



FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA

“Caracterización anatómica y propiedades físico-
mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniera en Tecnología de la Madera

PRESENTA:

Bianca Gilliana Alcaraz Vargas

DIRECTOR:

M.C. Marco Antonio Herrera Ferreyra

ASESOR:

Ing. Teresa García Moreno

Morelia, Michoacán
MAYO 2006

RESUMEN

La presente investigación se realizó con la finalidad de conocer las características anatómicas y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr (Alamillo) obteniendo los resultados que a continuación se describen.

En las características anatómicas macroscópicas, la madera de *P. deltoides* Bartr, presenta un **color** blanquecino en albura, y castaño claro en duramen; el **olor** es desagradable en estado verde, y se transforma en ligeramente agradable cuando está seca; el **sabor** se considera inapreciable en albura y ligeramente amargo en duramen.

El **hilo** se presenta de ligeramente inclinado a inclinado; el **veteado** es suave, la **textura** fina y el **brillo** de medio a alto.

En cuanto a las características anatómicas microscópicas, ésta especie presenta **poros** muy numerosos con acomodo difuso heterogéneo; **vasos** de longitud media y diámetro pequeño, las **zonas de crecimiento** son poco notorias; las **fibras** se encontraron libriformes, de longitud media y delgadas; los **rayos** apenas son visibles con lupa y muy numerosos, predominando los uniseriados de tipo homogéneo, se clasifican como de extremadamente bajos a bajos y angostos.

En cuanto a las propiedades físicas, la madera de *P. deltoides* Bartr presentó una densidad básica de 0.45 g/cm³; las contracciones fueron: volumétrica total de 13.57 %, tangencial total de 9.42 % y radial total de 4.24%; por último el punto de saturación de la fibra se presentó de 31.05 %,

De acuerdo a las propiedades mecánicas, los resultados obtenidos al 12% de contenido de humedad (CH), para los ensayos de flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular, tensión perpendicular, y dureza estática, se presentaron dentro de las clasificaciones media y alta.

Tomando en cuenta las características anatómicas y los valores de las propiedades físicas y mecánicas, además de las especificaciones que indican para algunos usos y productos Echenique y Plumptre (1994) y Sotomayor (1987), esta madera puede ser empleada en elementos no estructurales para interiores de edificios (molduras); usos no estructurales para interiores (lambrin en paneles), y artículos de cocina (trastes, tablas de picar, cucharas y otros); así como en artículos novedosos de artesanías como: artículos torneados, escritorios, tallados, anillos, bancos, juguetes, vasijas, mangos de cuchillos y otros.

ÍNDICE GENERAL

Caracterización anatómica y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr (Alamillo)

| | Página |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE | 3 |
| 2.1 Taxonomía..... | 3 |
| 2.2 Panorama general de <i>Populus sp.</i> en el mundo y en México... | 3 |
| 2.3 Distribución geográfica de <i>Populus sp.</i> | 4 |
| 2.4 Descripción botánica de la especie en estudio..... | 6 |
| 2.5 Reproducción del género <i>Populus sp.</i> | 8 |
| 2.6 Adaptación del género <i>Populus sp.</i> | 8 |
| 2.7 Usos actuales de la especie en estudio y de algunas otras del mismo género alrededor del mundo..... | 8 |
| 3 ANTECEDENTES | 10 |
| 4 OBJETIVOS | 12 |
| 5 METODOLOGÍA | 13 |
| 5.1 Materiales de estudio..... | 13 |
| 5.2 Preparación del material de estudio..... | 13 |
| 5.3 Descripción anatómica de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 14 |
| 5.4 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 18 |
| 6 RESULTADOS | 25 |
| 6.1 Descripción anatómica de la madera de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 25 |
| 6.2 Propiedades físicas y mecánicas de la madera de <i>P. deltoides</i> Bartr | 31 |
| 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 39 |
| 9 BIBLIOGRAFÍA | 41 |
| 10 APÉNDICES | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Mapa de la región nativa de <i>Populus deltoides</i> | 5 |
| Figura 2. Árbol de <i>Populus deltoides</i> Bartr..... | 6 |
| Figura 3. Corteza del árbol..... | 7 |
| Figura 4. a) Hoja a detalle..... | 7 |
| b) Conformación de una ramilla..... | 7 |
| c) Posición de las hojas en la ramilla..... | 7 |
| Figura 5. Ubicación del árbol derribado para el estudio..... | 13 |
| Figura 6. Troceo del árbol estudiado..... | 14 |
| Figura 7. a) Rodaja para descripción..... | 15 |
| b) Cubos para obtención de preparaciones..... | 15 |
| c) Tablillas para descripción macroscópica de la madera..... | 15 |
| d) Preparaciones para caracterización microscópica de la madera..... | 15 |
| Figura 8. a) Olla de presión..... | 16 |
| b) Microtomo de deslizamiento..... | 16 |
| c) Entintado de los cortes típicos en cajas de petri..... | 16 |
| d) Material montado y etiquetado..... | 16 |
| Figura 9. Microscopio óptico con ocular micrométrico..... | 17 |
| Figura 10. a) Aserradero..... | 18 |
| b) Sierra cinta principal..... | 18 |
| c) Taladro de banco..... | 18 |
| d) Sierra tabletera..... | 18 |
| e) Canteadora..... | 18 |
| f) Sierra radial..... | 18 |
| g) Cabeceadora..... | 18 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 11. a) Probeta de albura y de duramen..... | 19 |
| b) Conjuntos de probetas para pruebas físicas (albura y duramen)..... | 19 |
| c) Balanza digital de 0.001 gr de precisión..... | 19 |
| Figura 12. Máquina Universal para ensayos mecánicos..... | 20 |
| Figura 13. a) Higrómetro de agujas..... | 21 |
| b) Higrómetro de agujas e higrómetro de contacto..... | 21 |
| c1, c2, c3) Obtención de listones para probetas..... | 21 |
| d) Apilado del material previo a la obtención de las probetas..... | 21 |
| Figura 14. a) Probetas de flexión estática..... | 22 |
| b) Accesorio y ensayo de flexión estática..... | 22 |
| Figura 15. a) Probetas para compresión paralela al grano..... | 22 |
| b) Accesorio y ensayo para compresión paralela al grano..... | 22 |
| Figura 16. a) Probetas para compresión perpendicular al grano..... | 23 |
| b) Accesorio y ensayo para compresión perpendicular al grano..... | 23 |
| Figura 17. a) Probetas para tensión perpendicular al grano..... | 23 |
| b) Accesorio y ensayo para tensión perpendicular al grano..... | 23 |
| Figura 18. a) Probetas para dureza estática..... | 24 |
| b) Accesorio y ensayo para dureza estática..... | 24 |
| Figura 19. a) Rodaja de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 25 |
| b) Sección de duramen en la rodaja de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 25 |
| Figura 20. a) Tablilla de duramen y albura..... | 26 |
| b) Tablilla que muestra el tipo de hilo..... | 26 |
| c) Tablillas en corte tangencial, radial, y transversal..... | 26 |
| Figura 21. a) Zona de transición. Objetivo 2.5x..... | 27 |
| b) Arreglo de poros. Objetivo 4x..... | 27 |
| Figura 22. a) Elemento de vaso y fibras..... | 28 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| b) Perforación del vaso y lígula..... | 28 |
| c) Puntuaciones rayo-vaso..... | 28 |
| d) Puntuaciones de pared de vaso..... | 28 |
| Figura 23. a) Rayos uniseriados..... | 29 |
| b) Constitución de los rayos y vista de los elementos de vaso en corte tangencial..... | 29 |
| Figura 24. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albura en densidad básica..... | 46 |
| Figura 25. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albura en contracción volumétrica..... | 46 |
| Figura 26. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albura para saturación de la pared celular..... | 47 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Medición de los elementos estructurales..... | 17 |
| Cuadro 2. Resultados de los elementos de vaso en la madera..... | 29 |
| Cuadro 3. Resultados de las mediciones de los rayos..... | 30 |
| Cuadro 4. Resultado de las mediciones de las fibras en material disociado..... | 30 |
| Cuadro 5. Resultados de la densidad básica en <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 31 |
| Cuadro 6. Resultados obtenidos en contracción de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 31 |
| Cuadro 7. Resultados obtenidos en la saturación de la pared celular de <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 31 |
| Cuadro 8. Resumen de los resultados de las pruebas físicas para <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 32 |
| Cuadro 9. Resultados del análisis de varianza en densidad básica para <i>P. deltoides</i> Bartr. SS= Suma de cuadrados, F=f de ficher..... | 33 |
| Cuadro 10. Resultados del análisis de varianza en contracción volumétrica para <i>P. deltoides</i> Bartr. SS= Suma de cuadrados, F=f de ficher | 33 |
| Cuadro 11. Resultados del análisis de varianza para saturación de la pared celular en <i>P. deltoides</i> Bartr. SS= Suma de cuadrados, F=f de ficher | 33 |
| Cuadro 12. Resultados de ensayos mecánicos realizados para <i>P. deltoides</i> Bartr.... | 34 |
| Cuadro 13. Clasificación y características en los índices de calidad de pulpa para <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 36 |
| Cuadro 14. Clasificación de los ensayos mecánicos en <i>P. deltoides</i> Bartr..... | 38 |

1 INTRODUCCIÓN

La palabra ciencia, en latín *scientia*, significa **conocer**, término que se emplea para referirse al conocimiento sistematizado en cualquier campo. La búsqueda del conocimiento se puede dar a través de: la “ciencia pura”, la “ciencia aplicada” (búsqueda de usos prácticos del conocimiento científico) y de la tecnología, a través de la cual se llevan a cabo las aplicaciones.

El conocimiento se divide en dos tipos: práctico, que es aquel que está ordenado a un fin y sirve para dirigir la conducta; y el teórico, que busca encontrar el sentido de las cosas. La fusión de ambos, nos llevan a desarrollar el conocimiento científico mediante la investigación, la cual en nuestros días, es tan importante como lo era en la época de Galileo (Encarta, 2005).

Tomando como base lo mencionado anteriormente, se presenta el trabajo de Tesis “**Caracterización anatómica y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr**”, que pretende, por medio de la investigación científica, dejarle un pequeño pero significativo legado a la ciencia, de manera que se enriquezca nuestro conocimiento práctico y teórico en relación con las especies forestales que integran nuestros alrededores, así como seguir motivando a nuevas generaciones en el campo de la investigación.

Hoy en día en nuestro país, surge la necesidad de estudiar y aprovechar especies arbóreas maderables susceptibles de aprovechamiento que tengan como características primordiales: gran capacidad de reproducción, adaptación a diversas condiciones de clima y suelo, crecimiento acelerado, fustes rectos, entre muchas otras.

En este contexto surge el género *Populus sp.* (Álamo), que ha sido ya muy utilizado en buena parte del mundo con excelentes resultados, con el objetivo de satisfacer la enorme demanda de industrias transformadoras de: pulpa celulósica, tableros contrachapados, compuestos, y reconstituidos, madera para la construcción, fabricación de muebles y artesanías y de esta manera detener un poco el aprovechamiento de otras especies que tengan mayor valor ecológico para el bosque, o un valor comercial importante en otro tipo de usos.

De la misma manera las plantaciones de álamo buscan brindar protección medioambiental a ecosistemas dañados, en Estados Unidos por ejemplo, se intensifica su cultivo a lo largo de ríos para combatir la erosión y la escorrentía de productos químicos de la agricultura; y en Suecia y Nueva Zelandia se han explotado las aplicaciones potenciales de estas plantaciones para fitorremediación (Ball *et al.*, 2005).

Pero la posibilidad de utilización de las especies (en general), requiere de un conocimiento importante de su comportamiento frente a procesos de transformación, con el propósito de establecer la posibilidad de contar con un material adecuado desde el punto de vista tecnológico, para ser empleado en aquellos usos que estén acordes con sus potencialidades.

En relación al aprovechamiento de la madera de Álamo, en nuestro país, no se encontraron antecedentes ni información acerca de los procesos de transformación, lo que la hace una especie más susceptible de investigación, debido a que, aunque no es nativa de México, parece estar ya bien adaptada al medio y por si fuera poco con características particulares excepcionales. El álamo se considera un árbol ideal en los estudios de genética forestal y biotecnología en regiones templadas y boreales por su rápido crecimiento, su capacidad de reproducción vegetativa, y una gran capacidad de adaptación (Ball, *op.cit.*).

Considerando lo antes mencionado y con las buenas referencias que se tienen del género *Populus sp.*, se realiza este trabajo que aportará la información relativa a la caracterización anatómica, así como propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr, que se espera sirva como pauta para nuevas investigaciones que sin duda serán valiosas para su buen aprovechamiento.

2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE

2.1 Taxonomía

Familia: Salicaceae (Metcalfé y Chalk, 1972)

Nombre Científico: *Populus deltoides* Bartr¹.

Etimología: El nombre genérico deriva del Latín “Populus”, que significa un gran número; *deltoides* viene del griego que significa triangular (The vplants Project, 2006)

Nombres comunes

Álamo: nombre con el cual se le conoce en la totalidad del estado de Michoacán y prácticamente en todo el Territorio de la República Mexicana, en nuestra entidad erróneamente se le confunde con la especie natural de *Populus tremuloides* (Michx.) también llamada **Alamillo**.

Mundialmente también se le conoce con el nombre de **Chopo** y **Eastern Cottonwood**, este último para la región de Norte América principalmente (Hoadley, 1990).

2.2 Panorama general de *Populus sp.* en el mundo y en México

Alrededor de 70 países cultivan álamos y sauces en combinación con otras especies forestales naturales, en plantaciones y como árboles separados en el paisaje (incluidos sistemas agroforestales). Ball *et al.* (2005), da a conocer los informes de los países de la Comisión Internacional del Álamo (CIA) 2004, indicando que cubren una superficie de más de 80 millones de hectáreas en todo el mundo.

La Federación de Rusia, Canadá y los Estados Unidos de América son los países con más extensas superficies de bosques naturales de álamos y sauces, mientras que China, India y Pakistán cuentan con las más extensas plantaciones. México, a pesar de tener como vecino a uno de los países con mayor extensión, no figura dentro de los países mencionados

Originarios de zonas templadas y subtropicales, los árboles y arbustos de la familia Salicaceae, que incluyen Álamos (*Populus sp.*) y Sauces (*Salix sp.*), son de crecimiento rápido y de fácil propagación vegetativa. Muchas de las especies se adaptan a muy diversas

¹ La identificación del árbol fue realizada por el Biol. Xavier Madrigal Sánchez Profesor de la Facultad de Biología y de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependientes de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.

condiciones de clima y suelo, desde el calor del desierto chino hasta el frío y el viento de los Andes sudamericanos. Son fáciles de cultivar y constituyen un componente importante de los sistemas agroforestales, a menudo para pequeños agricultores. Suministran una amplia gama de productos madereros (madera en rollo, industrial, postes y estacas, pasta y papel, tableros reconstituidos, contrachapados, chapa, madera aserrada, jaula de embalaje, tarima industrial, muebles y leña); no madereros (forraje), y servicios (abrigo, sombra y protección del suelo, del agua, de los cultivos, del ganado y de la vivienda). Álamos y Sauces desempeñan un papel importante en la fitorremediación (retirada de metales pesados para purificar suelos contaminados) de tierras degradadas, la rehabilitación de ecosistemas frágiles (lucha contra la desertificación) y la restauración de paisajes forestales. Por su crecimiento rápido son eficaces para la retención del carbono. Ofrecen oportunidades de empleo, impulsan las exportaciones y contribuyen al desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad de los medios de vida en las zonas rurales (Ball *et al.*, 2005).

En México la introducción del género *Populus sp.*, según P. Trujillo (comunicación personal, Noviembre, 2005; miembro del programa de plantaciones forestales comerciales mediante técnicas brasileñas, COFOM, Morelia) se realizó hace aproximadamente 20 años con el fin de cubrir servicios ambientales, principalmente forestación urbana, aunque hace un par de años concluyó con poco éxito, por los graves daños que ocasionó en banquetas de calles y avenidas.

En cuanto al aprovechamiento del Álamo en México no se encontró ninguna referencia, no porque no figure dentro de las especies arbóreas de nuestro territorio, sino porque es una especie que no se tiene estudiada y que por tanto no se le ha dado el uso más adecuado.

2.3 Distribución geográfica de *Populus sp.* (INFOR, 2005)

El género *Populus sp.* es originario del Hemisferio Norte, África, Asia, y Europa, pero que se ha propagado por casi todo el mundo por su gran capacidad de reproducción, actualmente se considera una especie mundialmente conocida.

Se reconocen más de 30 especies, entre ellas, las más importantes son *Populus nigra* y *Populus deltoides*, esta última, material de nuestro estudio, es nativa de Norte América (Fig. 1), de donde se presume fue traída a territorio mexicano.

De estas especies, se han obtenido más de un centenar de híbridos o cultivares de fácil propagación vegetativa y de alta calidad forestal. En Chile destacan los híbridos de *Populus x euramericana*, I-63/51 (Rolando); el I-214 y el I-488.



Figura 1. Mapa de la región nativa de *Populus deltoides* Bartr.²

En México de acuerdo a Avitia (2005), se han encontrado en la parte norte de nuestro país, algunos manchones de bosque natural de *Salix sp.* y *Populus sp.* nativos de Norte América, aunque no existe ninguna cifra que nos de una idea de la superficie que abarca.

² Por Haverbeke (s/f), Silvics of North America

2.4 Descripción botánica de la especie en estudio³

Forma

Árbol de aproximadamente 17 m de altura y diámetro a la altura del pecho (dap) de 37cm, de tronco recto con las ramas mayormente ascendentes (Fig. 2).



Figura 2. Árbol de *Populus deltoides* Bartr

Corteza

La corteza es casi lisa de color gris olivo suave con fisuras de color blanquecinas, que con los años se agrieta longitudinalmente tornándose de un color gris oscuro con gris (HUE5Y 5/1 y HUE5Y 8/1; de acuerdo a Munsell, 1975) (Fig. 3).

³ La descripción botánica de la especie en estudio fue llevada a cabo con la valiosa colaboración de la M.C. Patricia Silva Sáenz, profesora de la Facultad de Biología y de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependientes de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



Figura 3. Corteza del árbol

Hojas

Hojas en posición espiralada en la ramilla (Fig 4c), de textura papirácea, las hojas maduras alcanzan entre 10.5 y 12.5 cm de longitud y de 10.5 y 11.5 cm de ancho, son de forma triangular-deltaoidea con margen dentado a denticulado (Fig. 4a), presentan un ápice largamente acuminado y con la base de obtusa a aguda. Los pecíolos son largo ensanchados en la base, de 7.5 y 10 cm de largo, aplastado lateralmente. Limbo verde por ambas caras (Fig. 4b).

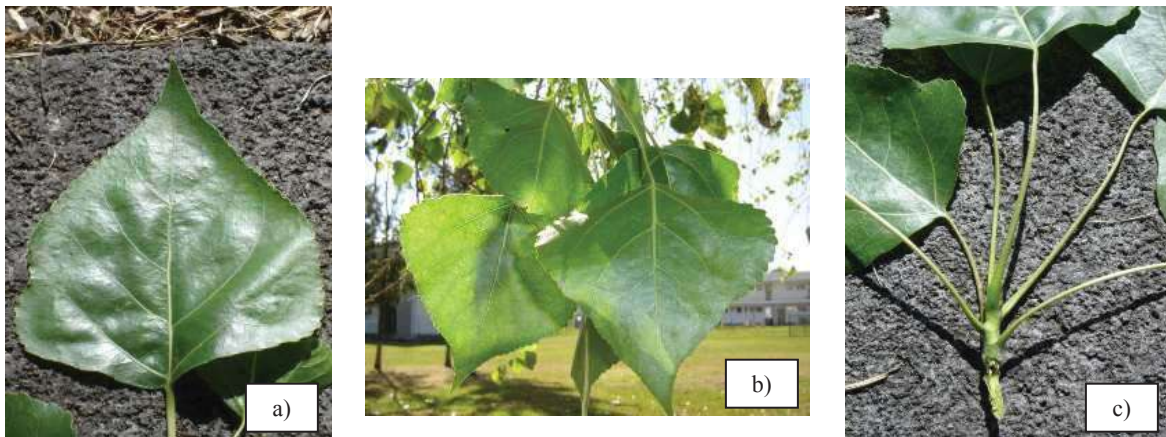


Figura 4. Fotografías de hojas y ramillas de *P. deltoides* Bartr; **a)** Hoja a detalle; **b)** Conformación de una ramilla; **c)** Posición de las hojas en la ramilla

Nota: Las muestras de flor y fruto de *Populus deltoides* Bartr, no pudieron recolectarse, debido a que al espécimen no se le vio en estado de floración y mucho menos de fructificación.

Lo más probable es que la forma de reproducción de esta especie (masculina), se realice de manera vegetativa (agámica), según X. Madrigal Sánchez (comunicación personal, enero 15, 2006; Profesor e Investigador de la Facultad de Biología y de Ingeniería en Tecnología de la Madera dependientes de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia).

2.5 Reproducción del género *Populus* sp.

Los álamos son fáciles de multiplicar por medios vegetativos. Estas características permiten desarrollar nuevas plantas facilitando a los cultivadores multiplicar con rapidez y sencillez la descendencia de determinados árboles con atributos deseables (crecimiento rápido, fuste recto, madera blanca, de densidad media, etc.).

La reproducción sexual en este género es poco frecuente, ya que la germinación de las semillas se ve impedida por el ataque de hongos, además de requerir mucha luz y humedad. Por esta razón y dada su gran capacidad para reproducirse vegetativamente, es que son propagados por los medios antes mencionados. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2005)

2.6 Adaptación del género *Populus* sp.

Los álamos son originarios de zonas templadas y subtropicales. Se caracterizan por su extraordinaria avidez de agua y de luz. Generalmente son de crecimiento rápido, como mencionamos anteriormente, teniendo gran aptitud para la reproducción vegetativa y para la hibridación inter-específica.

Es una especie tolerante, que soporta heladas severas, de gran plasticidad, debido a la variedad de híbridos. Prefiere suelos limosos, fértiles, profundos, aireados, con menos de 20-30% de arcilla, de pH neutro (6.5-7). Sus requerimientos hídricos varían entre 4.000 y 6.000 m³/ha/año (Grupo de acción forestal, 2005).

Por su adaptabilidad a diferentes suelos y condiciones climáticas, ha propiciado su uso extendido en países en vías de desarrollo y desarrollados, desempeñando un papel importante en la vida rural de éstos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2005).

2.7 Usos actuales de la especie en estudio y de algunas otras del mismo género alrededor del mundo

En lo que respecta al estado de Michoacán, según P. Trujillo (comunicación personal, Noviembre, 2005; miembro del programa de plantaciones forestales comerciales mediante técnicas brasileñas, COFOM, Morelia), inicialmente se empleó para la reforestación de zonas rurales y urbanas, concluyendo con muy poco éxito, y actualmente los ejemplares que aun existen tienen uso ornamental urbano.

De acuerdo al uso de la madera de Álamo en nuestro país no se tiene ningún registro, pero T. García (Comunicación personal, Diciembre 2005; Profesor de la Facultad de Ingeniería

en Tecnología de Madera dependiente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia) menciona, que hace algunos años comenzó a introducirse madera en escuadría procedente de Guatemala y más recientemente de Estados Unidos de América y de Chile (híbrido), para utilizarse en la fabricación de muebles infantiles.

Mundialmente (Ball *et al.*, 2005), los usos más comunes para el género *Populus sp.* son: pasta, papel y cartón en Europa, además de embalajes y tableros reconstituidos, estos últimos son también de uso en América del Norte y Argentina; en Chile, Rusia, India, República de Corea y Suecia se utiliza para producción de fósforos; en Finlandia, Turquía y Argentina se usa como madera de construcción; las artesanías y los trabajos con mimbre son usos que se le dan en Chile y la Federación de Rusia; para la fabricación de muebles es muy utilizada en Bélgica y Chile.

Tiene también un sin fin de usos medioambientales, tales como protección del suelo y el agua, para fitorremediación, así como para la retención del carbono, para lo cual es muy empleado en Canadá, en donde el programa forestal 2020 está promoviendo plantaciones de crecimiento rápido, con el álamo como un componente principal, sobre tierras antes no forestales (sobre todo agrícolas), entre muchos otros (Ball, *op.cit.*).

3 ANTECEDENTES

Se encontró relativamente poca información relacionada directamente con la especie de *Populus deltoides* Bart; aún así, se tienen algunas referencias importantes a nivel de género, de familia, y propiamente de algunos híbridos de *Populus sp.*, éstos se mencionan a continuación.

Aspectos de reproducción de la especie

La Comisión Nacional del Chopo, a través del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2005), menciona que el medio más recomendable para la multiplicación del álamo es la reproducción vegetativa; la cual consiste en el desprendimiento de porciones de tejido capaces de reproducir el individuo completo, como ocurre en la multiplicación por yemas, bulbilos, propágulos, etc. (Gola *et al.*, 1956).

Ball *et al.*, (2005), coincide con lo antes mencionado y además asegura que es una especie relativamente fácil de manipular, por ello es el género arbóreo más utilizado en estudios de modificación genética y el segundo más empleado para la investigación biotecnológica en general.

Aspectos botánicos y tecnológicos del género *Populus sp.*

Hoadley (1990), en la publicación “Identifying Wood”, identifica las especies más comunes de *Populus*, en Norte América y Europa, además presenta una descripción macroscópica de *Populus deltoides* Bartr, colectado en la región norte de nuestro continente.

Metcalf y Chalk (1972) en la obra “Anatomy of the Dicotyledons”, presenta una descripción botánica y anatómica de la familia Salicaceae, en donde además menciona los dos géneros que la componen; *Populus* y *Salix*.

De manera similar Cutler *et al.* (1987) en su trabajo presentado como “Root Identification Manual of Trees and Shrubs”, realiza la descripción anatómica a nivel micro de la familia Salicaceae, aportando datos complementarios para la realización de este trabajo.

Jonson (1978) en el libro “La madera”, presenta un estudio a nivel de género (*Populus sp.*), en donde menciona que existen varias especies y numerosas variantes que crecen espontáneamente en varios países de la zona templada, siendo también numerosas las plantaciones realizadas para la obtención de su madera; la describe como una madera blanca, algunas veces con un tinte rosado o beige; generalmente de grano recto y de textura fina y uniforme, es ligera semejante a la del falso abeto, pero la de álamo es más firme y pesada. Aunque no es muy fuerte por su peso, es dura y no se agrieta fácilmente ni se astilla.

En condiciones que favorezcan la putrefacción, el álamo es poco estable pero asegura que a pesar de tener muy poca resistencia a la pudrición causada por hongos y otros organismos que la deterioran, tiene buena aceptación a los tratamientos de preservación.

En cuanto a la trabajabilidad de la madera de *Populus sp.* (Jonson, *op. cit.*), establece que aunque no es muy fuerte por su peso, es dura y no se agrieta fácilmente ni se astilla. Es aserrada y trabajada con facilidad, pero su superficie tiende a ser lanuda.

Dentro de los usos de la madera de *Populus sp.* (Jonson, *op. cit.*), la sugiere en utensilios de cocina, zapatos de madera, lana de madera y en ebanistería antigua.

Porter (2004) la presenta para empaques de alimentos, cajas de embalaje, pulpa y papel, madera contrachapada, carpintería y tableros de partículas, así como chapas decorativas, incluyendo trabajos de marquetería. Peters (2000) además considera aplicaciones en tableros de fibra orientada (OSB), muebles y madera para la construcción.

Forest Products Society (1999) en su publicación “Wood Handbook”, expone resultados de pruebas mecánicas como módulo de ruptura, módulo de elasticidad, compresión paralela, compresión perpendicular, tensión perpendicular, así como las pruebas físicas en contracción e hinchamiento tangencial, radial y volumétrico. De la misma manera encontramos propiedades de conductividad eléctrica y térmica para algunas especies del género *Populus sp.*

4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar las características anatómicas, y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr (Alamillo), para así contribuir al conocimiento científico y tecnológico de esta especie.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características anatómicas tanto macroscópicas como microscópicas de la madera de *P. deltoides* Bartr.
- Determinar el índice de calidad de pulpa de la especie.
- Determinar las propiedades físicas (densidad verde, densidad seca, densidad básica, contracción radial, contracción tangencial, contracción volumétrica, y saturación de la pared celular) y mecánicas (compresión paralela al grano, compresión perpendicular al grano, dureza estática, flexión estática, y tensión perpendicular al grano) de la madera en estudio.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, recomendar los usos más adecuados para la especie.

5 METODOLOGÍA

5.1 Material de estudio

Para la realización de este trabajo, se empleó la madera proveniente de un árbol sano de fuste bien conformado de *Populus deltoides* Bartr, que fue proporcionado por el Departamento de Servicios Generales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), y derribado en el mes de Febrero de 2005.

El lugar de la colecta fue en las propias instalaciones de la UMSNH. Es importante señalar que el árbol se encontraba en las mejores condiciones para su crecimiento ya que no tenía competencia alguna con ningún individuo.

El árbol presentó una altura total de 17 m y un diámetro a la altura del pecho (dap) de 37 cm (Fig. 5).



Figura 5. Ubicación del árbol derribado para el estudio

5.2 Preparación del material de estudio

El corte para el derribo del árbol se realizó a 30 cm de altura a partir del nivel del suelo. A partir de la base del fuste se obtuvo una troza de 130 cm de longitud para el estudio anatómico (troza A), y el resto se destinó para las pruebas físico-mecánicas (troza B), como se muestra en la Fig. 6, de acuerdo a lo propuesto por Revuelta y Zamora (1990).

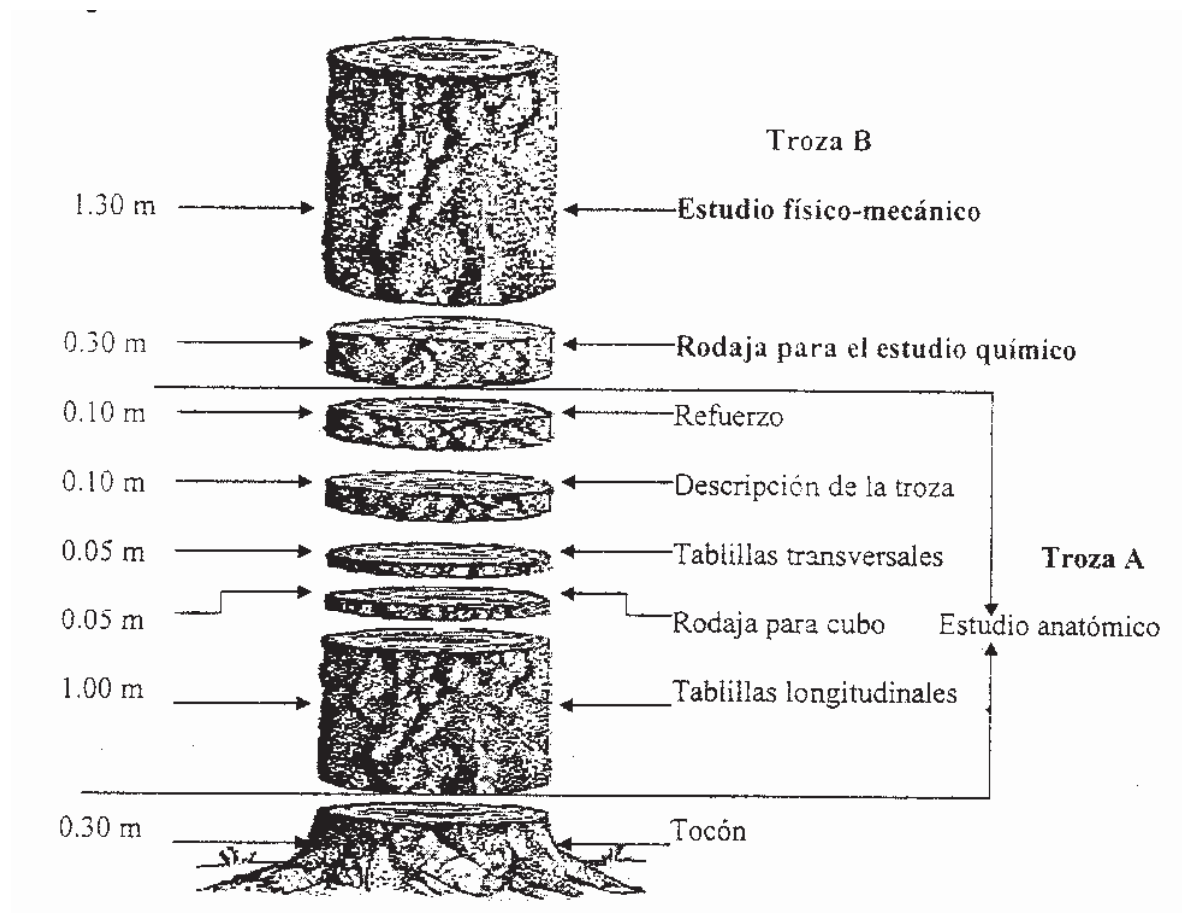


Figura 6. Troceo del árbol estudiado basado en Revuelta y Zamora (1990)

5.3 Descripción anatómica de la madera de *Populus deltoides* Bartr

A partir de la base de la troza “A” se cortó un tramo de 1 m para la obtención de tablillas longitudinales (radiales y tangenciales, de 1.5X7.5X15cm), enseguida 4 rodajas de 5, 5, 10 y 10 cm. De la primera rodaja se obtuvieron cuatro cubos de 2 cm por lado para los cortes típicos y material disociado para la caracterización anatómica microscópica de la madera. De la segunda rodaja se obtuvieron las tablillas transversales. Las tablillas longitudinales y transversales se utilizaron para describir las características organolépticas y macroscópicas de la madera. La tercera rodaja se empleó para describir la troza y la última quedó para eventualidades.

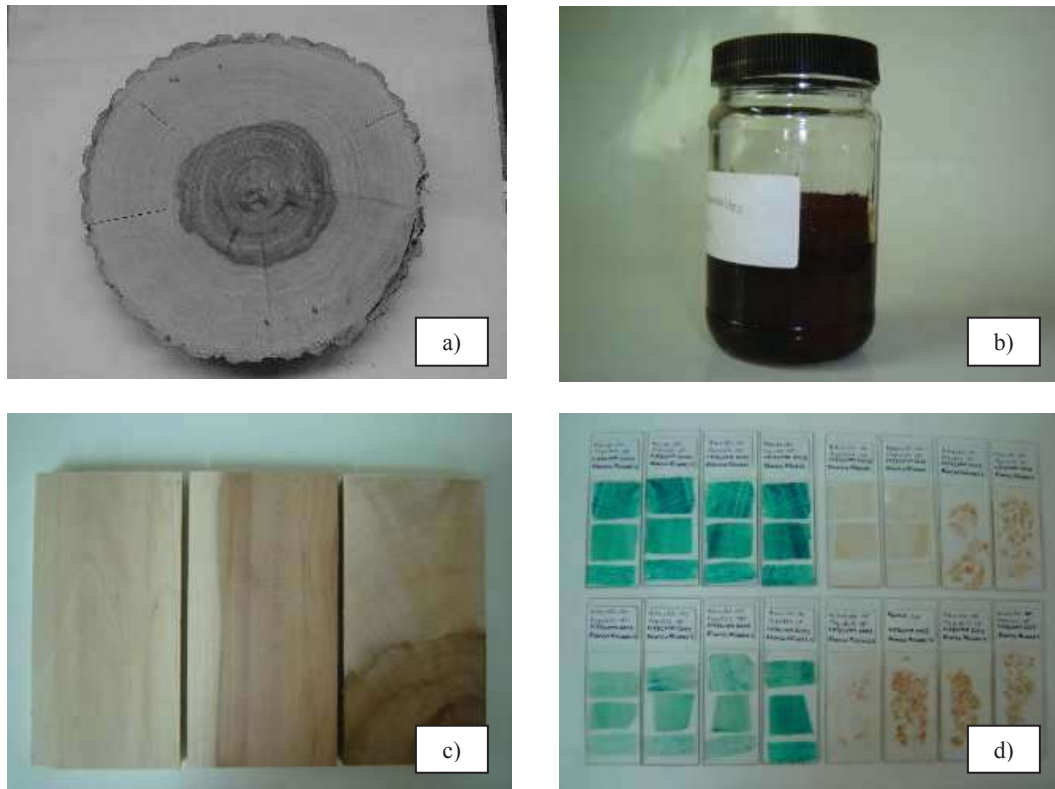


Figura 7. Material empleado para la descripción macroscópica y microscópica de la madera; **a)** Rodaja para descripción; **b)** Cubos para obtención de preparaciones; **c)** Tablillas para descripción macroscópica de la madera; **d)** Preparaciones para caracterización microscópica de la madera

Descripción de la rodaja

Para la descripción se tomaron en cuenta características como la forma, diferencia de coloración entre albura y duramen, forma y color de la corteza interna y externa. Para describir los colores se recurrió al uso de la tabla de colores Munsell (1975).

Descripción macroscópica de la madera

En base a los criterios establecidos por IAWA (1989) y Tortorelli (1956) y apoyados en el uso de la tabla Munsell (*op.cit.*), se describieron las características organolépticas y macroscópicas utilizando las tablillas longitudinales (radial y tangencial) y transversales, identificando: color, olor, sabor, coloración entre albura y duramen, hilo, veteado, textura, y brillo.

Descripción microscópica de la madera

Se utilizaron cuatro cubos, los cuales fueron sometidos a un proceso de ablandamiento por medio de cocción en una auto clave de uso doméstico (olla de presión casera marca Tefal con capacidad para 16 lt), utilizando agua destilada durante 16 horas (Fig. 8a). Los cortes

típicos para las preparaciones fijas se obtuvieron de un cubo elegido al azar, y con ayuda de un microtomo de deslizamiento marca Leitz (Fig. 8b); se pasaron a cajas de Petri (Fig. 8c), en donde se les agregó una solución de hipoclorito de sodio y agua destilada en relación 1:5, exponiéndolos al sol durante 5 minutos, se lavaron con agua destilada y se procedió a teñirlos con verde yodo durante media hora, decantando el exceso de colorante y se lavaron tres veces con alcohol al 50% (algunos cortes se dejaron al natural).

En seguida los cortes fueron deshidratados en alcoholes de concentración gradual: 50° (60 min), 60° (45 min), 70° (40 min), 80° (30 min), 96° (20 min) y absoluto (5 min), se aclararon con xilol marca Merck durante un minuto; a continuación cada uno de los tres cortes típicos se montaron en portaobjetos y se cubrieron con resina sintética, se les colocó un cubreobjetos para formar las preparaciones fijas. Se dejaron secar al aire por 15 días, para finalmente limpiarlas y etiquetarlas (Fig. 8d).



Figura 8. Equipo utilizado para la elaboración del material disociado y preparaciones fijas; **a)** Olla de presión; **b)** Microtomo de deslizamiento; **c)** Entintado de los cortes típicos en cajas de petri; **d)** Material montado y etiquetado

Para la obtención del material disociado se obtuvieron virutas de la cara radial de uno de los cubos, colocándolas en tubos de ensaye con disociador (mezcla de ácido acético glacial, ácido nítrico, ácido láctico y glicerina en partes iguales), y fueron sometidos a baño María. Después el disociado fue lavado con agua destilada, para en seguida, teñir el material con pardo de Bismarck, lavándose tres veces con alcohol al 50% para eliminar el sobrante del colorante. Posteriormente el material fue montado sobre portaobjetos y puesto a deshidratar

al medio ambiente. Ya deshidratados se procedió a aclararlos con xilol. Se aplicó una capa de resina sintética para montaje (distribuida por materiales y abastos especializados S.A. de CV.) y se procedió a colocar un cubre objetos, y aplicando presión en la preparación se desalojaron las burbujas de aire formadas durante el proceso de montaje, se dejaron secar al medio ambiente durante 15 días, después de los cuales, se procedió a limpiarlas y etiquetarlas, según metodología de Guridi y García (2000).

Para hacer las mediciones de los elementos estructurales se utilizó un microscopio óptico marca Iroscope, con ocular micrométrico (Fig. 9), con un tamaño de muestra de 50 mediciones para los siguientes elementos:

Cuadro 1. Medición de los elementos estructurales

| Elemento | Medición | Objetivo | | Material de origen | | |
|----------|---------------------------------------------|----------|-----|--------------------|--------------|-------------|
| | | 10x | 40x | Disociado | Corte Trans. | Corte Tang. |
| Fibras | Longitud de fibra (μm) | ✓ | | ✓ | | |
| | ϕ de fibra (μm) | | ✓ | ✓ | | |
| | Grosor de pared (μm) | | ✓ | ✓ | | |
| | ϕ de lumen (μm) | | ✓ | ✓ | | |
| Vasos | No. Poros/ mm^2 | ✓ | | | ✓ | |
| | Longitud de elementos (μm) | ✓ | | ✓ | | |
| | ϕ Tangencial de poro (μm) | ✓ | | | ✓ | |
| Rayos | No. rayos/mm | ✓ | | | | ✓ |
| | Altura de rayos (μm) | ✓ | | | | ✓ |
| | Altura de rayos (No. cel) | ✓ | | | | ✓ |
| | Ancho de rayos (μm) | ✓ | | | | ✓ |

ϕ =Diámetro

Los datos que se obtuvieron de dichas mediciones fueron empleados para determinar los valores mínimo, máximo, medio y moda. Para hacer la clasificación de los elementos mensurables se tomó como base el valor promedio y se hizo referencia a los parámetros de clasificación reportados por Tortorelli (1956) e IAWA (1989).



Figura 9. Microscopio óptico con ocular micrométrico.

Índice de calidad de pulpa

Con el promedio de los datos: longitud de fibra, diámetro de fibra, diámetro de lumen, y espesor de pared, se determinaron los índices de calidad de pulpa para papel, de acuerdo con Dadswell *et al.* (1959), Tomolang y Wangaard (1961), y Wangaard (1962) (Apéndice). Así mismo la clasificación de los índices de calidad de pulpa de la madera estudiada se realizó de acuerdo a la clasificación de Runkel, presentada por Petroff y Nordmand (1968) y por Porres y Valladares (1979), ambos citados por Téllez (2004).

5.4 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *P. deltoides* Bartr

La troza “B” se destinó para los ensayos físico-mecánicos. Para la determinación de éstos se utilizaron las especificaciones de la norma ISO (1972), la cual se señalará conforme al ensayo respectivo.

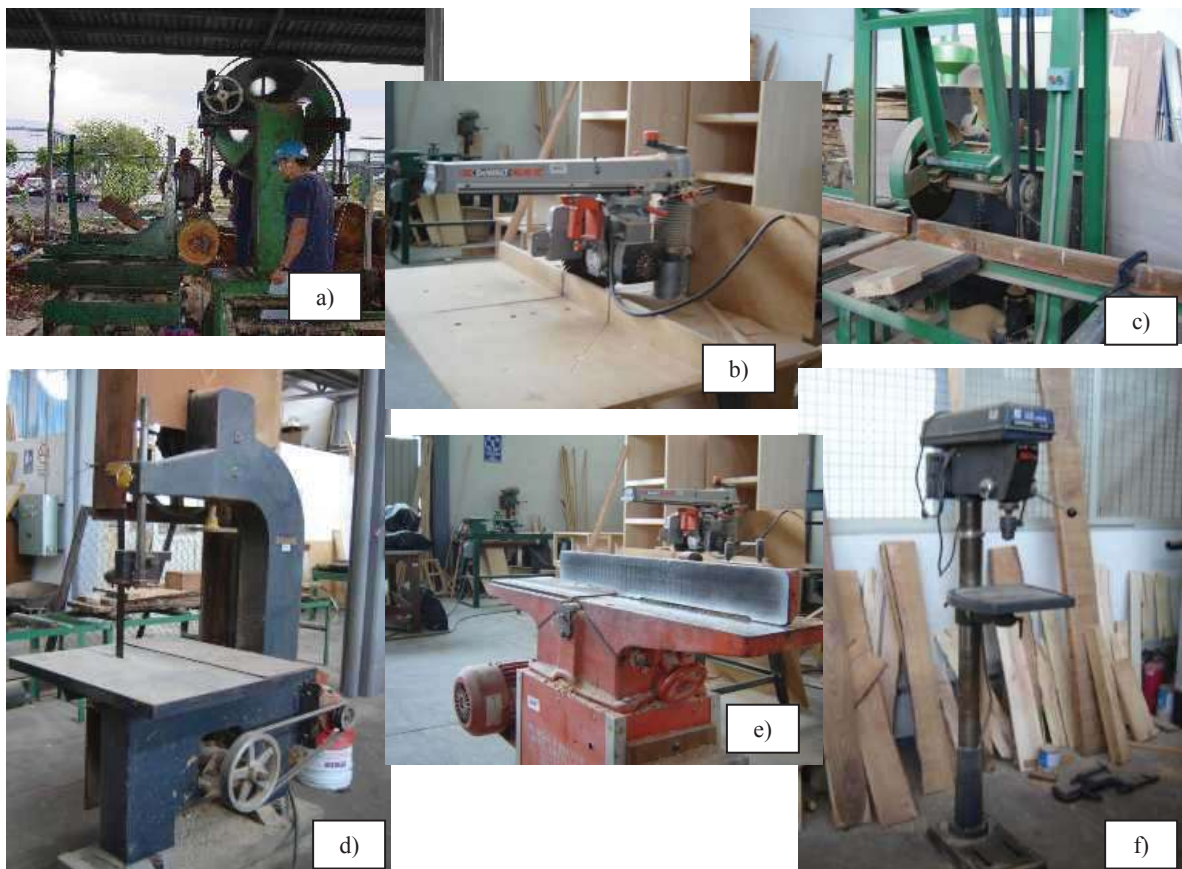


Figura 10. Equipo utilizado para la elaboración de las probetas requeridas en los ensayos físicos y mecánicos; a) Aserradero; b) Sierra radial; c) Cabeceadora; d) Sierra cinta; e) Canteadora; f) taladro de banco

Propiedades físicas de la madera

Para las pruebas de **contracción y densidad**, se utilizaron las especificaciones de las normas ISO 3129 (1972) y 3130 (*op.cit.*).

Las propiedades físicas a determinar fueron: densidad básica, densidad seca, densidad verde, contracción radial, contracción tangencial, contracción volumétrica, y saturación de la pared celular.

Con el material destinado para las pruebas físicas, se obtuvieron las probetas respectivas, muestreando por separado la madera de albura y la madera de duramen, para obtener en total 159 cubos perfectamente bien orientados. Se midieron (con un vernier manual de precisión 0.0001 mm) inicialmente en condición verde ($CH \geq 30\%$); posteriormente bajo las mismas condiciones de humedad, se pesaron con una balanza digital de 0.001 g de precisión y se deshidrataron en un horno de desecación hasta peso constante (Fig. 11); para que nuevamente se midieran y se pesaran, determinando con esto las propiedades físicas en estado anhidro⁴.



Figura 11. Equipo y material utilizado para la realización de las pruebas físicas; **a)** Probeta de albura y de duramen; **b)** Conjuntos de probetas para pruebas físicas (albura y duramen); **c)** Balanza de digital de 0.001gr de precisión

⁴ Ver formulario para pruebas físico-mecánicas en Apéndice

Saturación de la pared celular

Con el promedio de los datos: densidad verde, densidad seca, y densidad anhidra, se determinó el contenido de humedad correspondiente a la saturación de la pared celular de acuerdo a Babiak y Kúdela (1994) (Apéndice).

Propiedades mecánicas

Los ensayos realizados fueron: Flexión estática (ISO 3133), compresión paralela al grano (ISO 3787), compresión perpendicular al grano (ISO 3132), tensión perpendicular (ISO 3346) y dureza estática (ISO 3350), utilizando una máquina universal de pruebas mecánicas de 10,000 kg de capacidad (Fig. 12).



Figura 12. Máquina Universal para ensayos mecánicos

El material que se obtuvo para las pruebas mecánicas se apiló en un lugar ventilado en donde perdiera humedad (Fig. 13), hasta conseguir un contenido de humedad en equilibrio como lo marca la norma ISO 3129 (1975).

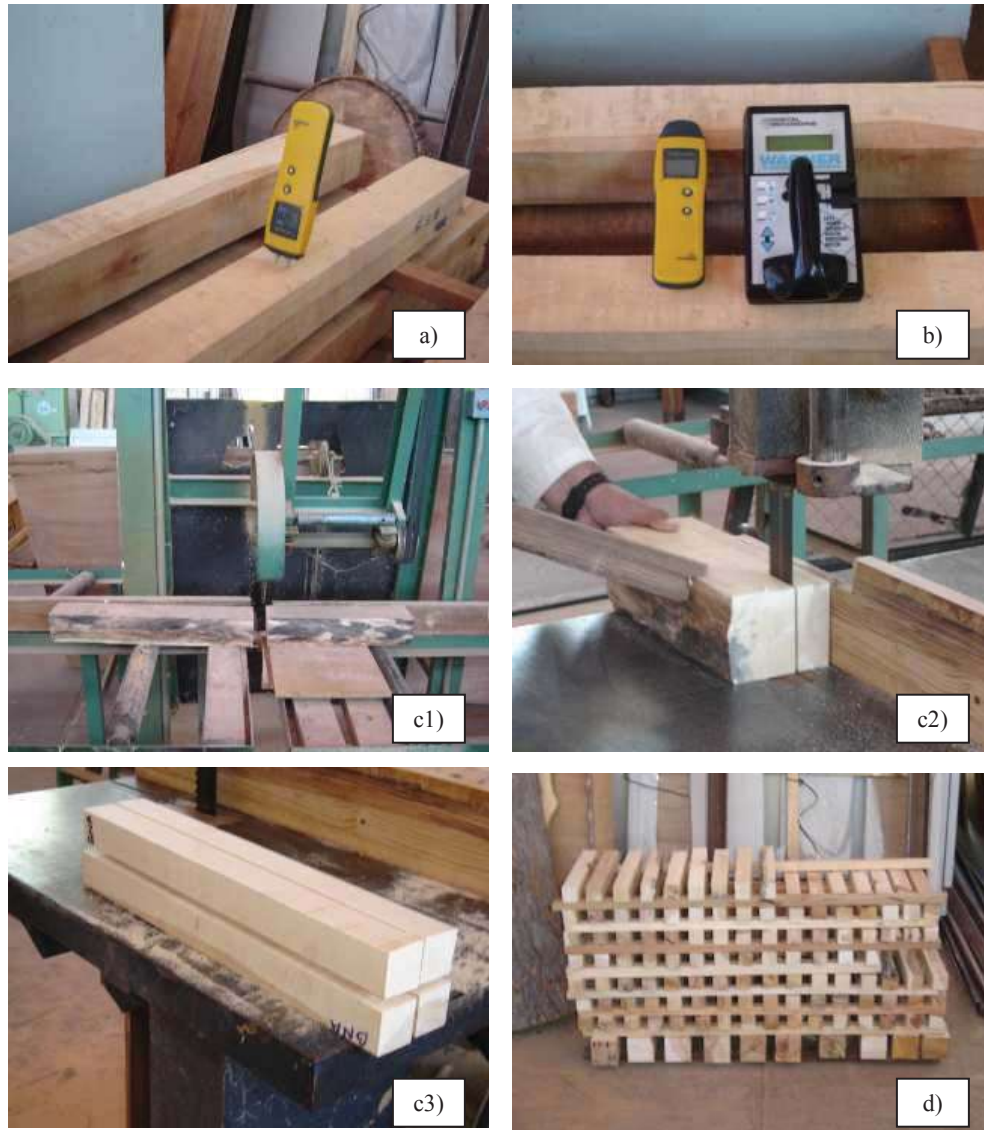


Figura 13. Equipo y procedimiento que se siguió para la obtención del material que posteriormente sería utilizado para la elaboración de las probetas para los ensayos mecánicos; **a)** Higrometro de agujas; **b)** Higrometro de agujas e higrometro de contacto; **c1), c2), c3)** Obtención de listones de los cuales posteriormente se obtendrán las probetas; **d)** Apilado del material previo a la obtención de las probetas

Flexión estática

Se obtuvieron 33 probetas de 20X20X380 mm (Fig. 14). La carga se aplicó sobre la cara radial de la probeta; se determinó el Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad (ELP), Módulo de Elasticidad (MOE), y el Módulo de Ruptura (MOR)⁵.

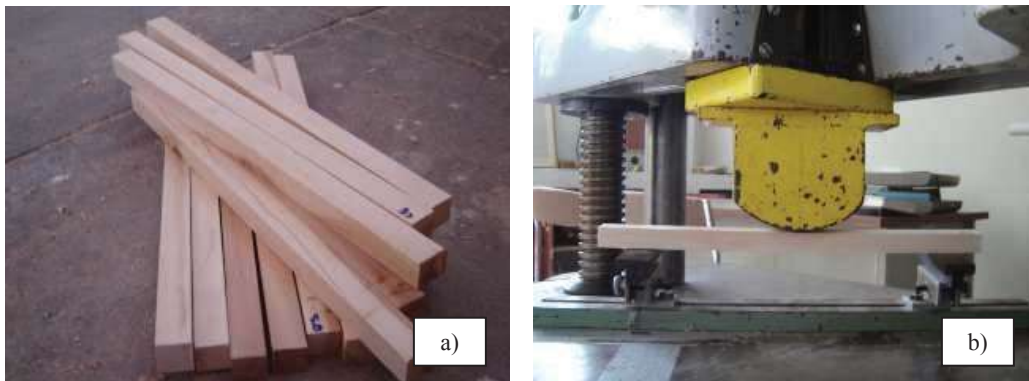


Figura 14. Probetas y ensayo de flexión estática; **a)** Probetas; **b)** Accesorio y ensayo

Compresión paralela al grano

Para este ensayo se utilizaron 43 probetas con dimensiones de 20X20X60 mm; determinando con esto el Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad (ELP), Módulo de Elasticidad (MOE), y el Módulo de Ruptura (MOR) (Fig. 15).

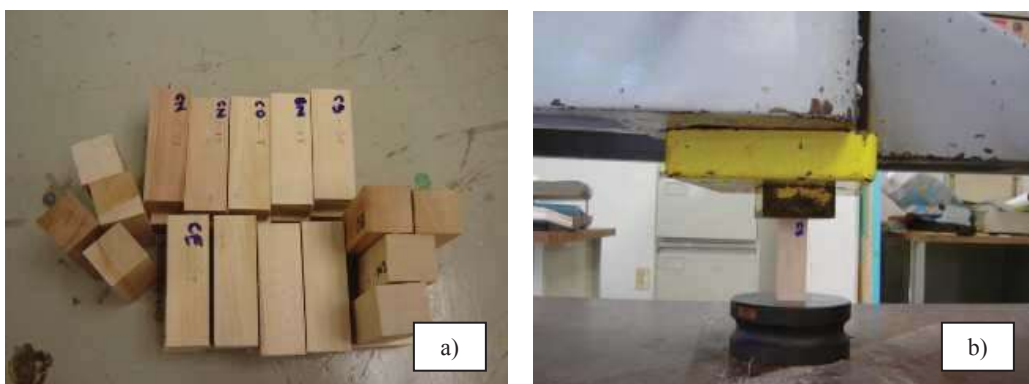


Figura 15. Probeta y ensayo de compresión paralela al grano; **a)** Probetas; **b)** Accesorio y ensayo

⁵ Ver formulario para pruebas físico- mecánicas en Apéndice

Compresión perpendicular al grano

Se emplearon 39 probetas de 20X20X60 mm (16 tangenciales y 23 radiales); la carga se aplicó sobre las caras radial y tangencial de las muestras y se calculó el Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad (ELP) para compresión perpendicular, y el Módulo de Elasticidad (MOE) (Fig. 16).

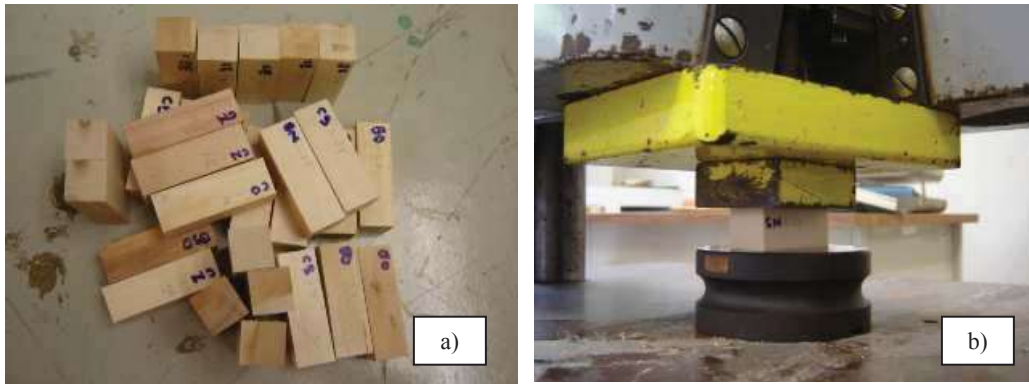


Figura 16. Probeta y ensayo de compresión perpendicular al grano; a) Probetas; b) Accesorio y ensayo

Tensión perpendicular al grano

Se obtuvieron 27 probetas de 50X50X75 mm, calculando el Esfuerzo Máximo a Tensión Perpendicular (EMTP) (Fig. 17).

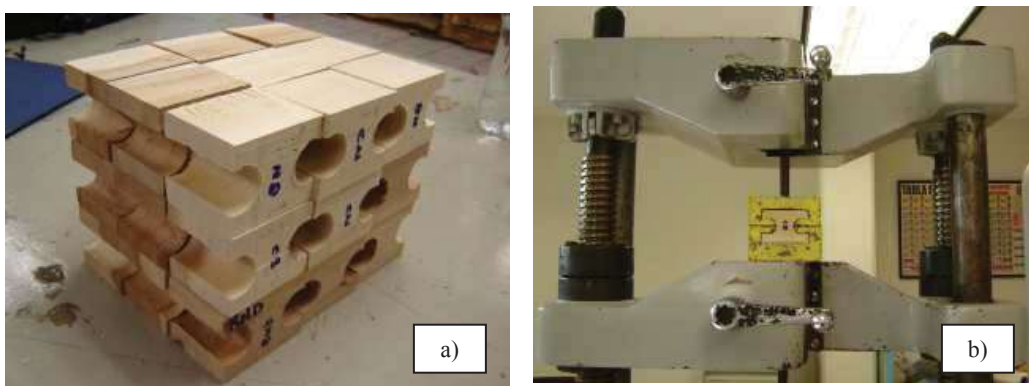


Figura 17. Probeta y ensayo de Tensión perpendicular al grano; a) Probetas; b) Accesorio y ensayo

Dureza estática

Se ensayaron 20 probetas de 50X50X50 mm. La carga se aplicó sobre los cortes transversales y cortes longitudinales (radiales y tangenciales) de las caras de las probetas, realizando así una penetración en cada cara (Fig. 18).

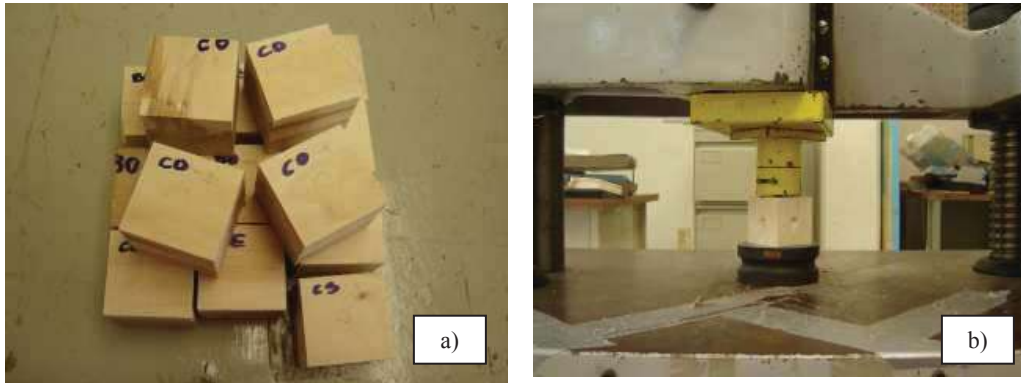


Figura 18. Probeta y ensayo de Dureza estática; **a)** Probetas; **b)** Accesorio y ensayo

6 RESULTADOS

6.1 Descripción anatómica de la madera de *Populus deltoides* Bartr

Descripción de la rodaja

Presenta un contorno casi circular, con un promedio de 32 cm de diámetro. Las ramillas jóvenes presentan corteza de color gris y apariencia lisa con lenticelas que con el tiempo se vuelven de fisuradas a placas de color grisáceas. En el corte transversal se diferencia fácilmente la corteza externa de la interna por presentar distinto color; la corteza externa presenta un grosor de 4 a 6 mm y la interna de 4 a 7 mm. La corteza interna es de color claro; la corteza externa se manifiesta en forma de laminillas intercaladas de un color gris oscuro con gris.

La médula más o menos se encuentra céntrica, la diferencia de coloración entre albura y duramen es notoria, siendo la albura de color blanquizco (HUE10YR8-1) y el duramen de color castaño claro (HUE7.5YR6/4). El duramen presenta de 7 a 8 cm de grosor, existiendo una zona de madera intermedia bastante ancha, y la albura no se puede determinar con precisión a simple vista.

Los rayos, por ser muy delgados no se aprecian, únicamente se identifican por las grietas, producto de la contracción de la troza. Se distinguen algunos nudos pequeños así como cicatrices de heridas. La médula es muy pequeña y consistente, aunque en ocasiones asociada a ésta existen cavidades grandes (Fig. 19).

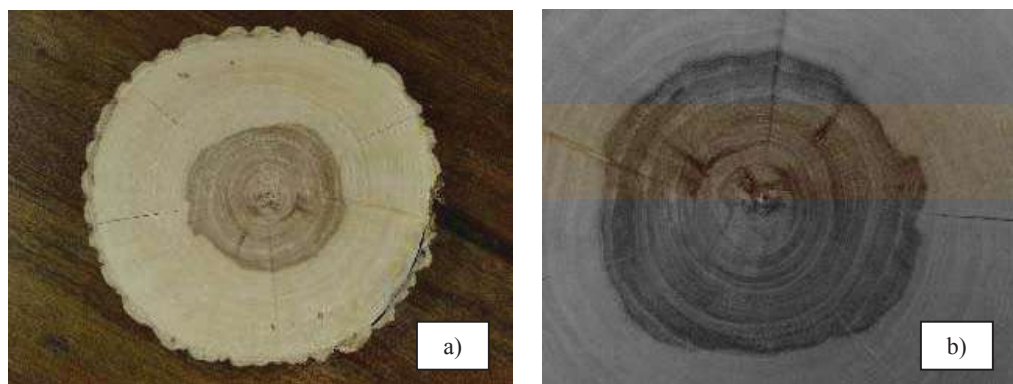


Figura 19. Troza y sección del duramen; **a)** Rodaja de *P. deltoides* Bartr; **b)** Sección de duramen en la rodaja de *P. deltoides* Bartr

Descripción macroscópica de la madera

- **Características organolépticas**

La madera presenta diferencia de color entre albura y duramen, siendo la albura de color blanca (HUE10YR8-1blanco)⁶. El duramen de color castaño claro (HUE7.5YR6/4 café claro) (Fig. 20a); el olor es desagradable cuando está verde, y se transforma en ligeramente agradable cuando está seca; el sabor se considera inapreciable en albura y ligeramente amargo en duramen.

El hilo se presenta de ligeramente inclinado a inclinado, lo que impide que se tengan buenos resultados en el cepillado de la madera. Este detalle se pudo notar en el momento en que se habilitó todo el material utilizado en este trabajo.

El vetado es suave, la textura fina y el brillo de medio a alto (Fig. 20a, b y c).



Figura 20. Material utilizado para descripción macroscópica de la madera; **a)** Tablilla de duramen y albura; **b)** Tablilla que muestra el tipo de hilo; **c)** Tablillas en corte tangencial, radial, y transversal

⁶ Clave de color de acuerdo a Munsell (1964)

Descripción microscópica de la madera

Las **zonas de crecimiento** son poco notorias y están delimitadas por una delgada franja de parénquima marginal (de una a dos células de ancho), y por una delgada banda de fibras de pared ligeramente más gruesa (Fig. 21a).

La madera presenta abundantes **poros** de forma ovalada con acomodo difuso heterogéneo; los poros apenas son visibles a simple vista; son de numerosos a muy numerosos presentando 35 poros/mm² (21 como mínimo y 56 como máximo), el diámetro tangencial es pequeño de 92 micras (μm) (41μm como mínimo y 163μm como máximo), los hay en **arreglos**: solitario, múltiples radiales de 2, 3, 4 y 6, múltiples tangenciales de 2, así como agrupados de 3 a 6 (Fig. 21b).

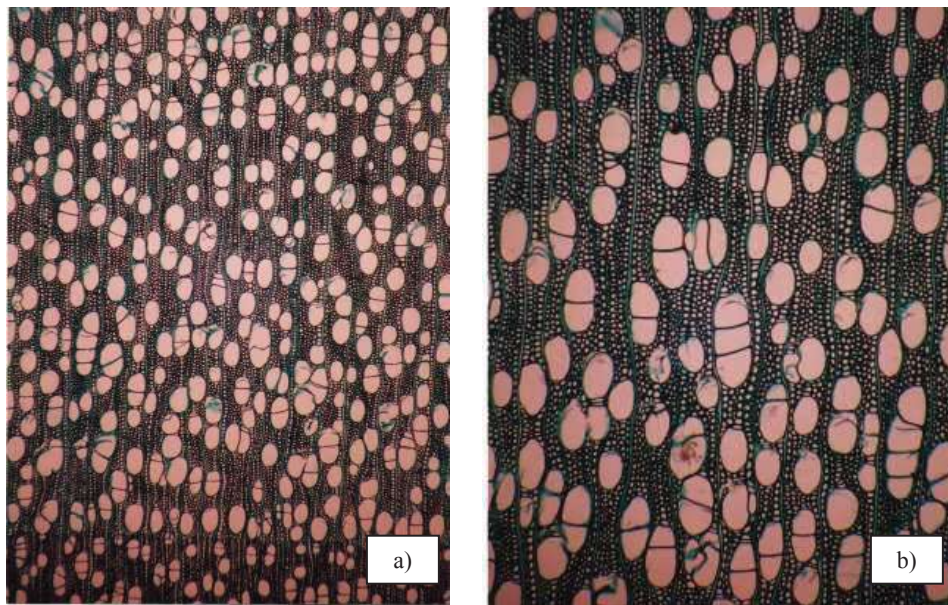


Figura 21. Fotografías de la estructura microscópica de la madera de *P. deltoides* Bartr; **a)** Zona de transición. Objetivo 2.5x; **b)** Arreglo de poros. Objetivo 4x

Los **elementos de vaso** presentan placa perforada de oblicua a casi horizontal, con perforación simple y presenta lígula (Fig. 22b). Las **puntuaciones intervasculares**, son areoladas alternas de contorno hexagonal y abertura elíptica (Fig. 22d). Los elementos son de longitud media con 578 μm (222μm como mínimo y 778μm como máximo) (Fig. 22a).

Las puntuaciones rayo vaso son simples, notorias y de forma que tienden de circular a pentagonal (Fig. 22c).

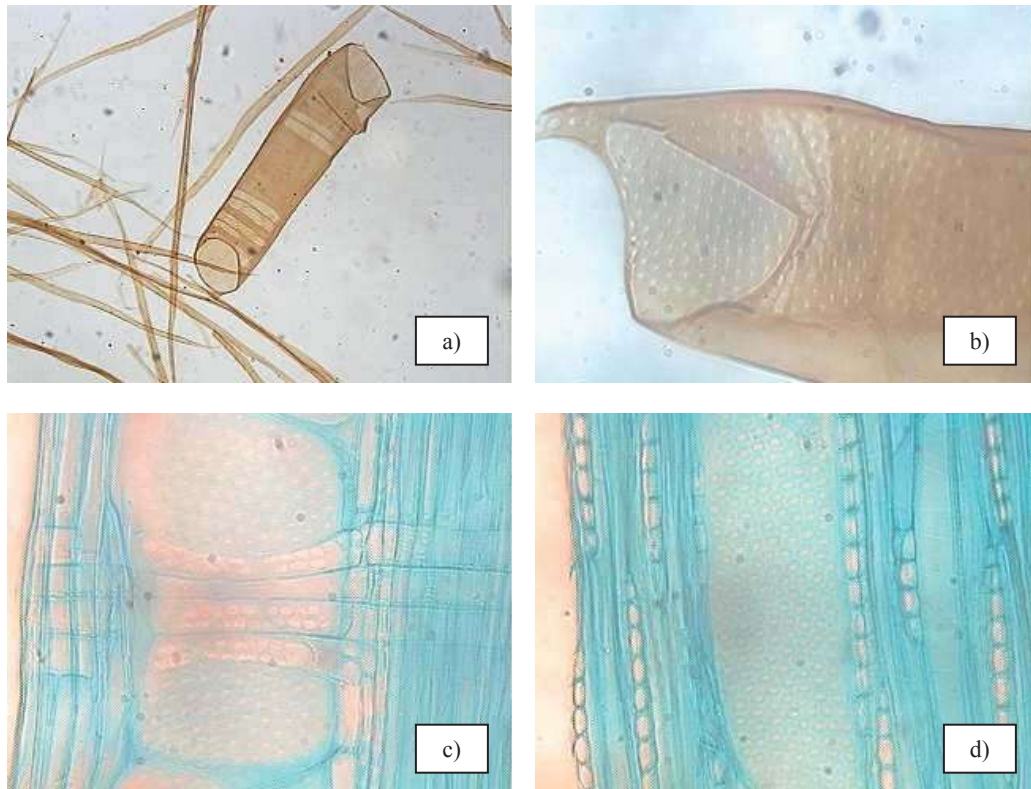


Figura 22. Fotografías de la estructura microscópica de la madera de *P. deltoides* Bartr; **a)** Elemento de vaso y fibras; **b)** Perforación del vaso y lígula; **c)** Puntuaciones rayo-vaso; **d)** Puntuaciones de pared de vaso

El **parénquima leñoso** de tipo marginal se aprecia a simple vista, no así el parénquima apotraqueal difuso y el paratraqueal escaso, los cuales se aprecian solo observando al microscopio.

Los rayos apenas visibles con lupa y muy numerosos, encontrándose 12/mm lineal (10 como mínimo y 16 como máximo), predominando los **uniseriados** pero también se encuentran los parcialmente biseriados y biseriados en menor proporción, todos son de tipo homogéneo. Los rayos uniseriados presentan, en promedio, 14 células de alto (2 como mínimo y 31 como máximo).

En general los rayos se clasifican como de extremadamente bajos a bajos con un promedio de 14 células (2 como mínimo y 31 como máximo) y con respecto al ancho son extremadamente angostos con un promedio de 13 μm (5 μm como mínimo y 25 μm como máximo) (Fig. 23).

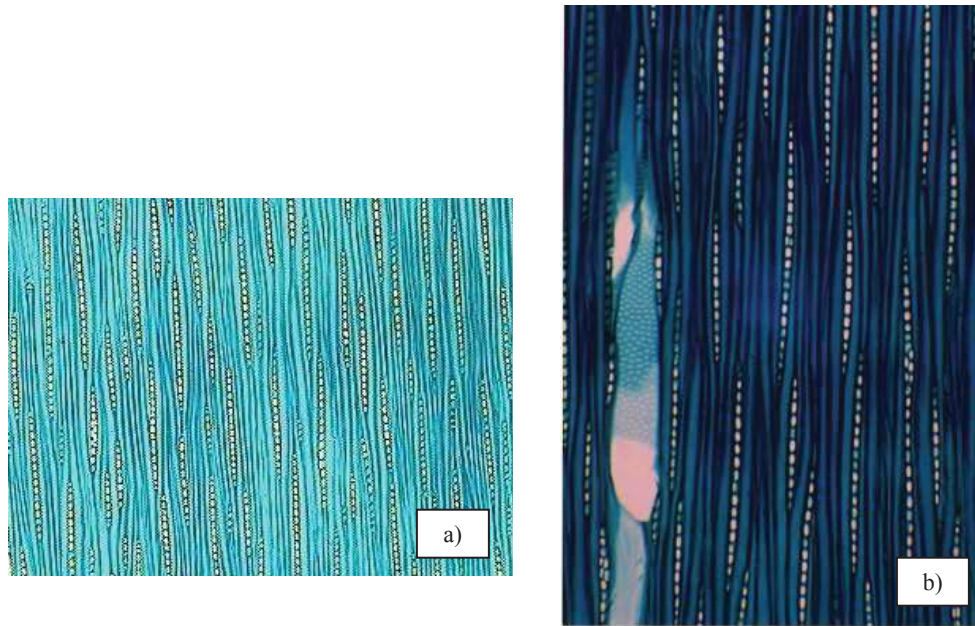


Figura 23. Fotografías de la estructura microscópica de la madera de *P. deltoides* Bartr; **a)** Rayos uniseriados; **b)** Constitución de los rayos y vista de los elementos de vaso en corte tangencial

Las fibras son muy pequeñas con $24\mu\text{m}$ de diámetro fino ($14\mu\text{m}$ como mínimo y $36\mu\text{m}$ como máximo), su arreglo es de irregular a radial y presentan un contorno de poligonal a rectangular. En su totalidad las fibras son libriiformes de longitud media con $1477\mu\text{m}$ ($1162\mu\text{m}$ como mínimo y $1818\mu\text{m}$ como máximo), el grosor de paredes de muy delgado a delgado con $4\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}$ como mínimo y $7\mu\text{m}$ como máximo) y con una amplitud de lumen de $16\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}$ como mínimo y $29\mu\text{m}$ como máximo).

En los cuadros 2, 3, y 4 se presenta el resumen de los resultados de los datos que se obtuvieron en las mediciones de la madera de *P. deltoides* Bartr.

Cuadro 2. Resultados de los elementos de vaso en la madera

| Valores | No/mm ² | ϕ de Poro (μm) | Longitud (μm) |
|---------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Media | 35 | 92 | 578 |
| Máximo | 56 | 163 | 778 |
| Mínimo | 21 | 41 | 222 |
| Moda | 28 | 92 | 707 |
| D.S. | 8 | 26 | 173 |
| C.V. | 23 | 28 | 30 |

ϕ =Diámetro, D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Cuadro 3. Resultados de las mediciones de los rayos

| Valores | No./mm | Altura de rayos (µm) | No. de células de alto | Ancho de rayos (µm) |
|----------|--------|----------------------|------------------------|---------------------|
| Promedio | 12 | 332 | 14 | 13 |
| Máximo | 16 | 889 | 31 | 25 |
| Mínimo | 10 | 51 | 2 | 5 |
| Moda | 12 | 253 | 16 | 10 |
| D.S. | 1 | 117 | 7 | 5 |
| C.V. | 12 | 53 | 52 | 36 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Cuadro 4. Resultado de las mediciones de las fibras en material disociado

| Valores | Longitud (µm) | Diámetro (µm) | Grosor de pared (µm) | Diámetro del lumen (µm) |
|----------|---------------|---------------|----------------------|-------------------------|
| Promedio | 1477 | 24 | 4 | 16 |
| Máximo | 1818 | 36 | 7 | 31 |
| Mínimo | 1162 | 14 | 1 | 1 |
| Moda | 1444 | 22 | 2 | |
| D.S. | 160 | 5 | 2 | 7 |
| C.V. | 11 | 19 | 50 | 42 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Índice de calidad de pulpa

De acuerdo con los datos obtenidos de las fibras de *P. deltoides* Bartr, los índices de calidad de pulpa calculados son:

Calidad de pulpa

Relación de Runkel R.R.=0.484

Coeficiente de rigidez C.R.=0.323

Coeficiente de flexibilidad C.F.=0.666

6.2 Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Populus deltoides* Bartr

Propiedades físicas

En los cuadros 5, 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas físicas de los ensayos realizados.

Cuadro 5. Resultados de la densidad básica en *P. deltoides* Bartr

| Densidad básica (g/cm ³) | Media | Máximo | Mínimo | D.S | C.V. |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Albura | 0.462 | 0.517 | 0.380 | 0.026 | 5.590 |
| Duramen | 0.425 | 0.507 | 0.390 | 0.025 | 5.917 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Cuadro 6. Resultados obtenidos en contracción de *P. deltoides* Bartr

| Contracción (%) | Media | Máximo | Mínimo | D.S. | C.V. |
|--------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Radial | | | | | |
| Albura | 3.123 | 6.399 | 0.103 | 1.536 | 49.172 |
| Duramen | 5.053 | 11.794 | 2.628 | 1.389 | 27.498 |
| Tangencial | | | | | |
| Albura norte | 8.716 | 19.340 | 0.680 | 2.426 | 27.836 |
| Duramen norte | 10.343 | 15.385 | 2.551 | 1.890 | 18.277 |
| Volumétrica | | | | | |
| Albura | 12.137 | 22.494 | 4.409 | 2.542 | 20.945 |
| Duramen | 15.445 | 31.224 | 10.670 | 3.276 | 21.211 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Cuadro 7. Resultados obtenidos en la saturación de la pared celular de *P. deltoides* Bartr

| Saturación de la pared celular (%) | Media | Máximo | Mínimo | D.S. | C.V. |
|------------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Albura | 24.451 | 48.404 | 8.156 | 5.562 | 22.747 |
| Duramen | 39.653 | 84.985 | 29.231 | 9.406 | 23.722 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Cuadro 8. Resumen de los resultados de las pruebas físicas para *P. deltoides* Bartr

| Propiedad | Media | Máximo | Mínimo | D.S | C.V |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|
| Densidad verde (g/cm ³) | 0.995 | 1.136 | 0.790 | 0.089 | 8.962 |
| Densidad básica (g/cm ³) | 0.448 | 0.517 | 0.380 | 0.032 | 7.060 |
| Densidad anhidra (g/cm ³) | 0.516 | 0.591 | 0.435 | 0.032 | 6.224 |
| Contracción (%) | | | | | |
| Radial | 4.239 | 11.794 | 0.901 | 1.349 | 31.811 |
| Tangencial | 9.422 | 19.340 | 0.680 | 2.347 | 24.909 |
| Volumétrica | 13.573 | 31.224 | 4.409 | 3.311 | 24.396 |
| Saturación de la pared celular (%) | 31.048 | 84.985 | 8.156 | 10.613 | 34.182 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación

Análisis estadístico (ANOVA) y resultados

En el análisis de varianza realizado intervienen los resultados obtenidos en las pruebas físicas. En particular, en los cuadros 9, 10, y 11, (mas los gráficos de resultados en el apéndice) se presentan los datos mensurados del análisis de varianza para la densidad básica, contracción volumétrica y saturación de la pared celular respectivamente. En estas imágenes se podrá observar el comportamiento de la madera de albura y de duramen para *P. deltoides* Bartr.

Cuadro 9. Resultados del análisis de varianza en densidad básica para *P. deltoides* Bartr

| | SS | Grado de libertad | Suma de medios | F |
|----------------|----------|-------------------|----------------|----------|
| Interrcepto | 30.70994 | 1 | 30.70994 | 47120.33 |
| Tipo de madera | 0.05544 | 1 | 0.05544 | 85.07 |
| Error | 0.10232 | 157 | 0.00065 | |

SS= Suma de cuadrados, F= *f* de Fisher

Cuadro 10. Resultados del análisis de varianza en contracción volumétrica para *P. deltoides* Bartr

| | SS | Grado de libertad | Suma de medios | F |
|----------------|----------|-------------------|----------------|----------|
| Interrcepto | 29713.96 | 1 | 29713.96 | 3574.769 |
| Tipo de madera | 427.32 | 1 | 427.32 | 51.409 |
| Error | 1305.01 | 157 | 8.31 | |

SS= Suma de cuadrados, F= *f* de Fisher

Cuadro 11. Resultados del análisis de varianza para saturación de la pared celular en *P. deltoides* Bartr

| | SS | Grado de libertad | Suma de medios | F |
|----------------|----------|-------------------|----------------|----------|
| Interrcepto | 160498.0 | 1 | 160498.0 | 2873.308 |
| Tipo de madera | 9026.5 | 1 | 9026.5 | 161.596 |
| Error | 8769.7 | 157 | 55.9 | |

SS= Suma de cuadrados, F= *f* de Fisher

Propiedades mecánicas

En el cuadro 12 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados.

Cuadro 12. Resultados de ensayos mecánicos realizados para *P. deltoides* Bartr

| Ensayo | Propiedad | Media | Máximo | Mínimo | D.S. | C.V |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|
| Flexión estática | ELP (kg/cm ²) | 855.111 | 1,080.585 | 637.268 | 98.999 | 11.577 |
| | MOR(kg/cm ²) | 610.014 | 851.1690 | 318.634 | 129.005 | 21.148 |
| | MOE (kg/cm ²) | 27,947.77 | 38,853.66 | 20,361.13 | 5,041.01 | 18.040 |
| Compresión perpendicular | ELP (kg/cm ²) | 276.152 | 434.863 | 174.476 | 70.387 | 25.489 |
| | MOE (kg/cm ²) | 200.829 | 222.557 | 69.842 | 23.978 | 11.940 |
| Compresión paralela | MOR (kg/cm ²) | 537.723 | 641.728 | 453.180 | 51.807 | 0.096 |
| Dureza estática | Radial (kg/cm ²) | 403.750 | 588.000 | 290.000 | 69.880 | 16.278 |
| | Tang. (kg/cm ²) | 407.700 | 550.000 | 287.000 | | |
| | Trans. (kg/cm ²) | 476.400 | 600.000 | 338.000 | | |
| Tensión perpendicular | EMTP (kg) | 37.951 | 58.534 | 23.614 | 7.641 | 20.134 |
| | Cota de Tenacidad ⁷ (C.t.) | 1.151 | 1.644 | 0.617 | 0.231 | 20.087 |

D.S.= Desviación estándar, C.V.= Coeficiente de variación, ELP=esfuerzo al límite de proporcionalidad, MOR= módulo de ruptura, MOE= módulo de elasticidad, EMTP=esfuerzo máximo en tensión perpendicular, C.t.= Cota de Tenacidad.

⁷ Las normas establecen que, para utilizar la madera en la construcción su cota de tenacidad deberá ser mayor que 1.75 (Fuentes, s/f) (Apéndice).

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción anatómica de la madera de *Populus deltoides* Bartr

Al describir las características macroscópicas de la especie, se encontró que la madera presenta diferencia de color entre albura y duramen, siendo la albura de color blanca y el duramen de color castaño claro, lo que en general coincide con lo que reportan Jonson (1978), Hoadley (1990), y Porter (2004), excepto en la coloración del duramen, ya que Hoadley (*op.cit.*) lo describe con un color grisáceo a café grisáceo y Porter (*op.cit.*) lo caracteriza de blanco grisáceo a café grisáceo claro. Esta diferencia pudiera atribuirse a las condiciones en que se desarrolló el árbol, además de que en la descripción de las características organolépticas entra en juego la apreciación de cada persona.

El olor de la madera se consideró desagradable cuando está verde, y que desaparece al secarse, lo que coincide totalmente con Hoadley (*op.cit.*). En cuanto al sabor, se determinó inapreciable en albura y ligeramente amargo en duramen. Ésta última característica ningún estudio la menciona.

Los reportes de Jonson (*op.cit.*) y Porter (*op.cit.*), consideran que el hilo en la madera de *Populus sp.* se presenta recto y con brillo nulo, lo que difiere en *P. deltoides* Bartr, para la cual se definió el hilo de ligeramente inclinado a inclinado; esto, aunado a su textura fina, da como resultado en la madera un brillo de medio a alto, debido a que una superficie de textura fina refleja con mayor facilidad la luz.

En cuanto a las características microscópicas de la madera se encontró que las zonas de crecimiento son poco notorias y están delimitadas por una delgada franja de parénquima marginal (de una a dos células de ancho), y por una delgada banda de fibras de pared ligeramente más gruesa, esto coincide con lo mencionado por Hoadley (1990).

La madera presenta porosidad difusa, poros apenas visibles a simple vista, los hay en arreglos: solitario, múltiples radiales, múltiples tangenciales en menor cantidad, y agrupados. Los elementos de vaso tienen perforación simple⁸, se consideran con diámetro pequeño y longitud media. Estos resultados coinciden, en términos generales, con la descripción realizada por Hoadley (*op.cit.*), que agrupa a: *Populus balsamifera*, *P. heterophylla*, *P. trichocarpa*, *P. deltoides* (para Norte América) y las identifica como maderas de algodón (Cottonwoods). Además menciona que los elementos anatómicos en todas las especies de *Populus sp.* son muy similares, pero en Cottonwoods se diferencia el diámetro de poro que es más grande.

De la Paz, *et al.* (1982), realizan un estudio anatómico de la madera de 26 especies de angiospermas de clima templado, dentro de las cuales se encuentran *Populus tremuloides* Michx, *P. mexicana* Wesm, y *P. simaroa* Rzedowski; con el cual pudo corroborarse la notable similitud entre estas especies del mismo género.

⁸ Las perforaciones simples son características de los vasos más altamente especializados (Tsoumis, 1991).

Con respecto a las fibras, en su totalidad son libriformes de longitud media, el grosor de pared de muy delgado a delgado, tal como lo describen Cutler *et al.* (1987) en su descripción a nivel de género, quien también identifica la presencia de puntuaciones rayo-vaso ovaladas a poligonales, más grandes que las puntuaciones intervascuales, y con perforación simple, tal como se describe para *P. deltoides* Bartr.

El color de la madera aunado a los índices de calidad de pulpa que presentan las fibras de *P. deltoides* Bartr, clasificadas como de *muy buena* calidad para papel de acuerdo a la Relación Runkel, y con los requerimientos bajos de sustancias decolorantes en el blanqueo, la encontramos como excelentes para la obtención de pulpa para papel.

Cuadro 13. Clasificación y características en los índices de calidad de pulpa para *P. deltoides* Bartr

| Propiedad | Rango | Resultado en <i>P. deltoides</i> Bartr | Clasificación |
|-------------------------|-----------|----------------------------------------|---------------|
| Coefficiente de rigidez | 0.20-0.35 | 0.32 | Delgada |
| Índice de flexibilidad | 0.65-0.80 | 0.66 | Delgada |
| Relación Runkel | 0.25-0.50 | 0.48 | Muy buena |

Clasificación de Runkel, presentada por Petroff y Nordmand (1968) y por Porres y Valladares (1979) citados por Téllez (2004)

La clasificación *delgada* en el índice de flexibilidad, tiene como característica fibras con sección transversal elíptica, parcialmente colapsadas; buena superficie de contacto y buena unión fibra-fibra (Vázquez, 2003).

Propiedades físicas y mecánicas de la madera

En resumen, la densidad de la madera de *P. deltoides* Bartr determinada en el presente trabajo fue de 0.448g/cm³, valor que es muy semejante al reportado por Porter (2004) y Lincoln (1991) de 0.45g/cm³. De acuerdo con Sotomayor (1987) y Echenique y Plumtre (1994), la densidad de la madera se encuentra en el rango de 0.40 a 0.55g/cm³, que corresponde a una clasificación **Media**. Este resultado es comparable con la densidad promedio en el género *Pinus sp.* con 0.45g/cm³, y con el Fresno (*Fraxinus udhei*) con 0.46 g/cm³.

De la misma manera, la contracción radial, tangencial y volumétrica es de 4.2%, 9.4%, y 13.5% respectivamente, coincidiendo en lo general con Forest Products Society (1999). De acuerdo a Sotomayor (1987) para la contracción, los resultados sitúan a *P. deltoides* Bartr como de clasificación **Media**.

Particularmente, de acuerdo a los resultados obtenidos en el Análisis estadístico (ANOVA) realizado para los ensayos físicos (Cuadros 9, 10 y 11), se pudo observar que existe diferencia en las propiedades físicas del “duramen y del albura”.

La respuesta radica en la variabilidad que presenta la estructura interna de la madera (variación horizontal), existen datos que indican que la estructura del anillo de crecimiento (desarrollo de la estructura típica), morfología celular (longitud, diámetro, grosor de pared y grado de cristalinidad) y contenido de celulosa y lignina, varía rápida y progresivamente después de un número determinado de anillos de crecimiento hasta que alcanzan un nivel más o menos “típico”; en los anillos más externos de árboles muy viejos ellos difieren nuevamente. Cambios que se supone están asociados con la transformación progresiva de albura a duramen (Tsoumis, 1991).

Observando el cuadro 5, podemos darnos cuenta que la madera de albura en *P. deltoides* Bartr, presenta mayor densidad que la madera de duramen (diferencia que se corrobora en los resultados del ANOVA, cuadro 9). Tsoumis (*op.cit.*), describe la probabilidad de que el diámetro de las cavidades (lumen) sea más grande en las fibras cercanas a la médula, mientras que el grosor de pared muestra una tendencia contraria; así mismo ocurre con la longitud de la célula que ha sido investigada en un sinnúmero de estudios y se describe como sigue: la longitud permanece constante en el periodo juvenil, enseguida tiene un incremento continuo hasta llegar al máximo, a partir del cual comienza a tener una disminución como el diseño de una curva parabólica.

De acuerdo al cuadro 6, en donde se muestra el comportamiento de la madera en contracción volumétrica, claramente se distingue que se tiene mayor contracción en la madera de duramen que en la madera de albura (diferencia que se corrobora en los resultados del ANOVA, cuadro 10); es posible que se deba al ángulo de las microfibrillas presente en la capa S2 de las células mas cercanas a la médula. Esto es una característica muy importante de la madera con respecto a sus propiedades. Las desviaciones de las microfibrillas al paralelismo con el eje axial, incrementan la contracción, y disminuye la resistencia de la madera en dirección axial (Tsoumis, *op.cit.*). Lo que quiere decir que el ángulo (respecto al eje axial) es grande en los primeros anillos de crecimiento cerca de la médula, pero disminuye hacia fuera por algunos años hasta hacerse más o menos constante.

Analizando lo mencionado anteriormente, se observa que para *P. deltoides* Bartr, a mayor densidad menores cambios dimensionales, lo que no coincide con lo mencionado por Herrera y Bocanegra (1996) en su trabajo “características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia”, en donde mencionan que las especies con mayor peso específico presentan cambios dimensionales más pronunciados.

En relación a los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, realizados a un C.H. del 12%, no se encontraron antecedentes concretos como punto de comparación, pero en el cuadro 14 se muestra la clasificación de los datos mensurados según Sotomayor (1987), y Echenique y Plumtre (1994).

Para este caso, se observó que la resistencia mecánica de la madera está dentro de las clasificaciones media y alta. De manera que comparando los resultados de *P. deltoides* Bartr., con algunas maderas comerciales de nuestro país, tenemos que para el caso de

⁹ Características celulares tales como la longitud, diámetro, grosor de paredes y arreglo de microfibrillas, son afectadas por condiciones ambientales (Tsoumis, *op.cit.*).

compresión paralela, *P. deltoides* Bartr., resiste una carga máxima de 2487.167 kg, lo que la compara en resistencia con el Fresno, y en lo general con Oyamel (*Abies religiosa*), este último que tiene una resistencia aproximada de 2616 kg de acuerdo a un estudio realizado por Herrera y Bocanegra (1996). En cuanto al módulo de ruptura *P. deltoides* Bartr presenta 537.723 kg/cm², resultado que se puede comparar con la madera de especies como el *P. pringlei*, y algunas especies de encino como *Quercus scytophylla*.

De acuerdo a ensayos como flexión estática, los resultados que presenta la madera de *P. deltoides* Bartr con un Módulo de elasticidad de 27,947.77 kg/cm², los podemos comparar con maderas como *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrabus*, así como con fresno (*Fraxinus udhei*).

Cuadro 14. Clasificación de los ensayos mecánicos en *P. deltoides* Bartr

| Ensayo | Esfuerzo | Resultado | Carga máxima (kg) | Clasificación | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | | | Sotomayor (1987) | Echenique y Plumtre (1994) |
| Flexión estática | ELP (kg/cm ²) MOR(kg/cm ²) MOE (kg/cm ²) | 855.111 610.014 27,947.77 | 155.848 | Alta Media Excel. baja | * Baja Muy baja |
| Compresión perpendicular | ELP (kg/cm ²) MOE (kg/cm ²) | 276.152 200.829 | 1119.692 | Muy alta Muy alta | Muy alta |
| Compresión paralela | MOR (kg/cm ²) | 537.723 | 2487.167 | Excel. alta | * |
| Dureza estática | Radial (kg/cm ²) Tangencial (kg/cm ²) Trans. (kg/cm) | 403.750 407.700 476.400 | 403.750 407.700 476.400 | Media | Media Media Baja |
| Tensión perpendicular | EMTP (kg/cm ²) | 37..951 | 487.963 | * | * |

*No se tiene referencia para clasificación

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Por ser una madera clara y con veteado suave, la madera de *Populus deltoides* Bartr, puede considerarse versátil en su apariencia al poder usar diversos acabados superficiales. Aunado a esto, por su densidad media, su textura fina (característica que se identifica por sus rayos tan delgados y poros pequeños), y su brillo de medio a alto, tiene muchas posibilidades de poder dársele diversos usos como: juguetes, artesanías, figuras talladas y torneadas.

En base a los resultados físicos y mecánicos obtenidos y clasificando los usos de acuerdo a Echenique y Plumtre (1994), se considera que la madera de *P. deltoides* Bartr puede utilizarse en: elementos no estructurales para interiores de edificios (molduras); usos no estructurales para interiores (lambrin en paneles), y artículos de cocina (trastes, tablas de picar, cucharas y otros).

De igual manera se puede considerar para usarla en artículos novedosos de artesanías como: artículos torneados, escritorios, tallados, anillos, bancos, juguetes, vasijas, mangos de cuchillos y otros.

De acuerdo al resultado obtenido al calcular la cota de tenacidad y aunado a la baja durabilidad natural, concluimos que esta madera no se recomienda para ser utilizada en elementos constructivos; de la misma manera tomando en cuenta la clasificación de Echenique y Plumtre (1994), los valores obtenidos en el Módulo de Elasticidad para Flexión estática, denotan que es una madera muy elástica no recomendada para el uso ya mencionado.

Recomendaciones

Debido al buen resultado obtenido en la Relación Runkel para el índice de calidad de pulpa, y considerando que la madera de álamo está considerada como una de las especies con menor proporción de extractivos¹⁰ (menos del 1% de su peso seco en estufa) (Tsoumis, *op.cit.*), se recomienda la fibra de *P. deltoides* Bartr para obtención de pasta para papel, sin dejar a un lado una previa evaluación de las propiedades de la pulpa y procesos de pulpeo de esta especie.

López (1983), realizó un estudio denominado “Efectos de la calidad de la madera del *Pinus arizonica* Engelm. y del *Populus tremuloides* Michx. en la resistencia de la pulpa celulósica por el proceso al sulfato”, el cual, debido a que se trata de una especie del mismo género, podría tomarse como referencia, para conocer su comportamiento en procesos de pulpeo.

¹⁰ Los procesos y economía del pulpeo están enormemente influenciados por la cantidad y clase de extractivos. Los extractivos influyen en reacciones químicas, incrementan el consumo de blanqueadores y agua, y pueden crear problemas en el proceso y equipo.

De esta manera López (op.cit.) observó que, *P. tremuloides* es una especie que tiene buenos resultados en cuanto a rendimiento de pulpa (con 53.772%) y tiempos de cocción (2 horas con 50 minutos); en cuanto al blanqueo, encontró que los resultados son excelentes a excepción del rendimiento de pulpa pero considera que con menores cantidades de cloro se le puede blanquear y obtener resultados muy satisfactorios.

López (op.cit.) recomienda a *P. tremuloides*, para la elaboración de papeles blanqueados y sin blanquear de baja resistencia.

Debido a que, en este trabajo únicamente se estudió la madera respecto a su comportamiento físico y mecánico, se recomienda continuar con la realización del estudio tecnológico de la madera (caracterización química, pruebas de trabajabilidad, acabados, secado, preservación etc.), para tener una recomendación de usos más acertada y que den a la madera de *P. deltoides* Bartr mayor valor agregado.

Una vez que se tienen los resultados del estudio integral de la madera, se recomienda seguir con un estudio de plantaciones de esta especie y medir sus crecimientos en nuestro país, así como su grado de adaptabilidad a diversos climas, tipos de suelo y altitudes para, si es realmente factible, elaborar un plan de manejo que permita el aprovechamiento integral de la especie.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Avitia, J. C. 2005. Recursos Forestales de Baja California. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexicali, B.C. [Internet]. Disponible en: <http://semarnat.gob.mx/bc/rn/forestales.shtml> [Consulta: Diciembre 31, 2005].
- Babiak, M.; Kúdela, J. 1994. A contribution to the definition of the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*. 29:217-226.
- Ball, J.; Carle, J.; Del Lungo, A. 2005. Contribución de álamos y sauces a la silvicultura sostenible y al desarrollo rural. *UNASYLVA*. 56(221): 3-9.
- Cutler, D. F.; Rudall, P. J.; Gasson, P. E. 1987. Root identification manual of trees and shrubs. Chapman and Hall. London.
- De la Paz P. O. C.; Olvera C., P.; Corral L., G. 1982. Estudio anatómico de la madera de 26 especies de angiospermas de clima templado. *Boletín Técnico No. 91*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Echenique M., R.; Plumtre, R.A. 1994. Guía para el uso de maderas de México y Belice. Universidad de Guadalajara. Consejo Británico. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, A.C. Universidad de Oxford. México.
- Encarta. 2005. Microsoft Corporation. [CD-ROOM multi-media].
- Forest Products Society. 1999. Wood handbook. Forest Products Society. USA.
- Fuentes S., M. s/f. Apuntes para el curso de tecnología de la madera. Manuscrito. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo.
- Gola, G.; Negri, G.; Cappelletti, C. 1956. Tratado de Botánica. 2da ed. Labor. España.
- Grupo de Acción Forestal. 2005. Especies forestales presentes en la VII región. Universidad de Talca. Chile [Internet]. Disponible en: <http://gaf.otalca.cl> [Consulta: Diciembre 30, 2005].
- Guridi G., L. I.; García M., T. 2000. Estudio anatómico de la madera del aguacate criollo (*Persea americana* Mill.). *Ciencia y Tecnología de la Madera*. Época 2, 5:3-20.
- Haverbeke, D. s/f. Silvics of North America. [Internet]. Disponible en: <http://forestry.about.com/library/silvics/blsilpopdel.htm>. [Consulta: Enero 29, 2006].
- Herrera F., M. A.; Bocanegra O., S. 1996. Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. *Ciencia y Tecnología de la Madera*. 10:3-11.

- Hoadley, R. B. 1990. Identifying Wood. Taunton. U.S.A.
- IAWA (International Association of Wood Anatomists). 1989. List of Microscopic Features for Hardwood Identification. E. A. Wheeler, P. Baas and P. E. Gasson. Rijksherbarium, Leiden, The Netherlands. Boletin 10(3): 219-332.
- INFOR (Instituto Forestal de Investigación en Chile). 2005. Las nuevas posibilidades del Álamo en Chile. [Internet]. Disponible en <http://www.corma.cl/destacados/destacados_48.html>. [Consulta: Octubre 13, 2005].
- ISO (International Organization for Standardization). 1975. Wood - Test methods- Determination of ultimate stress in compression parallel to grain. ISO3787-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Testing in compression perpendicular to grain. ISO3132-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Determination of ultimate tensile stress perpendicular to grain. ISO3346-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Determination of static hardness. ISO3350-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Determination of ultimate strength in static bending. ISO3133-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO3129-1975(E). Switzerland.
- ISO (International Organization for Standardization). 1976. Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO3130-1975(E). Switzerland.
- Jonson, H. 1978. La Madera. Blume. Barcelona.
- Lincoln, W. A. 1991. World woods in color. Linden. Fresno, California.
- López Q., R. 1983. Efectos de la calidad de la Madera del *Pinus arizonica* Engelm y del *Populus tremuloides* Michx en la resistencia de la pulpa celulósica por el proceso al sulfato. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Metcalfé, C. R.; Chalk, L. 1972. Anatomy of the dicotyledons. Volume II. Vivian Ridler.

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2005. Comisión Nacional del Chopo. [Internet]. Disponible en http://www.mapya.es/agricultura/pags/chopo/pr_cnochopo.htm. [Consulta: Noviembre 20, 2005].
- Munsell Color Company. 1975. Munsell soil color chart. Munsell Color Company. Maryland.
- Peters, R. 2000. Woodworker's guide to wood. Sterling. New York.
- Porter, T. 2004. Wood Identification and use. Taunton Press. Newtown, Connecticut.
- Revuelta A., M. M.; Zamora M., J. 1990. Anatomía de la madera de seis especies de encinos (*Quercus* spp) del municipio de Morelia, Mich. Tesis Profesional. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Sotomayor C., J. R. 1987. Calidad de la madera para la industria de la construcción. Instituto Regional de Investigaciones del Estado de Michoacán A.C. Morelia, Mexico.
- Téllez S., C. 2004. Descripción anatómica, caracterización físico-mecánica y análisis químico de la madera de *Andira inermis* (W. Wright) DC. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- The Vplants Project. 2001-2006. Vplants. [Internet]. Chicago. Disponible en <http://www.vplants.org/speciesqa/species.jsp?gid=32313>. [Consulta: diciembre 20, 2005].
- Tortorelli L., A. 1956. Maderas y Bosques Argentinos. ACME. S.A.C.I. Buenos Aires.
- Tsoumis, G. 1991. Science and the technology of Wood-structure, properties, utilization. Aristotelian University Press. Nueva York.
- Vazquez G., Y. 2003. Índices de calidad de pulpa para papel de 98 maderas de la región de Morelia. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

10 APÉNDICE

Enseguida se muestran algunas de las fórmulas empleadas en este trabajo, para la realización de los cálculos referentes a: índice de calidad de pulpa, punto de saturación de la fibra, y propiedades físico-mecánicas de la madera; de la misma manera se incluyeron los gráficos correspondientes a los resultados obtenidos en el Análisis de varianza, para: densidad básica, contracción volumétrica, y punto de saturación de la pared celular.

- *Índice de Calidad de pulpa para papel tomado de Téllez (2004)*

1. Índice de rigidez C.R.= $2 w / D$
2. Índice de flexibilidad C.F.= l / D
3. Índice de esbeltez I.E.= L / D
4. Relación Runkel: R.R.= $2 w / l$

En donde:

- C.R.= coeficiente de rigidez
C.F.= coeficiente de flexibilidad
I.E.= índice de esbeltez
R.R.= relación de Runkel
L = longitud
D = diámetro total
l = amplitud de lumen
w = grosor de pared

- *Punto de saturación de la fibra tomado de Babiak y Kúdela (1994)*

1. Saturación de la pared celular
$$CWS = \left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{1}{\rho_o} \right) \rho_{H_2O} 100$$

En donde:

- CWS= saturación de la pared celular (%)
 ρ_r = densidad básica (%)
 ρ_o = densidad seca (%)
 ρ_{H_2O} = densidad verde (%)

- *Formulario para cálculo de pruebas físico-mecánicas tomado de Fuentes (s/f)*

1. Pruebas físicas

$$\rho_v = \frac{P_v}{V_v}$$

Densidad verde

$$\rho_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Densidad seca

$$\rho_b = \frac{P_s}{V_v}$$

Densidad básica

$$CR = \frac{Drv - Drs}{Drv} X100$$

Contracción radial

$$CT = \frac{Dtv - Dts}{Dtv} X100$$

Contracción tangencial

$$CV = \frac{Vv - Vs}{Vv} X100$$

Contracción volumétrica

2. Pruebas mecánicas

Flexión estática

$$ELP = \frac{3(P)(l)}{2(b)(a^2)}$$

$$MOE = \frac{P(l^3)}{4(y')(b)(a^3)}$$

$$MOR = \frac{3(P')(l)}{2(b)(a^2)}$$

Compresión perpendicular (⊥)

$$ELP = \frac{P}{A}$$

$$MOE = \frac{(P)(L)}{(y')(A)}$$

Compresión paralela (||)

$$MOR = \frac{P'}{A}$$

Tensión perpendicular (⊥)

$$EMTP = \frac{P}{A}$$

Cota de tenacidad

$$C.t. = \frac{MRf}{MRc}$$

En donde:

ρv = densidad verde (g/cm³)

ρs =densidad seca (g/cm³)

ρb =densidad básica (g/cm³)

Pv = peso verde de la madera (g)

Ps = peso seco de la madera (g)

Vs = volumen seco de la madera (cm³)

Vv = volumen verde de la madera (cm³)

CR= contracción radial (cm)

CT= contracción tangencial (cm)

CV= contracción volumétrica (cm)

Drv= dimensión radial verde (cm)

Drs= dimensión radial seca (cm)

Dtv= dimensión tangencial verde (cm)

Dts= dimensión tangencial seca (cm)

ELP: esfuerzo en el límite de proporcionalidad (kg/cm²)

EMTP: esfuerzo máximo a tensión perpendicular (kg/cm²)

MOE: módulo de elasticidad (kg/cm²)

MOR: módulo de ruptura (kg/cm²)

P': carga aplicada en el límite de proporcionalidad (kg)

P: carga de ruptura (kg)

y': deformación en el límite de proporcionalidad

l: claro entre apoyos (cm)

L: longitud total de la probeta (cm)

b: ancho de la probeta (cm)

a_{ac}: ancho del accesorio (cm)

a: espesor o peralte de la probeta (cm)

A: área de la sección transversal de la probeta (cm²)

C.t.= cota de tenacidad

MRf= módulo de ruptura a flexión

MRc= módulo de ruptura a compresión

- Gráficos representativos de los resultados obtenidos en el Análisis de varianza, para: densidad básica, contracción volumétrica, y punto de saturación de la pared celular.

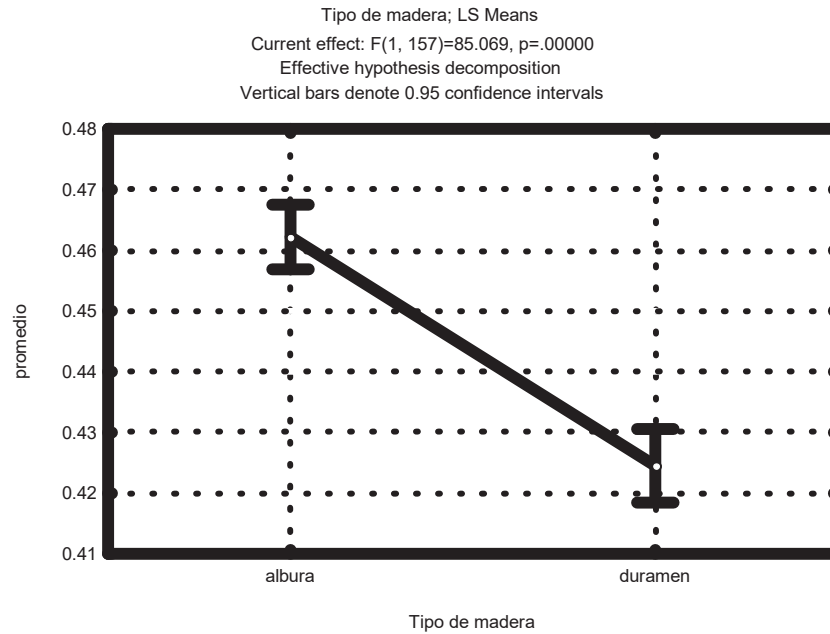


Figura 24. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albur en densidad básica

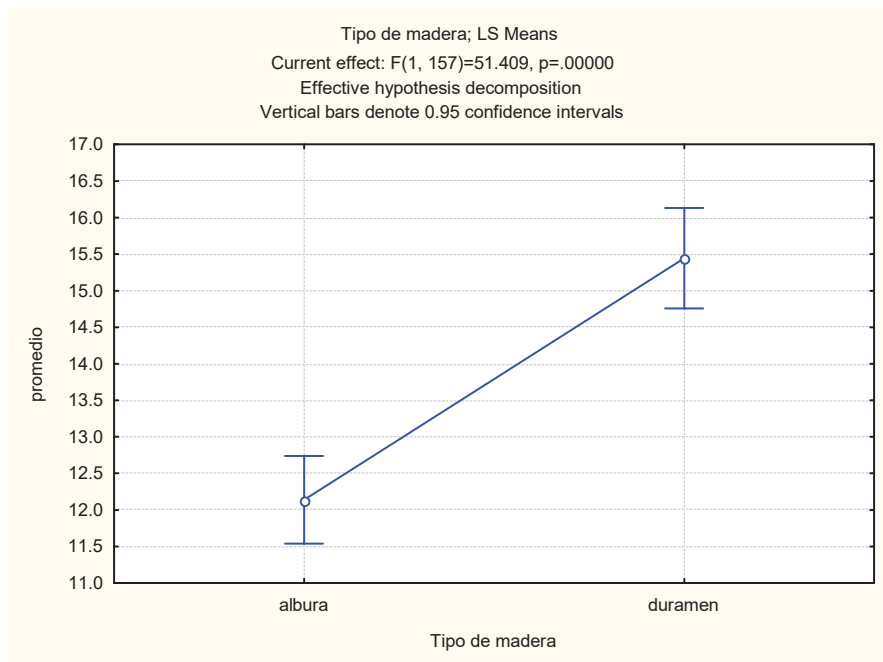


Figura 25. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albur en contracción volumétrica

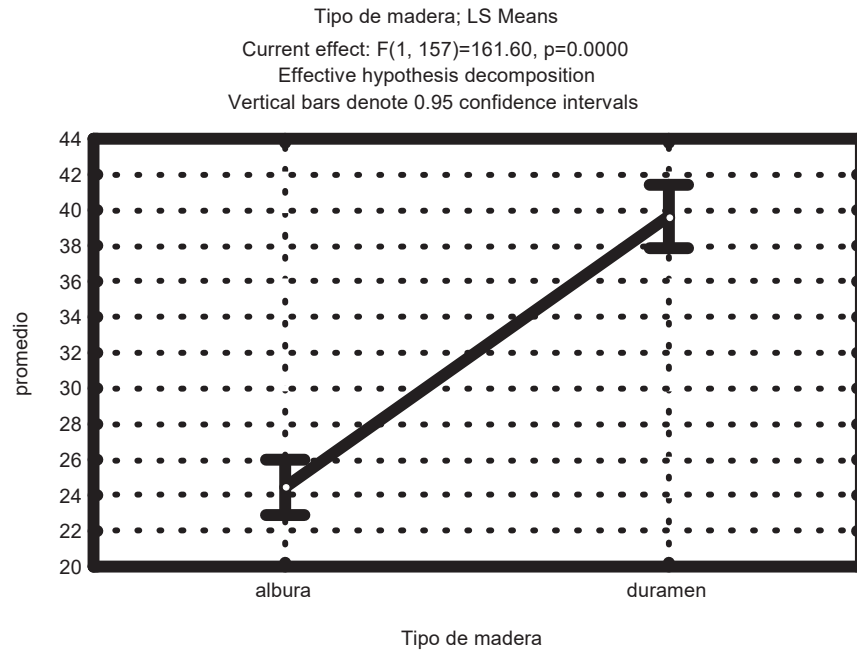


Figura 26. Gráfico comparativo entre madera de duramen y albura para saturación de la pared celular