conforman cada cordón en la columna #/cordón

5.5 Fibras

Las fibras de casi todas las especies son libriformes excepto para el caso de *Arbutus* que además presenta fibrotraqueidas al igual que *Clethra mexicana*. Destaca que las fibras de *Alnus acuminata*, y las traqueidas de la madera temprana de *Abies* sp. son las que presentaron menor grosor de pared celular. Se distinguen tres categorías de longitudes: la moderadamente corta, para *Alnus acuminata* y *Arbutus glandulosa*; la mediana para *Alnus jorullensis*, *Carpinus caroliniana* y *Tilia mexicana* y la muy larga que resalta para *Clethra mexicana*. Los valores numéricos se dan en Tabla 5.7. Este carácter es uno de los más importantes para la conducción del sonido, pues el grosor de sus paredes y su composición química, al igual que la de los vasos, es sin duda la razón de una buena transmisión de la onda.

5.6 Pruebas histoquímicas

Las especies presentaron un comportamiento muy interesante con relación a la composición química de las paredes celulares. Las paredes de fibras y vasos de *Alnus acuminata* y *Clethra mexicana* reaccionaron poco a las pruebas de lignina realizadas con azul de toluidina y fluroglicinol. Las fibras y vasos

Especie	#	CA	No/mm	CB	altura μm	CC	anchura
<i>A. acuminata</i>	1	Mn	16 10-22	EB	360 (120-810)	M	50(30-70)
<i>A. jorullensis</i>	1-6	n	13 12-16	EB	384(288-504)	MF	16(8-18)
<i>C. caroliniana</i>	2-17	pn	10 8-14	EB	310 (180-720)	MF	15(12-19)
<i>T. mexicana</i>	3-5	pn	3 2-4	B	1480(1151-1944)	M	84(72-96)
<i>C. mexicana</i>	3-7	n	5 4-7	MB	617(374-936)	M	80(56-72)
<i>A. glandulosa</i>	1-4	n	9 7-11	EB	344(208-804)	M	61(56-72)
<i>Q. crassifolia</i>	1-35	n	8 4-15	MA	3198(2980-3565)	EG	387(340-405)
<i>C. platyloba</i>	1-2	mn	7 2-13	EB	231(160-300)	MF	28(22-35)
<i>G. sepium</i>	1-2	n	8 6-10	EB	340(280-390)	F	38(32-44)
<i>Abies</i> sp	1	mn	7(5-10)	EB	19(13-35)	MF	16(14-22)

Tabla 5.6: Características cuantitativas de los radios. # es el número de series de células en cada radio. No/mm es el número de radios por mm. La Categoría de Abundancia (CA) es: Mn, muy numerosos; n, numerosos; pn, poco numerosos; mn, moderadamente numerosos. La Categoría de altura (CB) es MA, muy altos; EB, extremadamente bajos; MB, muy bajos y B, bajos. La Categoría de Anchura (CC) es M, medianos; MF, muy finos y EG, extremadamente grandes.

del resto de las especies presentaron reacciones más intensas a las mismas pruebas (Tabla 5.8). El parénquima axial y radial tuvo un comportamiento muy parecido en *Alnus acuminata*, *Alnus jorullensis*, *Clethra mexicana*, *Tilia mexicana* y *Abies*.

Destaca que las especies cuyas fibras y vasos reaccionaron con mayor intensidad a los compuestos que identifican a la lignina, (Tabla 5.8), tienden a presentar altas velocidades axiales (Tabla 5.10).

5.7 Características Macroscópicas

Las características macroscópicas que pueden influir sobre las propiedades elásticas son las que se refieren al hilo y la textura (figs. 5.11 y 5.12). La madera de la mayoría de las especies estudiadas presenta hilo recto y textura mediana, en contraste con el encino cuya textura es gruesa. El hilo, resultado de la orientación de los elementos constitutivos de la madera con respecto al eje del tronco, puede influir en cómo se desplaza la onda dentro de los

Especie	Longitud	Tamaño	Diámetro	Espesor
<i>Alnus acuminata</i>	815(513-1303) ²	2	23(11-33)	2(1-3)
<i>Alnus jorullensis</i>	1134(984-1968) ³	2	18(16-21)	8(4-9)
<i>Carpinus caroliniana</i>	1553(1200-2360) ⁴	2	23(18-30)	6(4-10)
<i>Tilia mexicana</i>	1438(1080-1800) ³	2	17(15-21)	4(-5)
<i>Clethra mexicana</i>	2654(2109-3081) ⁴	2	21(14-24)	8(4-12)
<i>Arbutus glandulosa</i>	740(510-801) ²	2	35(22-45)	9(5-10)
<i>Quercus crassifolia</i>	1450(1230-1650) ³	2	23(18-35)	7(5-11)
<i>Caesalpinia platyloba</i>	980(750-1029) ²	2	18(14-25)	7(6-12)
<i>Gliricidia sepium</i>	320(280-440) ¹	2	10(8-12)	5(4-9)
<i>Abies</i> '	3706(3510-4200) ⁴	2	42(38-51)	3(1-5)
<i>Abies</i> "	1800(1670-1980) ³	2	26(21-29)	7(5-9)

Tabla 5.7: Caracteres cuantitativos y cualitativos de las fibras. Longitud, diámetro y espesor de pared en μm . El Tamaño es: 1, muy cortas; 2, moderadamente cortas; 3, medianas; 4, muy largas. *Abies*' es de madera temprana y *Abies*" de madera tardía

elementos del xilema. La textura puede indicarnos cuáles son los elementos celulares que pueden influir en la disipación de la energía acústica.

5.8 Comportamiento acústico

Resulta difícil relacionar todas las características anatómicas antes descritas con el comportamiento acústico encontrado para estas especies. Sin embargo existen algunas que pueden informarnos sobre su influencia, por lo que solamente se tratan en seguida esas características.

5.8.1 Velocidad del sonido

Existe un comportamiento general en las velocidades axiales, radiales y tangenciales cuyos valores están relacionados con la estructura de las especies. En general se puede inferir que la velocidad axial depende del grosor de la pared de vasos y de fibras, es decir, de la cantidad de *tubos* (Teoría del *Continuum*) que van a permitir el paso de la onda. También se puede suponer que las velocidades radiales son menores que las axiales, debido a que las

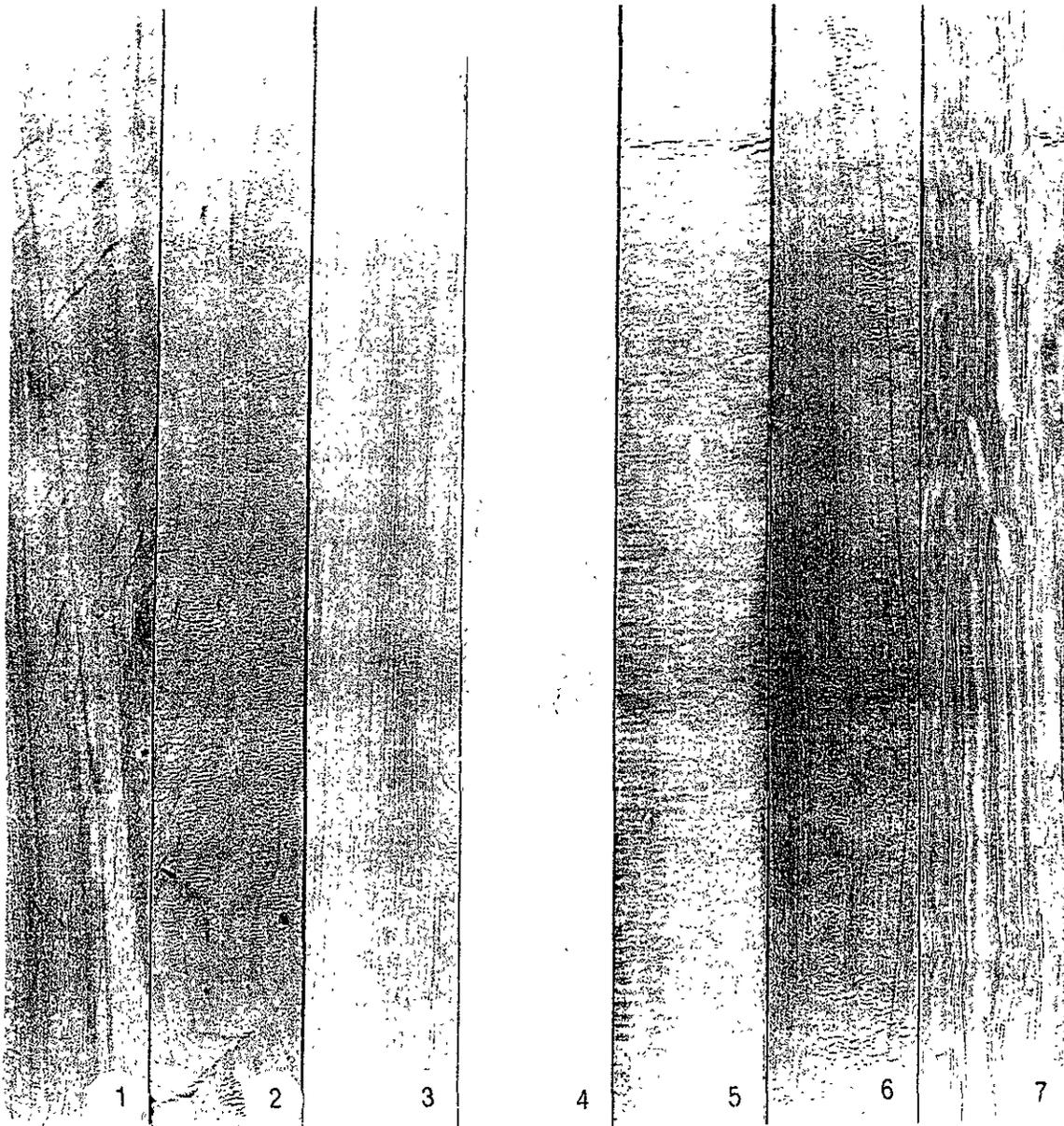


Figura 5.11: Características macroscópicas de *Alnus acuminata*(1), *Alnus jorullensis*(2), *Carpinus caroliniana*(3), *Tilia mexicana*(4), *Clethra mexicana*(5), *Arbutus glandulosa*(6) *Quercus crassifolia*(7).

Especie	Fibras		Vasos		p.axial y radial
	lignina	celulosa	lignina	celulosa	
<i>A. acuminata</i>	++	++	++	++	+++
<i>A. jorullensis</i>	+	++	+	++	+++
<i>C. caroliniana</i>	+++	++	+++	++	+++
<i>T. mexicana</i>	++++	+	++++	+	+++
<i>C. mexicana</i>	+	++	+	++	+++
<i>A. glandulosa</i>	+++	++	+++	++	+++
<i>Q. crassifolia</i>	++++	+	++++	+	+++
<i>C. platyloba</i>	++++	+	++++	+	+++
<i>G. sepium</i>	++++	+	++++	+	+++
<i>Abies</i> sp	++++	+	++++	+	+++

Tabla 5.8: Comportamiento histoquímico de las paredes celulares. lig=lignina, cel=celulosa, p.=parénquima

ondas chocan con las paredes celulares de las fibras y los vasos, pero pueden viajar más fácilmente, aunque con interrupción, a través de las cavidades de las células de los radios. La interrupción puede deberse a que los radios no son estructuras continuas desde la médula hasta la corteza, sino que se interrumpen con gran frecuencia. Las velocidades tangenciales son las más bajas debido a que las ondas se propagan en una dirección de muy baja cohesión molecular ejemplificadas por las paredes de elementos verticales, vasos, fibras, parénquima axial y las paredes de los elementos horizontales (radios).

Aquí se plantea la hipótesis que una cantidad mínima de elementos de conducción y de sostén respecto de los de reserva (parénquima axial y radial) debe requerirse para que se transmita la onda, por ejemplo: las altas velocidades axiales en *Quercus*, pueden deberse a que esa estructura con porosidad circular, tipo de fibras y parénquima axial sea óptima respecto de la transmisión limpia de las ondas sonoras. Para *Caesalpinia platyloba*, la presencia de fibras y vasos con paredes gruesas, pero poco parénquima y extractivos, puede producir una estructura menos óptima pero que permite el flujo de la onda; para *Abies*, las ondas viajan a través de las traqueidas de madera tardía y temprana y, probablemente, aunque las ondas no encuentran obstáculos, el diámetro y grosor de sus paredes permite alcanzar esos valores de velocidad axial. Así en términos generales, las velocidades medidas para nuestras

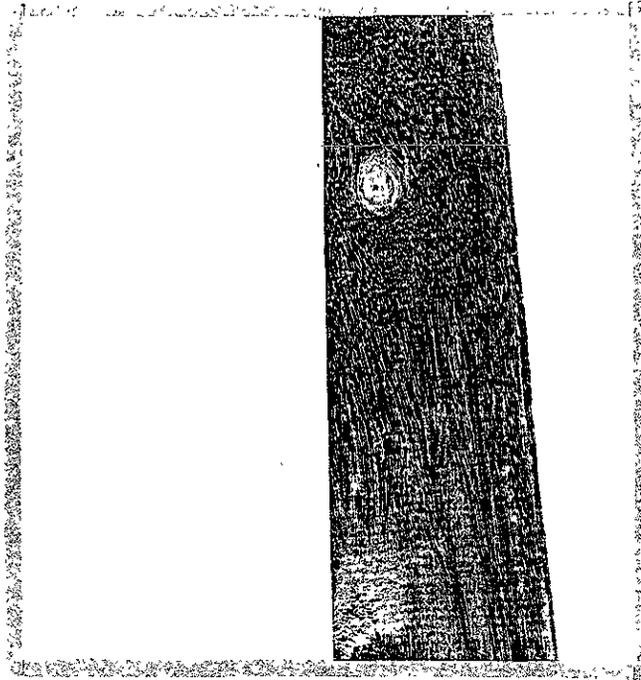


Figura 5.12: Características macroscópicas de *Caesalpinia platyloba* y *Gliricidia sepium*.

especies pueden reflejar la calidad de la estructura así como de los elementos celulares que la componen. Las velocidades axiales son más grandes que las velocidades radiales y que las tangenciales. A grandes rasgos las especies estudiadas pueden clasificarse en dos modelos estructurales básicos:

1. Las que presentan anillos de crecimiento claramente marcados por madera temprana y tardía, con vasos de dos tamaños (*Quercus*) o con traqueidas de dos tamaños (*Abies*). Para estas especies, hay una apreciable diferencia de valores de v_{ax} destacando *Q. crassifolia*. Es interesante que esta especie a pesar de presentar pocos poros, es la que tuvo una reacción más intensa a la prueba de lignina, con fibras de paredes gruesas, comparado con *Abies*, que presenta dos dimensiones de un mismo tipo de elementos de "conducción-sostén", lo que puede explicar menores valores de v_{ax} , con respecto a *Quercus*, siendo que ambas especies tienen respuestas histoquímicas muy semejantes a los compuestos que detectan la lignina.
2. Las otras ocho especies, que presentan porosidad difusa. En este segundo modelo solo *A. acuminata* y *Clethra* tienen velocidades axiales

Especie	Hilo	Textura r.	Textura t.
<i>Alnus acuminata</i>	recto	mediana	suave
<i>Alnus jorullensis</i>	recto	mediana	suave
<i>Carpinus caroliniana</i>	recto	mediana	suave
<i>Tilia mexicana</i>	recto	fina	liso
<i>Clethra mexicana</i>	recto	mediana	liso
<i>Arbutus glandulosa</i>	recto	fina	liso
<i>Quercus crassifolia</i>	recto	gruesa	pro
<i>Caesalpinia platyloba</i>	entrecruzado	fina	pro
<i>Gliricidia sepium</i>	entrecruzado	mediana	pro
<i>Abies</i>	recto	fina	suave

Tabla 5.9: Tipos de hilo y texturas radial y tangencial de las especies estudiadas

bajas. En la última especie, los vasos y las fibras son de mayor longitud, pero resalta que sus reacciones para la lignina fueron las de menor intensidad. Para *A. acuminata* destaca que los poros son muy numerosos, pero también sus paredes y las de las fibras resultaron con baja reacción para la lignina.

Por otro lado fue importante reconocer que las razones: v_{ra}/v_{ax} y v_{ta}/v_{ax} producen valores francamente independientes de la especie estudiada en el caso de las angiospermas. Como $v_{ra}/v_{ax} = 0.45$ y $v_{ta}/v_{ax} = 0.35$, se puede afirmar que la velocidad radial o la velocidad tangencial es de 45% o de 35% respectivamente de la velocidad axial para todas las muestras estudiadas.

El significado de lo anterior implica que independientemente de los valores absolutos y de la arquitectura interna específica, existen constantes que son propias de la madera y de sus planos anisotrópicos que se basan fundamentalmente en la presencia de estructuras horizontales, que viajan de corteza a médula. El arreglo, cantidad, grosor de paredes, composición química de las propiedades individuales de cada especie da por supuesto valores propios a cada madera.

De acuerdo con la literatura ([21], [19], [24] y [27]), las velocidades axiales siempre tienen valores más altos, sin embargo se han llegado a reportar valores distintos aunque se trate de las misma especies. Por ejemplo para *Acer pseudoplatanus* [21] se reporta una velocidad de 4350 m/s y en Schelleng

una de 3500 m/s. Esta diferencia puede deberse a los métodos que emplearon para medir las velocidades, así como la forma de las probetas y su contenido de humedad. Bucur [21] aclara que sus medidas se hacen al 12% de C.H. mientras que Schelleng (Tabla 1.2) no menciona este factor. Se sabe que este factor afecta en las propiedades elásticas y el módulo de la velocidad del sonido. Cuando el C. H. aumenta la madera se vuelve más flexible (ver más abajo) por lo que los valores de los módulos de Young son más bajos y viceversa, entre más seca está el espécimen, más alto es el módulo de Young. Es importante señalar que las velocidades axiales son aproximadamente el doble de las radiales y un poco más que las tangenciales.

Una característica interesante es el cociente del grosor de la pared de las fibras al diámetro de las mismas, ya que nos da una indicación geométrica sobre este elemento celular. Así, se tiene que para *Alnus acuminata* tal cociente vale (0.08), el más bajo lo que puede explicar los bajos valores obtenidos para su módulo de Young.

Una de las especies estudiadas, *Gliricidia sepium*, presentó una estructura muy especial ya que tiene una gran cantidad de cristales y gomas en muchas células así como estructuras especializadas (tílides) con paredes muy gruesas. Estos componentes prácticamente ocluyen [39] las cavidades de vasos, el parénquima axial y radial, así como las fibras, lo que a nuestro juicio hace que esta madera se comporte más como un sólido, y aún así, sus relaciones v_{ta}/v_{ax} y v_{ra}/v_{ax} , sean constantes como en las otras, pero sus valores los menores.

Problemente la gran cantidad de extractivos y contenidos intracelulares explique la semejanza de las velocidades axiales (4381 m/s) de *Gliricidia*, casi igual a la de *Alnus jorullensis* (4318 m/s). Esto sugiere un cuestionamiento: ¿Cómo vibra un material poroso auténtico y anisotrópico (*Alnus jorullensis*), y cómo uno muy compacto y anisotrópico (*Gliricidia sepium*)?, pues es claro, por estos resultados, que la vibración o el paso de una onda es más independiente de la densidad, que de la estructura, esto es, la estructura absorbe energía y esto debe traducirse en como vibra. Estos cuestionamiento deben poder resolverse al intentar medir ondas, no solamente longitudinales, sino también transversales, así como su decaimiento el futuro.

Esto es claro cuando hacemos el mismo análisis para *Carpinus caroliniana*, que además de tener una densidad menor a la de *Gliricidia sepium*, carece de extractivos y tiene una relación v_{ax}/v_{ra} de 2.18, lo que indica que es menos sólida que la *Gliricidia sepium*, pero su velocidad axial es más alta que ésta última.

Con relación a *Tilia mexicana*, pareciera que las fibras son las más relacionadas con las velocidades axiales, pues la razón del grosor de pared al diámetro de la fibra es parecida a la de *Carpinus caroliniana* y a la de *Abies*. Esto último resulta más interesante cuando se toma en cuenta el valor histoquímico de sus paredes hacia la lignina.

Regresando a los modelos planteados anteriormente, se puede observar que estos funcionan para manejar solamente una respuesta axial de las ondas que viajan en ese sentido. Sin embargo, nuestros modelos se vuelven uno cuando se trata de explicar los valores radiales y tangenciales, a excepción de *Abies*. La transmisión de las ondas radiales se realiza más fácilmente a través del parénquima radial o de los radios. Estas ondas se encuentran con las paredes de los vasos y de las fibras principalmente, por lo que sus valores son menores a las axiales. Entonces vuelve la pregunta ¿Cómo se mueven las células al ser sometidas a la vibración de una onda longitudinal que incide sobre sus paredes?

Veamos los resultados:

1. Las velocidades radiales son menores que las axiales, lo que indica que no hay paso libre de la onda. *Quercus* y *Gliricidia* presentan las mayores velocidades radiales, lo que descarta dos modelos de comportamiento debido a la presencia de porosidad circular o porosidad difusa. Estas especies son las que tienen las paredes más gruesas, seguidas de *Alnus jorullensis* y *Caesalpinia platyloba*. También es necesario agregar que *Quercus* presenta los radios más anchos y más altos, los cuales pueden funcionar como guías de ondas y en *Carpinus* y *Alnus jorullensis* los valores de sus velocidades tangenciales, 2280 y 2180 m/s, respectivamente, pueden estar influenciados por radios claramente agregados a diferencia de las otras especies, que aunque presentan anchuras mayores de radios, son menos abundantes.
2. Las velocidades radiales para el resto de las especies pueden tener relación con la porosidad, los engrosamientos en espiral y claramente con las respuestas histoquímicas a la lignina, como se observa con *Tilia* y *Clethra*.
3. *Abies* es la única especie que muestra velocidades radiales menores que las tangenciales. Los anillos de crecimiento de esta especie están formados por dos regiones que deben ser atravesadas: una región de madera y una de madera tardía, la primera al estar formada por células más

grandes y de paredes delgadas, deben vibrar y absorber energía de una manera muy distinta que como lo realizan las traqueidas de madera tardía. Esto nos regresa al cuestionamiento anterior de cómo se mueven las células y si es la densidad o son las dimensiones de las células. *Quercus* tiene aproximadamente el doble de la densidad de *Abies* y la diferencia de velocidades es sólo del 17%! (Tabla 5.13).

4. Los valores de α (Tabla 6.12) indican el porcentaje de pared celular con respecto al diámetro de la fibra. Esto resulta muy interesante pues tiene que ver con cuánto espacio ocupa con respecto al diámetro de la fibra y si está más o menos lignificado, como es el caso de *Alnus jorullensis* y de *A. acuminata*. Es interesante notar desde este punto de vista que *Quercus* y *Abies*, para madera tardía, presentan valores de α de 0.30 y 0.26 con reacciones intensas para la lignina y densidades muy distintas. Lo anterior hace reflexionar sobre: ¿Qué es la calidad de la pared?, ¿podría sostenerse que una relación α , sumada a una respuesta histoquímica intensa a la lignina y cantidades importantes de fibras, pueden considerarse como criterios de calidad para permitir la mejor transmisión de la onda? Este razonamiento creo que merece ser considerado en el futuro.

Por otro lado las velocidades tangenciales son menores que las otras dos velocidades. En este punto se puede observar lo siguiente:

1. *Clethra* mostró respuestas histoquímicas de poca intensidad a la lignina y los vasos y las fibras más largos, así como muchos depósitos en los radios. ¿que tan distinto vibra una estructura de este tipo comparada con la de *Abies*?
2. En *Quercus* hay claramente una influencia poderosa de los radios para dificultar el paso de las ondas, pues en esta especie resaltan los radios multiseriados, que aunque no son abundantes, pueden funcionar exactamente como una gran pared. *Arbutus* tiene una velocidad muy parecida, pero sus radios son numerosos y hasta tetraseriados, lo que produce un volumen de células transversales parecido.
3. Los valores de velocidad tangencial pueden estar relacionados con el volumen total de células horizontales, en lo alto y en lo ancho. Esto puede explicar lo que ocurre con *Alnus acuminata*, *Alnus acuminata*, *Alnus jorullensis*, *Carpinus caroliniana* y *Tilia mexicana* (Tabla 5.13).

Especie	v_{ax}	v_{ra}	v_{ta}	β	γ	ρ
<i>Alnus acuminata</i>	3690	1900	1690	0.51	0.46	380
<i>Alnus jorullensis</i>	4300	2180	1600	0.50	0.37	586
<i>Carpinus caroliniana</i>	4980	2280	1750	0.46	0.35	660
<i>Tilia mexicana</i>	4780	1950	1390	0.41	0.29	490
<i>Clethra mexicana</i>	3840	1760	830	0.45	0.21	502
<i>Arbutus glandulosa</i>	4187	1853	1484	0.44	0.35	650
<i>Quercus crassifolia</i>	6898	2667	1498	0.39	0.21	841
<i>Caesalpinia platyloba</i>	5760	1970	2440	0.34	0.42	939
<i>Gliricidia sepium</i>	4381	2565	1910	0.58	0.43	1254
<i>Abies</i> sp	5470	1075	2107	0.19	0.38	440

Tabla 5.10: Velocidades axiales, radiales, tangenciales; las razones: $\beta = v_{ax}/v_{ra}$, $\gamma = v_{ax}/v_{ta}$ y la densidad ρ

4. ¿Cómo se mueve o vibra la estructura celular en sentido axial-tangencial? Pensando en el arreglo de los radios en el leño, ¿se mueven igual que en sentido axial-radial?. ¿cómo se mueven las caras tangenciales de los elementos celulares y cómo las radiales? Estimo que la cantidad de parénquima radial, sus dimensiones y su número, pueden ser las razones que habrá que ponderar exhaustivamente en el futuro.

Tal vez se podría hacer otra generalización más, relacionada con los datos anteriores y con los antecedentes y es que los planos $ax - ta$ son menos deformables que los planos $ax - ra$. Es interesante que para *Acer campestre* la razón v_{ax}/v_{ra} es de 0.45 y su densidad de 623 kg/m³ lo que puede compararse con los valores de *Carpinus caroliniana*, con $v_{ax}/v_{ra} = 0.45$ y densidad 660 kg/m³. Lo interesante radica en que *Acer campestre* es muy empleado en la fabricación de las cajas de resonancia de instrumentos de cuerda frotada. Esta madera es muy cotizada por los lauderos mexicanos, pero que también están conscientes de su costo, por lo que es necesario encontrar sustitutos con maderas mexicanas. En principio podría pensarse en usar criterios mínimos de sustitución como lo es el uso de las razones v_{ax}/v_{ra} y v_{ax}/v_{ta} , los valores de α y los valores de E para todas las direcciones. En este sentido resulta muy atractiva la sustitución con especies como *Carpinus caroliniana*.

Especie	f	v	v_{ax}
<i>Alnus acuminata</i>	530	815	3690
<i>Alnus jorullensis</i>	702	1134	4318
<i>Carpinus caroliniana</i>	788	1553	4980
<i>Tilia mexicana</i>	488	1438	4787
<i>Clethra mexicana</i>	1464	2654	3884
<i>Arbutus glandulosa</i>	376	740	4187
<i>Quercus crassifolia</i>	530	1450	6898
<i>Caesalpinia platyloba</i>	305	980	5760
<i>Gliricidia sepium</i>	160	320	4381
<i>Abies (traqueidas tem)</i>	—	3704	5470
<i>Abies (traqueidas tard)</i>	—	1800	5470

Tabla 5.11: Longitud f de fibras, v de vasos y velocidad v_{ax} del sonido en la dirección axial

Especie	dv	df	epf	α	β	γ
<i>Alnus acuminata</i>	50	23	2	0.08	0.51	0.46
<i>Alnus jorullensis</i>	84	18	8	0.44	0.50	0.37
<i>Carpinus caroliniana</i>	97	23	6	0.26	0.46	0.35
<i>Tilia mexicana</i>	266	17	4	0.23	0.41	0.29
<i>Clethra mexicana</i>	95	21	8	0.38	0.45	0.21
<i>Arbutus glandulosa</i>	51	35	9	0.25	0.44	0.35
<i>Quercus crassifolia</i>	160	23	7	0.30	0.39	0.21
<i>Caesalpinia platyloba</i>	101	18	7	0.38	0.34	0.42
<i>Gliricidia sepium</i>	128	10	5	0.5	0.58	0.44
<i>Abies</i> '	-	42	3	0.07	0.19	0.38
<i>Abies</i> "	-	26	7	0.26	0.19	0.38

Tabla 5.12: Características de vasos, fibras y razones de las velocidades del sonido en tres direcciones. Diámetro de los vasos (dv), diámetro de la fibra (df), espesor de la pared de la fibra (epf), $\alpha = \text{epf}/\text{df}$ es la razón del espesor de la pared al diámetro de la fibra, $\beta = v_{ra}/v_{ax}$ y $\gamma = v_{ta}/v_{ax}$.

Especie	# ser	#/mm	altura	anchura	β	γ
<i>Alnus acuminata</i>	1	16	360	50	0.51	0.46
<i>Alnus jorullensis</i>	6	13	384	16	0.50	0.37
<i>Carpinus caroliniana</i>	10	10	310	15	0.46	0.35
<i>Tilia mexicana</i>	4	3	1480	84	0.41	0.29
<i>Clethra mexicana</i>	5	5	617	80	0.45	0.21
<i>Arbutus glandulosa</i>	3	9	344	61	0.44	0.35
<i>Quercus crassifolia</i>	4	8	3198	387	0.39	0.21
<i>Caesalpinia platyloba</i>	25	7	231	28	0.34	0.42
<i>Gliricidia sepium</i>	2	8	340	38	0.58	0.44
<i>Abies (traqueidas tem)</i>	2	7	19	16	0.19	0.38
<i>Abies (traqueidas tard)</i>	1	7	19	15	0.19	0.38

Tabla 5.13: Características de los radios y cocientes de las velocidades. N es el número de series; N , el número de series por milimetro; h , la altura y w , la anchura de los radios. Además: $\beta = v_{ra}/v_{ax}$ y $\gamma = v_{ta}/v_{ax}$

5.8.2 Módulos de Young y otros parámetros

Los resultados obtenidos para los valores de densidad relativa, de humedad relativa y de los módulos de Young se presentan en la Tabla 5.14. Cabe aclarar que la mayor parte de la literatura consultada corresponde a mediciones de la velocidad del sonido y del módulo de Young cuando el contenido de humedad corresponde a 12% que se controla en ambientes especiales. No pudimos controlar esa variable, sin embargo es importante señalar que cuando calculamos los contenidos de humedad para las primeras seis especies, los valores resultaron un poco más bajos, como se muestra en la Tabla 5.14. Se sabe que el contenido de humedad afecta las propiedades elásticas y, en particular, el módulo de la velocidad del sonido, esto es, cuando el C.H. aumenta la madera se vuelve más elástica: los valores del módulo de Young son menores y viceversa, entre más seca esté la muestra, mayor será el valor del módulo de Young. Por otro lado y aunque no se encuentra descrito en la metodología, creímos interesante incluir algunos valores del módulos de Young, determinados por el método de frecuencias naturales en el que se utiliza un analizador de señales y un micrófono: El micrófono se coloca muy cerca de la barra de madera (especimen) y a está se le golpea con una baqueta. La señal, captada por el micrófono, se despliega en la pantalla del analizador. En la Tabla 5.14 se muestra la densidad relativa (G.E.), el contenido de humedad (C.H.), los

Especie	G. E.	C. H.	MOEfn	MOEge
<i>Alnus acuminata</i>	0.32	9	4.77	5.8
<i>Alnus jorullensis</i>	0.46	9	9	10.7
<i>Carpinus caroliniana</i>	0.56	8	16.3	16.7
<i>Tilia mexicana</i>	0.42	7	15.5	9.0
<i>Clethra mexicana</i>	0.36	8	7	6.9
<i>Arbutus glandulosa</i>	0.49	8	10.8	12.3

Tabla 5.14: Densidad relativa (G.E), contenido de humedad (C.H), valores del módulo obtenidos con método de frecuencias naturales (MOEfn), y módulo obtenido con cálculos (MOEge) de las seis especies templadas que presentan porosidad difusa

módulos de Young calculados con las frecuencias naturales (MOEfn) y los módulos de Young calculados con la ecuación descrita en los *antecedentes* y que se basa en la densidad relativa (MOEge).

De estos resultados se puede observar lo siguiente:

1. Los valores de MOEfn, obtenidos con métodos de frecuencias naturales y los de E_{ax} con métodos ultrasónicos (Tablas 5.14, 5.15), son muy semejantes. Esto significa que los MOEfn corresponden básicamente a valores axiales, esto es, en una sola dirección, lo que deja esta parte de la investigación abierta al cálculo de MOEfn radiales y tangenciales. Solo *Tilia mexicana* mostró valores muy dispares. Con el método ultrasónico se obtienen dos valores de E adicionales, aquellos que permiten conocer que tan rígida o elástica es la madera en sentido transversal. *En términos prácticos se considera una madera más elástica aquella que puede estirarse con más facilidad sin deformarse o romperse.* Aquella que es más difícil de estirar admite menos deformación antes de romperse. De acuerdo con esto, *Alnus acuminata* presenta el valor más bajo (5.57 GPa) y una densidad de 380 (kg/cm³) y aunque la diferencia de las densidades entre esta especie y *Abies* (440 kg/cm³) no es tan grande, sí lo es la de E (12.4 Gpa), que es casi del doble.
2. Se puede generalizar que E_{ax} siempre tendrá valores más altos en sentido axial que en direcciones radiales y tangenciales, lo que es lógico pues esta variable es proporcional a la velocidad de sonido.

Especie	$E_{ax} \times 10^9$	$E_{ra} \times 10^9$	$E_{ta} \times 10^9$
<i>Alnus acuminata</i>	5.6	1.6	1.2
<i>Alnus jorullensis</i>	9.9	2.9	1.2
<i>Carpinus caroliniana</i>	17.8	3.9	2.15
<i>Tilia mexicana</i>	10.7	2.1	1.0
<i>Clethra mexicana</i>	7.5	1.6	0.4
<i>Arbutus glandulosa</i>	10.2	2.1	1.2
<i>Quercus crassifolia</i>	37.9	5.6	1.8
<i>Caesalpinia platyloba</i>	30.9	3.6	5.6
<i>Gliricidia sepium</i>	24.0	8.2	4.5
<i>Abies sp</i>	12.4	0.5	1.8

Tabla 5.15: Módulos de Young calculados con el método ultrasónico

- Aunque el valor de los módulos depende de la c , la densidad tiene una influencia grande pues por ejemplo *Carpinus caroliniana* y *Tilia mexicana*, cuyas velocidades del sonido en la dirección axial (v_{ax}) son muy cercanas, presentan densidades con valores muy distintos (660 kg/m³ y 490kg/m³, respectivamente), lo que hace que el primero sea más rígido que el segundo en sentido axial. Los valores de *Quercus crassifolia* y *Caesalpinia platyloba*, también responden a ese comportamiento.
- Aunque las densidades de *Arbutus glandulosa* y *Carpinus caroliniana* son muy semejantes, resalta que los valores de E_{ax} sean muy distintos, esto es, la ecuación $E = c^2\rho$, sugiere que los valores de E dependen de la c^2 y de la densidad, sin embargo esto no ocurre en todas las especies como se muestra anteriormente. De lo anterior se desprende que la densidad no es la única causa, por lo que es importante considerar, en el futuro, que debe existir un conjunto de características estructurales que ayuden a entender el comportamiento antes descrito. En *Alnus acuminata*, *Gliricidia sepium* y *Abies*, también se observa un comportamiento muy parecido. Entonces, ¿se podría pensar en una contante anatómica?
- Los valores de E_{ra} y E_{ta} , tienden a comportarse como su respectivas velocidades y claramente dependen de los valores de v_{ra} y v_{ta} , de acuerdo con $E = c^2\rho$. Esto se observa muy claramente en *Caesalpinia*

platyloba que presentó velocidades radiales menores a las tangenciales a pesar de su densidad.

6. La madera de *Abies* es más elástica que la de *Alnus acuminata* y los valores para los E_s radiales de ambas especies también lo reflejan. *Alnus acuminata* es un poco más densa que el *Abies* y sin embargo se rompe con menor esfuerzo, por ser más frágil que el *Abies*. *Clethra mexicana* tiene un comportamiento parecido a *Alnus acuminata*. En este punto es claro que la estructura de estos ailes, de células con paredes no muy gruesas y porosidad difusa, pueden estar influyendo en su resistencia mecánica. Pareciera que esa estructura de zonas con células de paredes gruesas (madera tardía) y paredes delgadas (madera temprana), le da propiedades muy especiales. En cuanto a *Arbutus glandulosa* y *Tilia mexicana* son muy similares en E_s axiales, radiales y tangenciales, a pesar de sus diferencias en valores de densidad.
7. *Quercus*, *Caesalpinia* y *Gliricidia* conforman un grupo, que, por sus altos valores de densidad, presentan altos valores de E_s en sus tres direcciones. Estas especies admiten mayor estiramiento y deformación y esto se puede atribuir a las paredes gruesas de sus elementos, así como a los extractivos que para *Gliricidia* parece influir en su mayor elasticidad con respecto a *Quercus* y *Caesalpinia*. Probablemente los altos valores de E para *Quercus* y *Abies* puedan tener alguna relación con la presencia bien marcada de anillos de crecimiento, a pesar de sus diferencias en densidad.
8. Se observan tres grupos de especies que presentan valores cercanos de Módulos de Young entre ellos. Los *Alnus* y la *Clethra*. *Tilia*, *Arbutus* y *Abies*. Y el tercer grupo *Quercus*, *Caesalpinia* y *Gliricidia*.
9. *Carpinus caroliniana* presenta valores de E_{ax} , E_{ra} y E_{ta} , distintas al resto pero por estas características y las anatómicas, se propone como sustituto de *Acer* spp.

Capítulo 6

Conclusiones

1. Las velocidades axiales son mayores a las radiales y tangenciales. Los valores de éstas últimas son menores en estructuras con porosidad difusa.
2. Los valores de las velocidades radial y tangencial están influenciados por las dimensiones y número de radios por milímetro.
3. Las razones v_{ra}/v_{ax} y v_{ta}/v_{ax} son constantes en las angiospermas, es decir, son independientes de los valores absolutos de las velocidades.
4. El grosor y diámetro de las fibras son factores que influyen en los valores de las tres velocidades.
5. La lignificación está directamente relacionada con el punto anterior.
6. El aumento del número de poros y la disminución del grosor de las paredes de fibras y vasos influye en los valores bajos de las tres velocidades.
7. Es muy probable la influencia positiva de engrosamientos en espiral en los valores altos de v_{ax} y bajos en v_{ra} y v_{ta} así como en los valores de E_{ax} .
8. El alargamiento y acortamiento en sentido axial requieren de mayor esfuerzo que para las otras dos direcciones.

9. Las direcciones tangenciales son rígidas que las radiales, es decir, que los planos radiales de la madera son menos deformables que aquellos que se cortan tangencialmente.
10. La presencia de zonas con madera temprana y tardía, como es el caso de *Quercus* y *Abies* tiene influencia en valores altos de velocidades axiales, pero también influye directamente en la resistencia mecánica, esto es, la dirección axial es que presenta los valores más altos para los Módulos.
11. La porosidad difusa está asociada a otros caracteres como son el grosor de las paredes de las fibras y su longitud, así como con la calidad de esas paredes desde el punto de vista histoquímico, es decir, con menor o mayor contenido de lignina en la pared secundaria. Ejemplo de esto es *Alnus acuminata* y *Caesalpinia platyloba*.
12. *Carpinus caroliniana* se propone como una especie que habrá que investigar con más individuos, dado que sus valores de velocidad y módulos de Young, la hacen una especie potencial para sustituir otras de importación.
13. Es necesario hacer medidas acústicas que estén íntimamente relacionadas con los ángulos microfibrilares de los distintos elementos celulares y la composición química de las paredes celulares (pruebas histiquímicas).
14. Es necesario que las medidas acústicas coincidan con las características anatómicas, probablemente a través de métodos como los de microscopía electrónica, para llevar esto a niveles poblacionales, donde sólo una especie se revise y evalúe, esto con el fin de conocer la totalidad del fenómeno estructura anatómica-comportamiento acústico y aportar criterios para la selección de especies para la silvicultura.

Espe	v_{ax1}	v_{ax2}	v_{ra1}	v_{ra2}	v_{ta1}	v_{ta2}	E_{ax}	E_{ra}	E_{ta}
TI01	5040	5478	1420	1420	963	1313	11.2	0.82	0.53
TI02	5160	4865	884	1132	1073	887	10.5	0.42	0.40
TI03	4970	5070	1220	2200	874	958	11.8	1.37	0.39
TI04	5150	4354	1816	1816	1340	1570	13.2	1.93	1.24
TI05	5068	5279	1750	2280	1345	1280	12.0	1.82	0.77
TI06	4961	4600	2050	2125	1387	1233	9.14	1.74	0.69
TI07	5270	4147	1930	2071	1480	1531	10.9	1.97	1.12
TI08	4683	5058	2160	2400	1473	1400	13.7	2.99	1.19
TI09	4650	4330	2450	2450	1288	1716	11.3	3.36	1.26
TI10	4736	4220	2261	1960	1733	1485	11.0	2.44	1.42
TI11	4731	5015	1843	2185	1660	1428	14.0	2.40	1.41
TI12	4560	4823	1980	2200	1638	1475	13.2	2.61	1.45
TI13	4557	4177	1735	1552	1890	1733	11.0	1.56	1.89
TI14	4730	4730	2100	1966	1716	1471	12.8	2.37	1.46
TI15	5017	4112	2085	1825	1287	1471	11.6	2.12	1.06
TI16	5227	4823	1569	1854	1475	1340	14.6	1.69	1.14
TI17	5126	4407	2246	2085	1448	1500	12.7	2.62	1.21
TI18	4917	4324	1553	1836	1065	1288	10.1	1.35	0.65
TI19	4731	4323	2276	2192	1300	1485	11.9	2.90	1.13
TI20	5453	4918	2120	2120	1357	1357	16.2	2.71	1.11
TI21	5227	5018	2162	2386	1287	1345	14.6	2.89	0.97
TI22	4647	4562	1618	1780	1683	1594	12.4	1.68	1.57
TI23	4552	4471	2164	2525	1321	1233	11.0	2.97	0.88
Cae	5760	5718	2000	1940	2390	2500	30.9	3.64	5.61
Gli	4477	4285	2631	2500	1880	1941	24.0	8.23	4.56
Ab1	6060	5960	1000	1100	2000	1930	15.0	0.46	1.61
Ab2	5000	4860	1100	1100	2300	2200	10.0	0.50	2.08

Tabla .1: Velocidad del sonido (m/s) y módulo de Young (GPa) en las direcciones axial v_{ax} y E_{ax} , radial v_{ra} y E_{ra} y tangencial v_{ta} y E_{ta} de *Tilia mexicana* (TI), de *Caesalpinia platyloba* (Cae), de *Gliricidia sepium* (Gli) y de *Abies* sp (Ab1 y Ab2)

Espe	v_{ax1}	v_{ax2}	v_{ra1}	v_{ra2}	v_{ta1}	v_{ta2}	E_{ax}	E_{ra}	E_{ta}
AJ01	4293	4523	2488	2488	1361	1588	11.5	3.66	1.28
AJ02	4361	4959	2700	2700	1711	1662	12.9	4.32	1.69
AJ03	4366	4292	2400	2400	1566	1566	11.5	3.54	1.51
AJ04	3719	3951	1880	1880	1066	973	8.21	1.97	0.58
AJ05	4286	4121	2118	2480	2266	2350	9.97	2.98	3.00
AJ06	4684	4684	2220	2220	1580	1972	13.0	2.92	1.87
AJ07	4871	4871	2511	2260	2085	1460	12.8	3.07	1.69
AJ08	4215	4436	2360	2581	1920	1760	11.0	3.58	1.98
AJ09	4438	4527	2180	2180	1309	1252	11.4	2.69	0.93
AJ10	4635	4450	2577	2521	1645	1800	10.9	3.44	1.57
AJ11	4689	4366	2215	2400	1880	1614	11.5	2.98	1.71
AJ12	3957	3724	2375	2375	1255	1883	8.79	3.36	1.47
AJ13	4295	4369	1960	1960	1900	1900	10.2	2.08	1.95
AJ14	4225	4296	2300	2500	1225	1225	9.77	3.10	0.81
AJ15	4211	4142	2500	2300	1577	1286	9.65	3.19	1.13
AJ16	4607	4445	2380	2380	1336	1336	10.7	2.97	0.94
AJ18	3900	3727	1916	2090	1616	1322	8.39	2.31	1.25
AJ19	4292	4084	2260	2511	1831	1723	9.66	3.14	1.74
AJ20	3992	4057	2220	1580	1490	1862	8.57	1.91	1.49
AJ21	4408	4408	2135	2135	1557	1816	10.7	2.52	1.57
AJ22	3755	3595	2355	2208	1345	1517	7.47	2.88	1.13
AJ23	4839	4575	1480	1640	1981	1676	12.3	1.35	1.85
AJ24	3811	3699	2200	2291	1616	1763	8.57	3.07	1.74
AJ25	4749	4494	2569	2385	1515	1377	12.1	3.47	1.18
AJ26	4913	4482	2160	2347	1716	1545	11.1	2.56	1.34
AJ27	4413	4337	2160	2347	1490	1419	10.9	2.88	1.20

Tabla .2: Velocidad del sonido (m/s) y módulo de Young (GPa) en las direcciones axial v_{ax} y E_{ax} , radial v_{ra} y E_{ra} y tangencial v_{ta} y E_{ta} de *Alnus acuminata* AJ

Espe	v_{ax1}	v_{ax2}	v_{ra1}	v_{ra2}	v_{ta1}	v_{ta2}	E_{ax}	E_{ra}	E_{ta}
AP01	3672	3620	1642	2875	1247	1304	5.04	1.93	0.617
AP02	3718	3718	2488	2240	1239	1425	5.53	2.24	0.710
AP03	3716	3663	2180	1816	1450	1450	5.59	1.64	0.864
AP04	3610	3559	2642	2775	1357	1583	5.49	3.13	0.923
AP05	3418	3162	2725	1557	1588	1430	4.62	1.96	0.972
AP06	3333	3518	2166	2166	1671	1671	4.46	1.78	1.06
AP07	3561	3664	1204	1156	1400	1400	5.74	0.613	0.86
AP08	3239	3239	1191	1361	2042	1588	4.68	0.726	1.47
AP09	3720	3666	2057	1694	1600	2057	5.31	1.37	1.30
AP10	3834	3834	1950	1950	1628	1900	6.14	1.59	1.30
AP11	3639	3393	1729	1837	2060	2060	4.91	1.26	1.68
AP12	3686	3836	1388	1388	2625	2625	5.52	0.751	2.69
AP14	3695	3695	1291	1350	1750	1166	5.65	0.722	0.88
AP15	3681	3545	2825	2260	1144	1440	6.02	2.98	0.77
AP16	4054	4121	2458	2107	1557	1676	6.70	2.09	1.05
AP17	4570	4655	1893	1782	2187	2187	7.32	1.16	1.65
AR01	4687	4600	1705	1812	1628	1900	13.1	1.87	1.89
AR02	4718	4605	1900	1420	1465	1395	13.2	1.67	1.24
AR04	3499	3499	2220	1850	1327	1390	7.68	2.60	1.16
AR05	4540	4242	1585	1387	1375	2440	12.0	1.38	2.27
AR06	4518	4008	2085	1622	1375	1571	12.1	2.28	1.44
AR07	4609	4148	1387	1387	1465	1627	11.9	1.20	1.49
AR08	4168	4466	1470	1330	1542	1542	12.4	1.30	1.58
AR09	4600	4600	2078	1940	1571	1833	15.1	2.88	2.07
AR10	3603	3552	2400	2160	1400	1470	7.81	3.17	1.26
AR11	4026	4026	2280	1900	1340	1475	11.6	3.13	1.42
AR12	4423	4718	1430	950	1480	1480	14.9	1.01	1.57
AR13	3951	4145	1685	1311	1520	1381	10.3	1.41	1.32
AR14	4362	4362	1671	1462	1305	1236	11.5	1.48	0.973
AR15	3770	3898	1728	2016	1462	1462	9.10	2.17	1.32
AR17	4215	4215	2400	2400	1377	1262	10.9	3.55	1.07
AR18	3716	3949	2300	1640	1304	1103	8.83	2.33	0.87
AR19	4218	3722	1769	1642	1638	13409	10.1	1.86	1.42

Tabla .3: Velocidad del sonido (m/s) y módulo de Young (GPa) en las direcciones axial v_{ax} y E_{ax} , radial v_{ra} y E_{ra} y tangencial v_{ta} y E_{ta} de *Alnus jorullensis* (AP) y de *Arbutus glandulosa* (AR)

Espe	v_{ax1}	v_{ax2}	v_{ra1}	v_{ra2}	v_{ta1}	v_{ta2}	E_{ax}	E_{ra}	E_{ta}
CA01	5270	5060	2590	1900	1940	1940	20.0	3.77	2.82
CA02	4850	4760	2400		1239	1357	17.8	1.11	1.30
CA03	4770	4360	2500	2500	1664	1489	15.7	4.70	1.87
CA04	4860	4680	2830	2460	2200	2000	16.5	5.07	3.20
CA05	4857	4587	2121	2200	2054	1883	15.4	3.23	2.68
CA06	5265	4590	2700	2700	1980	2180	15.7	4.71	2.79
CA07	5259	5049	2850	2530	1221	1405	17.2	4.69	1.12
CA08	5376	4211	2161	1750	1945	1783	17.3	2.87	2.61
CA09	4955	4860	2071	2636	1800	1800	17.3	3.97	2.32
CA10	4860	5264	1444	2200	1468	1743	18.7	2.42	1.88
CA11	5449	5222	4500	2600	2000	1616	19.2	8.48	
CA13	5263	5156	1222	916	1561	1478	20.0	0.841	1.70
CA15	5692	4726	2441	2663	1733	2080	18.9	4.53	2.53
CA16	4732	5016	2253	1953	1514	1927	16.7	3.11	2.08
CA17	5023	4834	2572	2176	1909	1750	18.3	4.24	2.52
CA19	5019	5228	2681	2565	1500	1565	19.7	5.16	1.76
CA20	4910	4646	2269	2458	1800	1384	17.3	4.23	1.92
CA21	5016	5118	2100	1896	1750	1826	18.0	2.79	2.24
CA22	4917	4823	2253	2441	1485	1733	17.8	4.13	1.94
CA23	4830	4834	2500	2380	1717	1668	17.4	4.44	2.14
CA24	5120	5321	2437	2052	1515	1377	19.5	3.61	1.50
CA26	5227	4646	2377	2140	1881	1770	16.5	3.46	2.26
CA27	5220	5335	2294	1950	1881	1770	19.5	3.15	2.33
CL01	3776	3776	2028	1577	925	740	6.89	1.57	0.335
CL02	3718	3831	1731	1629	846	956	7.31	1.45	0.416
CL03	3885	4209	1617	1768	933	1066	7.86	1.37	0.480
CL04	3560	3765	1780	1123	1066	1098	6.73	1.06	0.588
CL05	3769	3946	2078	1940	1030	1010	7.51	2.04	0.525
CL06	4060	4127	2128	1248	1000	1000	9.32	1.58	0.556
CL07	3945	3713	1775	2028	1008	950	6.98	1.72	0.456
CL08	3662	3772	2169	1658	880	960	7.45	1.97	0.456

Tabla .4: Velocidad del sonido (m/s) y módulo de Young (GPa) en las direcciones axial v_{ax} y E_{ax} , radial v_{ra} y E_{ra} y tangencial v_{ta} y E_{ta} de *Carpinus caroliniana* (CA) y de *Clethra mexicana* (CL)

Bibliografía

- [1] Shelbourne, C.J.A. & S. Ritchie. 1968. "Relationships between degree of compression wood development and specific gravity and tracheid characteristics in Loblolly Pine (*Pinus taeda*)".
- [2] Khurshudyan, P. A. 1958. "Some data on the relation between annual ring width and the physical and mechanical properties of Armenian oak wood". 12v. Aakad. Nauk. Arm. S. S. R. Biol. I. Seisk. Nauki 11(4):33-43.
- [3] De la Paz Pérez Olvera C. y A. Quintanar I. 1994. "Características anatómicas de la madera de cinco especies del Estado de Jalisco, México". Acta Botánica Mexicana 27:75-87.
- [4] Quintanar A. y C de la Paz Pérez O. 1995. "Anatomía de la madera de ocho especies de angiospermas. Boletín de la Sociedad Botánica de México". Bol. Soc. México 58:5-14
- [5] Romero, A. C. de la Paz Pérez O. y G. Corral. 1982. "Características anatómicas y físico mecánicas de ocho especies de coníferas de Baja California Norte". Ból. Téc. Inst. Nac. Invest. For. 57:5-48.
- [6] Huerta, C. J. y J. Becerra M. 1982. "Anatomía macroscópica y algunas características físicas de 17 maderas tropicales mexicanas". Bol. Div. Int. Nac. Invest. For. 46:7-61.
- [7] Dávalos, S. R., C. de la Paz Pérez Olvera, y A. Quintanar I. 1994. "Estudio Tecnológico de tres especies de *Quercus*". VI Congreso Latinoamericano de Botánica. Mar del Plata. Argentina.

- [8] American Society for Testing Materials .1993. "Standard test methods of testing small clear specimens of timber". ASTM D 143-83. 37-78p. Annual book of ASTM standards: 04.09 Wood. Philadelphia, PA, USA.
- [9] Orduña, F. y A. Quintanar. 1992. "A preliminary determination of the mechanical properties of four species of tropical wood from Mexico". Journal of Sound and Vibration 154(2):365-368.
- [10] Bucur, V. 1983. "An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees". Ultrasonics may 1983. 116-126.
- [11] Perry, T. y Wang Chi Wu. 1958. "Variation in the specific gravity in the Slash Pinewood and its genetic and silvicultural implications". TAPPI 41(4):178-180.
- [12] Dadswell, H. E., J. M. Fielding, J. W. P. Nicholls and A. G. Brown. 1961. "Tree to tree variations and the gross heritability of wood characteristics of *Pinus taeda*". TAPPI 44(3):174-179.
- [13] Toole, R.E. & W. N. Darwin. 1970. "Influence of variation in physical and chemical properties of southern red oak lumber on decay resistance". Mississippi State University, Forest Products Utilization Laboratory. Research Report No. 10, 8 pp.
- [14] Maeglin, R.R. 1977. "Natural variation of tissue proportions and vessel and fiber length in mature northern red oak". USDA. Forest Products Laboratory. 750-027/5.
- [15] Burley, J. 1982. "Genetic variation in wood properties" 151-169p. IN: New perspectives in wood anatomy (ed. P. Baas) The Hague.
- [16] Quintanar, A. 1985. "Estudio preliminar sobre la variación natural del peso de la madera de *Pinus oocarpa* Schiede en cinco localidades del Eje Neovolcánico". Tesis Profesional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional.
- [17] Hutchins, C. M. 1962. "The physics of violins". Scientific American. november, 79-93.

- [18] Haines, D. 1979. "On musical instrument wood.I." *Catgut Acoust. Soc. Newslett.* 31:23-32.
- [19] Schelleng, J. C. 1982. "Wood for violins". *Catgut Acoust. Soc. Newslett.* 37:8-19.
- [20] Rocaboy, F. and V. Bucur. 1990. "About the physical properties of wood of twentieth century violins". *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 6:21-28.
- [21] Bucur, V. 1995. "Acoustics of Wood". CRC PRESS. New York.
- [22] Bucur, V. 1992. "Viscoelastic behaviour of resonance wood expressed by ultrasonic measurements". *Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics.* 31-34.
- [23] Bucur, V. "Wood structural anisotropy estimated by acoustics invariants". *IAWA Bulletin n.s.* 9(1):67-79.
- [24] Bucur, V. & Chivers, R. C. 1991. "Acoustic Properties and Anisotropy of Some Australian Wood Species". *Acustica* 75:69-74.
- [25] Bucur, V., C. Herbé & G. Nosei. "Annual ring characteristics of *Pinus taeda* measured by ultrasonic and X-ray techniques". *IAWA Bulletin* 15(2):121-132.
- [26] Bucur, V. 1991. "Ultrasonic detection of reaction wood in european species". 10e *Congres Forestier Mondial.* Paris, France.
- [27] Bucur, V. A. Navarrete, M. T. de Troya, E. Sánchez, S. Garros & R. Diez. 1993. "Fungi decay in wood by combined nondestructive techniques". *Ultrasonics International 93 Conferences Proceedings.* 287-291.
- [28] Bauer, C. y G. Kilbertus. 1991. "Technique ultrasonore de Caractérisation du degré d'Alteration des bois de hetre et de pin soumis á l'Attaque de Différents Champignons". *Holzforschung* 45(1):41-46.
- [29] Bucur, V. & I. Bohnke. 1994. "Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood". *Ultrasonics* 32(5):385-390.

- [30] Bucur, V. "Anisotropy characterization of structural flakeboards with ultrasonic methods". *Wood and Fiber Science* 24(3):337-346.
- [31] Beraldo, A.L., A. Zoulalian y V. Bucur. 1994. "Application des ultrasons a un composite bois-ciment et mise en evidence du role inhibiteur des sucres sur la prise et le durcissement du ciment". *Seminaire Annuel de l'Ecole Doctorale PROMEN. Faculté de Médecine de Brabois. Vandoeuvre-les-Nancy. France.*
- [32] Quintanar, A., M. De Icaza, L. Rivera y C. De la Paz Pérez. 1998. "Algunas características anatómicas de tres especies de angiospermas de Huayacocotla, Ver." *Revista Madera y Bosques* 4(1):15-25.
- [33] Rzedowski, J. *Vegetación de México*. Limusa.
- [34] De la Paz Pérez O., P. Olvera C. y G. Corral. "Estudio anatómico de la madera de 26 especies de angiospermas de clima templado". *Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For.* 91:81-110.
- [35] Rebollar, D. S. 1977. "La madera de *Alnus firmifolia* y sus usos". *Ciencia Forestal*.
- [36] Barajas, J. 1980. "Diez especies del bosque caducifolio de las cercanías de Xalapa, Ver". *Biótica* 5:23-40.
- [37] De la Paz Pérez, O. C. y G. Corral L. 1980. "Estudio anatómico de la madera de once especies de angiospermas". *Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For.* 64:11-22.
- [38] Rebollar, S. C. de la Paz Pérez y A. Quintanar. 1996-1997. "Anatomía de la madera de ocho especies de la selva mediana subperennifolia de Quintana Roo, México". *Rev. Biol. Trop.*, 44(3)/45(1):67-77.
- [39] Quintanar, A. L. Rivera, A. Torre-Blanco y S. Rebollar. 1997. "Comparative histochemistry and cell morphology of sapwood and heartwood of *Gliricidia sepium* (Fabaceae)." *Rev. Biol. Trop.*, 43(3):1005-1011.
- [40] Hoadley, 1989. "Understanding wood". Tauton Press. USA. 256pp.
- [41] IAWA Committee. 1989. "List of microscopic features for hardwood identification". *IAWA Bull. n.s.* 10:219-232.

- [42] Kollmann, F. y W. Coté. 1968. "Principles of Wood Science and Technology". I. Solid Wood. Springer-Verlag. New York. 592 pp.
- [43] Panshin, J. y C. de Zeeuw. 1964. "Textbook of Wood Technology". Volume 1. McGraw-Hill. New York. 705 pp.
- [44] Quintanar, A. y C. de la Paz Pérez. 1994. "El uso de las maderas en los instrumentos musicales". ContactoS. 3ra. época. 6:7-15.
- [45] Ordóñez V.R, Bárcenas G, Quiroz A. 1989. "Características físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuiltianguis, Oax.". La Madera y su Uso. Boletín Técnico no. 21, Instituto de Ecología A.C. Xal. México.
- [46] Forest Products Handbook. s/a. "Handbook of wood technology" No. 72 .
- [47] De la Paz Pérez, O. 1982. "Anatomía de la madera de cinco especies de encinos de Durango". Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For. 43: 20-23.
- [48] Bucur, V y Perrin. 1988. Ultrasonic waves-wood structure. University of Cambridge. Proceedings Institute of Acoustics '88. Edinburgh. 10(2):200-206.
- [49] Coté W. 1968. "Ultrastructure of Cell Wall". Pergamon. London.
- [50] Jane, 1968. "The structure of wood". Pergamon. London.
- [51] Zobel, B. 1963. "Mejora genética de las propiedades de la madera de árboles forestales". Consulta Mundial sobre Genética Forestal y Mejora del árbol. Estocolmo. 24pp.
- [52] Tortorelli, A. 1956. "Maderas y bosques argentinos". ACME. Buenos Aires. 910 pp.
- [53] Avila, E. y A. Quintanar I. 1992. "De tal palo tal astilla: aspectos microestructurales de maderas arqueológicas". ContactoS. nueva época. 6:22-30.
- [54] Holmgren, P. K., N. H. Holmgren y L. C. Barnett (Eds.). 1990. "*Index Herbariorum*. Part I: The herbaria of the world". 693 pp. Regnum Veg. 120. New York.

- [55] Munsell Color Company 1990. "Munsell soil color charts". Baltimore, Maryland.
- [56] Kukachka, B. F. 1977. "Sectioning refractory woods for anatomical studies". USDA. Forest Service Research Note FLP-0236. Madison, Wisconsin 9 pp.
- [57] Johansen, D. A. 1940. "Plant Microtechnique". McGraw Hill. New York. 253 pp.
- [58] Chattaway, M. 1932. "Proposed standards for numerical values used in describing woods". Trop. Woods. 29:20-28.
- [59] IAWA Committee. 1937. "Committee on the standarization of terms of cell size. Standard terms of length vessel members and wood fibers". Trop. Woods. 51:21.
- [60] IAWA Committee. 1939. "Committee on the Nomenclature. Standard terms of size for vessel diameter and ray width". Trop. Woods 59:51-52.