



El Colegio de la Frontera Sur

Caracterización física y mecánica de la madera de dos variedades de *Ochroma pyramidale* provenientes de Lacanjá Chansayab, Chiapas.

Tesis:

Presentada como requisito parcial para optar el grado de
Maestra en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural
Con orientación en Manejo y Conservación de Recursos naturales

Por

Ana Patricia Pérez Caballero

2018



El Colegio de la Frontera Sur

San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, 10 de mayo de 2018.

Las personas abajo firmantes, miembros del jurado examinador de Ana Patricia Pérez Caballero hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada “Caracterización física y mecánica de la madera de dos variedades de *Ochroma pyramidale* provenientes de Lacanjá Chansayab”, Chiapas para obtener el grado de **Maestra en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural**

	Nombre	Firma
Director/a	Dr. Samuel I. Levy Tacher	
Asesor/a	Dra. Guadalupe Martha Bárcenas Pazos	
Asesor/a	Dra. Susana Ochoa Gaona	
Sinodal adicional	Dr. Hugo Rafael Perales Rivera	
Sinodal adicional	Dr. Neptalí Ramírez Marcial	
Sinodal suplente	Dr. Pablo Martínez Zurimendi	

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado durante la realización de mis estudios de posgrado. A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y a la Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural.

Al Dr. Samuel I. Levy Tacher por brindarme la oportunidad de aprender y conocer un tema nuevo; por apoyar e insistir en la mejora continua de mi nivel académico.

A la Dra. Guadalupe M. Bárcenas Pazos por su apoyo incondicional, por sus correcciones, por su constante insistencia de mejorar, por la confianza que me otorgó en el laboratorio y sobre todo, por su infinita paciencia durante los días difíciles. Me permito agradecer ampliamente, el cambio que incitó a realizar en mi persona.

A la Dra. Susana Ochoa Gaona por su valiosa contribución en el complemento de mi trabajo de tesis.

A los sínodos que me apoyaron para mejorar el contenido de mi trabajo. Al Dr. Pablo Martínez, al Dr. Neptalí Ramírez y al Dr. Hugo Perales.

Al Instituto de Ecología A. C., a la Red de Ambiente y Sustentabilidad, al Laboratorio de Pruebas de Productos Maderables y a la Xiloteca Faustino Miranda, por permitirme realizar la caracterización física y mecánica de la madera balsa. Así como a los ingenieros Víctor R. Ordóñez C. y José Luis Martínez C., al Dr. Guillermo Ángeles, a Genaro y a Víctor por el apoyo que me brindaron durante la realización de los ensayos.

A la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por la gestión de los permisos de colecta.

A Adolfo Chak'in y a su familia, al CECyT 33 de Frontera Corozal y a sus colaboraciones en campo.

Al Dr. Hugo Perales, al M. Jorge Castellanos y al Dr. Benito Salvatierra por las asesorías en Estadística.

A quienes me apoyaron para realizar el trabajo de campo, entre ellos Juan, Javier, Toño, Isabel, Erika, Julio y Oswaldo.

Agradezco a todas las personas con quienes coincidí en este camino, quienes me trataron como una hermana y que me acompañaron en el trayecto. Gracias porque tuvieron un abrazo para mí en el momento adecuado.

A Yesenia por su amistad, paciencia y compañía durante los días difíciles, además de compartir su casa y comida conmigo.

A Mariana por ser la primera persona que me brindó su amistad en el grupo.

Gracias a Alejandro Nudding.

Gracias infinitas a mi familia, a mi mamá y a mi tía porque siempre me acompañan y me apoyan en mis decisiones.

Resumen

Se presentan los resultados de los análisis físicos y mecánicos de la madera de dos variedades de *Ochroma pyramidale*, con el fin de valorar su posible interés como producto forestal comercial y que sirvan como inicio de varios estudios más en el país. El objetivo principal del trabajo fue conocer si existen diferencias significativas entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de dos variedades de *Ochroma pyramidale* (madera balsa) provenientes de la comunidad de Lacanjá Chansayab del municipio de Ocosingo, Chiapas. Los ensayos se realizaron con base en lo establecido en la en la norma ASTM D143-09. Los resultados se analizaron con el programa estadístico IBM SPSS, bajo los estándares de un modelo Lineal General Univariante y un arreglo de factores anidados. En factores anidados, se observó que las propiedades de cada troza fueron independientes dentro de la variedad, con excepción de los ensayos de contracciones. En el análisis de varianza hubo diferencias significativas para las variedades, en los resultados de contracciones tangenciales y volumétricas, así como en esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular, dureza en los laterales y tenacidad de la condición seca ($CH = 12 \% \pm 2 \%$); en condición verde ($CH \geq 30 \%$) se obtuvo diferencias en esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra. Finalmente, los valores obtenidos en la caracterización mecánica en condición seca para la madera de las dos variedades de *O. pyramidale*, se consideran dentro del intervalo de valores requeridos en México. De acuerdo a la bibliografía, esta madera, se usa principalmente para la elaboración de paneles end-grain de balsa producidos a partir de hojas de madera balsa, que se pueden aplicar en áreas de marina, energías renovables, aeroespacial, carretera, arquitectura, construcción y acabado interior.

Palabras clave: densidad, contracciones, secado, esfuerzos, resistencia, selva Lacandona.

Contenido

I. Introducción	1
II. Antecedentes.....	2
II.1 Propiedades físicas y mecánicas	4
III. Justificación	5
IV. Pregunta de investigación	6
V. Objetivo general.....	6
V.1 Objetivos específicos.....	6
VI. Hipótesis.....	6
VII. Metodología.....	6
VII.1 Área de estudio.....	6
VII.2. Incremento medio anual (IMA) de dos variedades de <i>O. pyramidale</i> provenientes de Frontera Corozal.....	14
VII.3. Ensayos físicos y mecánicos de la madera las dos variedades de <i>O. pyramidale</i>	7
VII.4 Selección, elaboración e identificación de especímenes de ensayo.....	8
VII.5 Ensayos físicos (ASTM D143-09).....	8
VII.6 Ensayos mecánicos (ASTM D143-09).....	10
VII.7 Análisis de resultados	15
VIII. Resultados.....	16
VIII.1 Volumen maderable a los tres años de crecimiento.....	23
VIII.2 Propiedades físicas.....	16
VIII.4 Propiedades mecánicas en condición seca (CH = 12 % ± 2 %) y verde (CH ≥ 30 %)	19
IX. Discusión	25
IX.1 Volumen maderable a los tres años de crecimiento	28
IX.2 Propiedades físicas.....	25
IX.3 Propiedades mecánicas.....	27
X. Conclusiones	29
XI. Recomendaciones	30
Literatura citada	31
Anexos	42

I. Introducción

La madera es un material anisotrópico, ortotrópico e higroscópico con alta variabilidad en sus propiedades, no sólo en la madera de diferentes especies o de árboles distintos, sino también dentro de un mismo individuo e incluso dentro de una misma pieza de madera (Echenique-Manrique y Robles Fernández 1993).

Debido a la gran variedad de especies forestales con potencial económico que crecen en nuestro país, existe la necesidad de clasificar a la madera de acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas que posee para contar con un sistema de clasificación normalizado y utilizarla apropiadamente en los procesos constructivos y de diseño (ASTM 2009; Sotomayor 2005). Las normas especifican los métodos de ensayo, las formas y las dimensiones de las probetas, mediante la utilización de equipos y aditamentos específicos, los cuales miden las cargas soportadas en las diferentes propiedades evaluadas para calcular los valores de los esfuerzos con los que la madera puede ser recomendada para su uso final (Borges de Araujo 2002, Fuentes Salinas 1988; Fritz Durán y Berdichewsky Aranda 2004).

La madera de *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. (conocida como variedad *typica* en la selva Lacandona), es la madera más ligera en el mercado actual, presenta densidades de 60 a 380 kg/m³ y posee características adecuadas de trabajabilidad y de resistencia mecánica como: relaciones de rigidez-peso y de fuerza-peso y capacidad de absorción de energía (Borrega *et al.* 2015; Gibson y Ashby, 1997), las cuales son adecuadas para elaboración de núcleos de espuma estructural, núcleos de balsa estructurales y contrachapados ligeros producidos a partir de cortes delgados de madera balsa (AirexBaltekBanova 2018).

La madera de esta especie se cultiva y se aprovecha en los países de Costa Rica, India, Malasia, Vietnam, Filipinas y Papúa Nueva Guinea (Evans y Turnbull 2004). El principal productor y exportador de madera balsa en el mundo es Ecuador, con un mercado que en el año 2016 alcanzó un monto promedio de

USD \$121.89 millones FOB (Free On Board) por 32 019 toneladas exportadas (PROECUADOR 2018). En 2015, los principales compradores fueron China con un 40 % y Estados Unidos con un 22 % de la producción mundial (Parra 2016).

O. pyramidale crece de manera espontánea en las selvas del sur de México. En particular en la Selva Lacandona, donde se utiliza para acortar el período de barbecho de la vegetación en descanso para su posterior aprovechamiento agrícola, así como, para elaborar artesanías o para construcciones rústicas. En esta zona se han identificado dos variedades de dicha especie, las cuales se reconocen morfológicamente y se nombran localmente con base en el color de los pecíolos: *O. pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. o variedad *typica* cuyos pecíolos son rojizos y *O. lagopus* variedad *bicolor* (Rowlee) sin color en el pecíolo (Standley y Steyermark 1949). No obstante, Tropicos (2018) y Plant list (2013) consideran a la variedad *bicolor* como una sinonimia de la variedad *typica*, por lo que su aprovechamiento y difusión ha pasado por inadvertida.

Principalmente, el cálculo de rendimiento de volumen maderable y de la evaluación de las propiedades de físicas y mecánicas de la madera balsa en sus dos variedades, tiene el propósito de conocer las diferencias estadísticas en cada uno de los ensayos y determinar la clasificación de dichas variedades para coadyuvar al reconocimiento de sus formas de uso y aprovechamiento comercial de la especie para nuestro país.

II. Antecedentes

Ochroma pyramidale o balsa es una especie tropical pionera, de rápido crecimiento y de interés comercial; pertenece a la familia Malvaceae y se desarrolla en altitudes que oscilan entre los 150 y 400 msnm, en suelos bien drenados y húmedos característicos de las selvas tropicales. Su distribución geográfica va desde el sur de México, pasando por Centroamérica hasta Las Antillas y norte de Sudamérica (Vargas 1987; Pennington y Sarukhán 2005).

Particularmente, en México crece en los estados de Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Chiapas (Fletcher 1951; Stewart *et al.* 2009). En Chiapas, se han realizado investigaciones desde 1993 con miras a evaluar su función de especie facilitadora en la restauración ecológica y en la recuperación del conocimiento ecológico tradicional (Levy-Tacher y Golicher 2004; Douterlungne *et al.* 2005 y Douterlungne *et al.* 2010; Vleut *et al.* 2013; Levy-Tacher 2000; 2016). Entre las propiedades ecológicas que describen a la especie se basan en la recuperación del 5% de materia orgánica en el suelo en acahuals, así como la erradicación de especies invasoras en las milpas como: *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn (Levy-Tacher y Golicher 2004, Douterlungne *et al.* 2005, Douterlungne *et al.* 2010). Principalmente, se ha reconocido la capacidad de la balsa para acelerar el desarrollo sucesional mediante el favorecimiento del establecimiento de las especies intermedias y tardías que repueblan el sotobosque, mediante la diversificación de semillas por murciélagos (Vleut *et al.* 2013).

En la comunidad de Lacanjá Chansayab se observó que los indígenas lacandones reconocen dos variedades de *O. pyramidale*, las cuales se distinguen por el color del pecíolo de las hojas. Una forma nombrada como *chak chujum* (rojo) y *sak chujum* (blanco) que podrían corresponder a *O. pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. en su variedad *typica* y *O. pyramidale* variedad *bicolor* (Rowlee) Brizicky, respectivamente (Standley y Steyermark 1949). Aunque oficialmente se se considera a la especie como monofilética (Tropicos 2018; Plant list 2013).

A consecuencia de lo anterior, en 2015 Levy-Tacher, realizó varios recorridos prospectivos, a lo largo de la orilla de la carretera que va de Ocosingo hasta Pico de Oro en el estado de Chiapas, con el propósito de ubicar poblaciones e identificar la condición del sitio en que prosperan las dos variedades de *Ochroma*. Registrando 67 poblaciones de *O. pyramidale* var. *typica* y una de *O. pyramidale* var. *bicolor*. Las primeras poblaciones de la variedad *typica* se ubicaron a partir de los 350 msnm y se observó que sus poblaciones se encontraban con mayor frecuencia en vegetación secundaria, mientras que la

variedad *bicolor* llegaban a tener individuos de más de un m de diámetro basal y era posible encontrarlas en vegetación madura (Levy-Tacher com. pers.). Después de conocer esta información, en 2016 se establecieron dos plantaciones experimentales-demostrativas en las comunidades de Lacanjá Chansayab y Frontera Corozal ubicadas en la Selva Lacandona con el objetivo de conocer el desarrollo de las dos variedades en sus primeros años de vida. Se evaluaron algunas características morfológicas que ayudaron a distinguir a las dos variedades (Levy-Tacher com. pers.) (Anexo 1).

Propiedades físicas y mecánicas

Debido a la necesidad de clasificar la madera mediante los resultados de las evaluaciones de las propiedades físicas y mecánicas, se han realizado algunas investigaciones para describir el comportamiento de la madera balsa. Easterling *et al.* (1982) determinaron las propiedades de compresión axial con madera balsa en grupo de baja (78 kg/cm^3), media1 (127 kg/cm^3), media2 (160 kg/cm^3) y alta densidad (218 kg/cm^3), para demostrar que los módulos elásticos y la resistencia a la compresión de la madera balsa están relacionados con la flexión, el pandeo, el colapso plástico y la fractura de los miembros que forman las paredes celulares. Da Silva y Kyriakides (2007) complementaron que la rigidez y la resistencia axial también se debían a la microestructura celular de la madera balsa, la cual incluye un volumen muy importante de espacio vacío.

Borrega *et al.* (2015) describieron que la madera de alta densidad desarrolla una capa S2 que ocupa el 70 % del total de la pared celular, mientras que una madera de baja densidad tiene capas similares (S1, S2, S3), ocupando aproximadamente el 30 % del total. En cuanto a la sección transversal se conforma de 66 - 76% de fibras, de 20 - 25% de radios y 3 - 9% de vasos. A su vez, Honorato Salazar *et al.* (2015) reportó que la madera balsa se compone por 37.7 % de hemicelulosa, 40 % de celulosa y 23 % de lignina.

Borrega y Gibson (2015) realizaron ensayos mecánicos bajo la Norma ASTM D143 con algunas modificaciones. Utilizaron madera balsa procesada y las dividieron en tres grupos de densidades (baja, media y alta). En los resultados observaron que en los ensayos de compresión axial, flexión, torsión, el módulo de elasticidad y la resistencia aumentaron linealmente con la densidad, mientras que en la compresión perpendicular y el módulo de Young, tuvieron una variabilidad de forma no lineal. De la misma manera y bajo la misma norma se han realizado ensayos con madera de plantaciones comerciales, Kotlarewski *et al.* (2016) y Moncayo Galárraga (2017) determinaron una correlación lineal con relación al incremento de la densidad y aumento de la resistencia de la madera, con excepción de las pruebas de dureza Janka y cortante paralelo a la fibra, que se comportan de manera no lineal.

III. Justificación

La madera de *Ochroma pyramidale* se utiliza para la fabricación de una amplia gama de productos finales; sin embargo, en México no se cultiva en plantaciones comerciales, únicamente se le otorga usos para aprovechar sosteniblemente el ciclo agrícola de la selva Lacandona, posterior a este proceso los árboles son derribados, quemados y abandonados en la parcela. En esta misma zona, se reconocen dos variedades de *O. pyramidale* que son conocidas como *typica* (roja) y *bicolor* (blanca) y que en la actualidad no se tiene conocimiento de sus propiedades tecnológicas para nuestro país. Motivo por el cual, nosotros proponemos realizar un estudio para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas para determinar si existen diferencias entre la madera de las dos variedades reconocidas, y con base en los resultados, determinar si presentan características adecuadas para incursionar en el mercado forestal, pretendiendo coadyuvar al aprovechamiento comercial de *Ochroma* en nuestro país.

IV. Pregunta de investigación

¿Existen diferencias en el rendimiento de volumen maderable y en las propiedades físicas y mecánicas de la madera de las dos variedades de *O. pyramidale* reconocidas por los lacandones en la Selva Lacandona?

V. Objetivo general

Evaluar y comparar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de dos variedades de *O. pyramidale* provenientes de Lacanjá Chansayab, Chiapas y determinar su potencial como madera para la industria.

V.1 Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades físicas y mecánica en dos contenidos de humedad de la madera de dos variedades de *O. pyramidale*.
2. Estimar la producción de volumen maderable en Frontera Corozal.
3. Clasificar la producción del volumen maderable y de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas con base a los valores requeridos para su aprovechamiento.

VI. Hipótesis

Se ha reportado que la variedad *bicolor* presenta características morfológicas que facilitan su reconocimiento con respecto a la variedad *typica*. Esperamos diferencias estadísticas significativas en el rendimiento maderable y en las propiedades físicas y mecánicas de su madera. De cumplirse esta predicción la madera de una de las variedades puede presentar propiedades de interés comercial dentro del sector forestal.

VII. Metodología

VII.1 Área de estudio

Para efectos del presente estudio, se trabajó en dos comunidades del municipio de Ocosingo, Chiapas. Lacanjá Chansayab (16°46'08" N y 91°08'12" O) que se ubica a 350 msnm (CEIEG 2015; INEGI 2015) con clima cálido húmedo

con lluvias abundantes en verano y parte del otoño, así como una temporada seca corta (marzo-mayo). La otra localidad fue Frontera Corozal (16°49'16"N y 90°53'25"O) que se ubica a una altitud de 100 msnm y presenta un clima semi-cálido húmedo (CEIEG 2015; INEGI 2015).

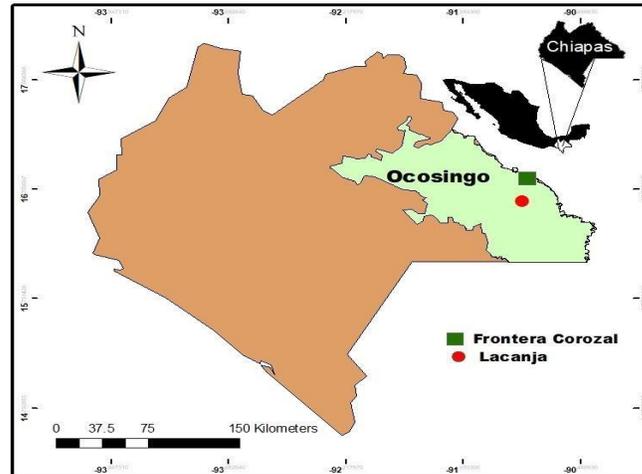


Figura. 1.- Ubicación de Lacanjá Chansayab y Frontera Corozal, municipio de Ocosingo, Chiapas.

VII.2 Ensayos físicos y mecánicos de la madera las dos variedades de *O. pyramidale*

La madera que se utilizó para realizar los ensayos físicos y mecánicos provino de árboles con cinco años de crecimiento, que fueron plantados de forma alternada en el perímetro de un área de cultivo, que en la actualidad es un acahual en barbecho, ubicado en la comunidad de Lacanjá Chansayab. Se trocearon cinco árboles por cada variedad y de cada uno de ellos, se eligieron tres trozas con una longitud de 1.20 m, todo el material se seleccionó mediante un muestreo aleatorio simple.

Una vez aserradas las trozas se les aplicó el fungicida "Busan 1129" por el método de inmersión, para prevenir la contaminación de la madera con el hongo de mancha azul. Posteriormente, se trasladó al Laboratorio de Pruebas de Productos Maderables del Instituto de Ecología A.C. en la ciudad de Xalapa- Enríquez, Veracruz para realizar los procesos de selección, elaboración e

identificación de los especímenes, así como los ensayos físicos y mecánicos con base en la norma: “Método de ensayo estándar para pequeños especímenes de madera libre de defectos” ASTM D143-09 (ASTM 2009).

Selección, elaboración e identificación de especímenes de ensayo

Los tablones se cantearon, cepillaron y dimensionaron, para obtener probetas de 30 x 30 x 600 mm y prismas de 60 x 60 x 600 mm, que después fueron dimensionados hasta obtener las probetas a ensayar. Para lograr cortes limpios se utilizó un disco de sierra con dientes separados y bien afilados. Debido a que la madera en condición verde presentó una difícil trabajabilidad, se aplicó aceite en aerosol para evitar que el aserrín húmedo se adhiriera al disco de la sierra asegurando que no se desperdiciara madera.

Del material total que se obtuvo, se realizó la selección de tablas y prismas necesarios para los ensayos en condición verde y seca. Para las pruebas en seco, se seleccionó la mitad más uno del número total de las piezas y el resto se destinó para las pruebas en condición verde.

VII.3 Ensayos físicos (ASTM D143-09)

Los tablones y prismas para las pruebas en seco fueron tratados con sales de Boro por inmersión para evitar el ataque de insectos. Además, las cabezas del material se sellaron con parafina para reducir la pérdida acelerada de humedad, asegurando que cada pieza mantuviera su identificación inequívoca, de esta manera se seleccionaron 29 tablas al azar de las dos variedades de *Ochroma* para el ensayo de velocidad de secado al aire libre.

Densidad básica relativa (DBr)

La densidad básica se determinó al finalizar cada ensayo mecánico, mediante la relación entre peso anhidro y el volumen verde (pa/vv) de cada pieza de madera (ASTM 2009)

$$Db = \frac{Pa}{Vv}$$

En donde:

Db: Densidad básica (g/cm³)

Pa: Peso anhidro (g)

Vv: Volumen verde (cm³)

Para obtener el valor de la densidad básica relativa, se dividió el valor de la densidad básica (g/cm³) sobre la densidad del agua a 4 °C equivalente a 1 gr/cm³. Al dividir las unidades se convierte en un valor adimensional, igual que el término inglés *specific gravity* (Echenique-Manrique y Robles Fernández 1993).

Contracciones tangenciales, radiales, longitudinales y volumétricas

El ensayo de contracciones se realizó con especímenes dimensionados a 25 x 25 x 25 mm. Los especímenes fueron dimensionados de manera que los anillos de crecimiento fueran paralelos a una de sus caras; para evitar una evaporación acelerada de agua y las caras transversales se cubrieron con parafina (ATSM D143-09). Cada tercer día se realizaron mediciones con un calibrador pie de rey o vernier, y se registraron las dimensiones de los ejes radial, tangencial y longitudinal de cada espécimen, en tres diferentes condiciones de humedad secuenciales: 1) al aire libre, 2) a 12 % de humedad y 3) en condición anhidra, secado al horno con una temperatura constante de 103 °C ± 2 °C durante 48 horas.

Los porcentajes de contracción total (Ct) e intermedia (Cint), se calcularon usando las expresiones:

$$Ct, \% = \frac{Di - Df}{Di} * 100$$

$$Cint, \% = \frac{Di - Dint}{Di} * 100$$

En donde:

C_t = Contracción total (%)

C_{int} = Contracción intermedia (%)

D_i = Dimensión inicial (mm)

D_a = Dimensión anhidra (mm)

D_{int} = Dimensión intermedia (mm)

Secado al aire libre

El secado se realizó en el área de secado del laboratorio siguiendo lo descrito por Bárcenas (1995), durante los meses de febrero y marzo de 2017. Con las tablas enteras se armó una pila de secado al aire libre orientada en dirección norte, de manera que el aire circulara de forma perpendicular a la longitud de las tablas. Para calcular la tasa de secado, se seleccionó una muestra testigo de 29 tablas, las cuales, se pesaron cada tercer día hasta registrar un peso constante. Después de haber alcanzado dicho peso, las tablas se llevaron a una cámara de acondicionamiento para homogeneizar su contenido de humedad ($12 \% \pm 2 \%$). El contenido de humedad (CH) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{P_i - P_a}{P_a} * 100$$

Donde:

P_i : Peso inicial

P_a : Peso anhidro

CH: Contenido de humedad (%)

VII.4 Ensayos mecánicos (ASTM D143-09)

La norma ASTM D143-09 establece que los ensayos deben ser realizados con madera libre de defectos. No deben contener características de crecimiento y defectos de secado o maquinado, tales como médula (eje central del tallo de los árboles), fibra desviada, nudos, bolsas de resinas, alabeos, rajaduras o pudrición. Además de ensayar madera con dos contenidos de humedad (CH): verde ($\geq 30 \%$) y seca ($\leq 12 \% \pm 2 \%$).

Los especímenes en condición verde, se mantuvieron saturados en agua, y los destinados para la condición seca, en una cámara de acondicionamiento a un contenido de humedad constante del 12%, hasta la realización de los ensayos. En general, se hicieron dos repeticiones por troza y por condición de humedad con excepción del ensayo de tenacidad por impacto, donde el número de repeticiones fue de ocho especímenes por troza.

Los ensayos de cortante paralelo a las fibras, dureza Janka, flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular se realizaron en una máquina universal INSTRON 3385H con capacidad de 25 toneladas y con el software *Bluehill*. El ensayo de tenacidad por impacto se realizó en una máquina de impacto modelo FPL.

Compresión paralela a la fibra

Es la resistencia de la madera ante una carga aplicada en dirección paralela a las fibras. Del ensayo se obtuvieron: esfuerzo en el límite de proporcionalidad (f_{Cp}), esfuerzo máximo (f_{Cmax}) y módulo de elasticidad (E).

Las dimensiones de los especímenes fueron 25 x 25 mm \pm 0.5 de sección transversal y 100 mm \pm 1.0 mm de longitud. La aplicación de la carga se realizó a una velocidad constante de 0.3 \pm 25% mm/min y se ensayaron hasta lograr que el espécimen presentara una falla significativa (Anexo 14.1).

Compresión perpendicular a la fibra

Ensayo en el que se aplica una fuerza perpendicular a la dirección de la fibra y se obtiene el esfuerzo en compresión perpendicular. Las propiedades que se midieron son: esfuerzo en el límite de proporcionalidad (f_{Cp}) y esfuerzo en compresión perpendicular a 2.5 mm de deformación ($f_{C2.5}$).

Las dimensiones de los especímenes fueron de 50 x 50 \pm 0.5 mm de sección transversal y 150 mm \pm 1.0 mm de longitud de longitud. La aplicación de

la carga se hizo con una velocidad constante de $0.3 \pm 25\%$ mm/min hasta alcanzar una deformación de 25 mm (Anexo 14.2).

Cortante paralelo a la fibra

Es la capacidad para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento longitudinal de una parte de la pieza sobre otra, es decir, cuando se aplican cargas contrarias convergentes que actúan en planos diferentes en la dirección longitudinal y se obtiene el esfuerzo máximo en cortante ($f_{Cmáx}$).

Las dimensiones de los especímenes fueron de 50×50 mm ± 0.5 mm de sección transversal y 63 ± 1.0 mm de longitud, en la superficie de aplicación de la carga, se realizó una muesca de 19×13 mm, la cual debe ser paralela a los anillos de crecimiento. El ensayo terminó con la falla total del espécimen (Anexo 14.3).

Dureza Janka

Se define como la resistencia que opone un cuerpo a ser penetrado, se determina a partir de la dureza lateral (DL) y la dureza en los extremos (DE) de la probeta,

El ensayo se realizó en la misma probeta de compresión perpendicular, hincando una semiesfera de 11.3 mm de diámetro hasta registrar la carga necesaria que permitió penetrar la mitad del diámetro en las caras y extremos de la probeta, con una velocidad de 6.0 mm/min $\pm 25\%$ (Anexo 14.4).

Flexión estática

El espécimen se apoyó en sus extremos como una viga, y se aplicó una carga puntual en el centro de su longitud, hasta provocarle la falla. Durante el ensayo de flexión, se producen deformaciones a tensión, compresión y cortante donde los diferentes tipos de células que forman la madera sufren alargamiento y

encogimiento en la parte inferior de la viga (tensión) y en la parte superior, sufren compresión (Bodig y Jayne 1982).

Se utilizaron probetas con dimensiones de $25 \times 25 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de sección transversal y $410 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de longitud. Para la realización del ensayo, los especímenes se apoyaron en sus extremos y se les aplicó una carga puntual en el centro de cada muestra, con una velocidad constante de $1.3 \text{ mm/min} \pm 25\%$ hasta lograr la falla total (Anexo 14.5).

Las propiedades que se obtuvieron fueron:

- a) Esfuerzo en el límite de proporcionalidad (f_{Cp}), en el punto en que el esfuerzo y la deformación unitaria dejan de ser directamente proporcionales.
- b) Módulo de ruptura (MOR) que es la capacidad máxima de carga soportada por la pieza. Es una medida del esfuerzo de flexión en la fractura, calculado al asumir la elasticidad lineal hasta la fractura (Borrega y Gibson 2015).
- c) Módulo de elasticidad (MOE) que se define por la relación existente entre el esfuerzo unitario al límite de proporcionalidad f_{Cp} y la deformación unitaria
- d) Trabajo unitario en el límite de proporcionalidad (Tu_p), la energía acumulada en la probeta antes de sufrir una deformación permanente por la aplicación de la carga.
- e) Trabajo unitario en la carga máxima (Tu_{pmax}) la energía acumulada en la probeta hasta antes de fallar completamente.

Tenacidad por impacto

El ensayo de tenacidad por impacto, se realiza con el objetivo de obtener la tenacidad (t) y la resiliencia de la madera que son propiedades importantes para la fabricación de implementos deportivos, agrícolas y durmientes de ferrocarril, entre otros usos.

Las dimensiones de los especímenes fueron de 20 x 20 mm de sección transversal y 280 mm de longitud. En la máquina FLP se produjo un momento (peso del péndulo por la distancia entre eje de balanceo del péndulo y la posición del peso), ocasionando la falla total de la probeta con una fuerza súbita de 1216.58 kg/cm. (Anexo 14.6).

VII.5 Incremento medio anual (IMA) de dos variedades de *O. pyramidale* provenientes de Frontera Corozal

Para efectos del presente análisis, se trabajó en la comunidad de Frontera Corozal, municipio de Ocosingo, Chiapas. En 2014 se estableció una parcela experimental con *O. pyramidale* variedad *typica* y *bicolor* (en un proyecto independiente al planteamiento de esta tesis) con el objetivo de evaluar el desarrollo de las dos variedades de balsa. Debido al pobre manejo silvícola, actualmente sobreviven poco más de la mitad de los árboles establecidos en una parcela de 0.1536 ha.

Del conjunto de árboles que sobrevivieron a los tres años de crecimiento, se midieron la altura total y el diámetro a la altura de pecho (DAP) para 63 árboles de la variedad *typica* y 74 de la variedad *bicolor*. De los cuales se calculó el volumen maderable para cada árbol con la fórmula de coeficiente mórfico (De Jong *et al.* 2009):

$$V = 0.7854 * DAP^2 * h * fc$$

En donde:

V= volumen de cada árbol

DAP= diámetro a la altura de pecho

h= altura

fc= factor de corrección según la forma del fuste (0.5)

Consecuentemente, se obtuvo el valor de las existencias maderables a los tres años mediante la siguiente fórmula, y finalmente se determinó el incremento medio anual en volumen (IMA).

$$E = \sum V \div Sup$$

$$IMA = E \div T$$

En donde:

E= existencias ($m^3 \cdot ha^{-1}$)

V= volumen maderable para cada árbol (m^3)

Sup= superficie de la parcela (ha^{-1})

IMA= incremento medio anual ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

E= volumen predicho para una superficie y una edad determinada

T= edad de la plantación (años)

VII.6 Análisis de resultados

La cubicación de la madera de las dos variedades de *O. pyramidale* se realizó con base a Jaramillo Romero (2014), debido a que la edad de aprovechamiento de la madera balsa se realiza entre cinco y seis años de crecimiento (Migley *et al.* 2010) (Anexo 8).

Las propiedades físicas y mecánicas se evaluaron con un Modelo Lineal General Univariante con un arreglo de factores anidados en el programa SPSS IBM, versión 21; la variedad se analizó como factor fijo y las trozas como factor aleatorio. Debido a que los resultados de los ensayos de contracciones son valores porcentuales (%), fue necesario realizar una transformación con la siguiente formula:

$$X' = \arcsin(\sqrt{X / 100}) * (360 / (2 * 3.1416)) \text{ (Dytham 2011)}.$$

Finalmente, se realizó un análisis de correlación lineal (Dytham 2011) entre la densidad básica relativa (DBr, pa/vv) y los ensayos de la condición verde y seca para encontrar un factor de correlación entre los resultados de las propiedades mecánicas y la densidad básica relativa (pa/vv).

VII. Resultados

VIII.1 Propiedades físicas

En la Tabla 2 se presentan los grados de libertad y significancia del MLG Univariante para las propiedades físicas. En los resultados de la ANOVA se demostró que no existen diferencias en densidad básica relativa (DBr , pa/vv) entre la madera ensayada de las dos variedades para las dos variedades; tampoco son diferentes los resultados de las trozas entre si. En los porcentajes de contracciones, se obtuvieron diferencias significativas en los porcentajes de contracciones tangenciales y volumétricas. El análisis de anidación por trozas reflejó una interacción significativa dentro de cada variedad para las contracciones radiales, longitudinales y volumétricas.

Tabla 1. Grados de libertad y significancia para las propiedades físicas.

Ensayo	Propiedad	Troza(Variedad)			Variedad		
		gl	F	Sig.	gl	F	Sig.
Densidad	Dbr (pa/vv)	10	0.41	0.925	1	0.62	0.44
	Tangencial (%)	8	1.01	0.481	1	4.96	0.048
Contracción	Radial (%)	8	11.82	0.000	1	3.27	0.107
	Longitudinal (%)	7	15.20	0.000	1	1.14	0.320
	Volumétrica (%)	8	5.63	0.005	1	6.04	0.038

En la Tabla 2 se describen los valores medios de densidad básica relativa (pa/vv) de la madera de dos variedades de *O. pyramidale* proveniente de Lacanjá Chansayab, Chiapas. También se obtuvo una relación en contracciones tangenciales/radiales (Ct/Cr) para la variedad *typica* de 2.68 y para la variedad *bicolor* de 2.62.

Tabla 2. Resultados de densidad básica relativa (pa/vv) y contracciones para la madera de dos variedades *Ochroma pyramidale* de Chiapas.

Propiedad	<i>O. pyramidale</i> var. <i>typica</i>			<i>O. pyramidale</i> var. <i>bicolor</i>		
	Media + SD	Mínimo	Máximo	Media + SD	Mínimo	Máximo
Densidad básica relativa (pa/vv)	0.156 ± 0.006	0.15	0.17	0.152 ± 0.01	0.13	0.18
Tangenciales	6.08 ± 1.24	4.50	8.48	7.17 ± 1.55	5.07	8.6
Radial	2.27 ± 0.34	1.83	2.96	2.74 ± 0.37	2.25	3.60
Longitudinal	1.16 ± 0.22	0.75	1.49	1.13 ± 0.15	0.97	1.50
Volumétrica	10.44 ± 1.54	8.36	12.9	11.68 ± 0.96	10.68	13.20

SD = desviación estándar, UM = unidades de medida.

Secado al aire libre

En el ensayo de velocidad de secado, la madera de las dos variedades alcanzó un contenido de humedad en equilibrio en 30 días aproximadamente. En el inicio del ensayo la madera de la variedad *typica* contenía 40 % más de agua que la variedad *bicolor*, sin embargo, al finalizar el ensayo, el contenido de humedad en equilibrio promedio de ambas variedades fue similar (14 %).

Correlación lineal entre la densidad básica y las propiedades mecánicas

En la Tabla 3 se presenta el factor de significancia y de correlación para seis resultados de propiedades mecánicas vs densidad básica relativa (pa/vv) en condición seca (CH = 12 % ± 2 %). Se observa que la DBr (pa/vv) de madera de la variedad *typica* tuvo influencia significativa en las tres propiedades en compresión perpendicular a la fibra, en cuatro propiedades en flexión estática (salvo $T_{UPmáx}$), DE y DL en dureza Janka y en tenacidad unitaria, los cuales demostraron un incremento lineal de la propiedad conforme la DBr (pa/vv) aumentó. En la variedad *bicolor* se presentó una correlación significativa en f_{Cp} y $f_{Cmáx}$ de compresión paralela a la fibra, $f_{C2.5}$ en compresión perpendicular a la fibra, en las cinco de flexión estática y DL en dureza Janka con un incremento linealmente proporcional con la DBr (pa/vv).

Tabla 3. Correlación de densidad básica (pa/vv) vs propiedades mecánicas en condiciones seca (CH = 12 % ± 2 %) de la madera de dos variedades *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	<i>O. pyramidale var. typica</i>		<i>O. pyramidale var. bicolor</i>	
		ρ	r	ρ	R
CP	$f_{C_{lp}}$	0.939	0.02	0.012	0.70
	$f_{C_{m\acute{a}x}}$	0.507	-0.20	0.011	0.66
	E	0.766	-0.09	0.824	0.07
CB	$f_{C_{lp}}$	0.001	0.89	0.816	-0.08
	$f_{C_{2.5}}$	0.000	0.94	0.000	0.92
VR	$f_{C_{m\acute{a}x}}$	0.728	-0.15	0.119	0.44
FE	$f_{C_{lp}}$	0.000	0.96	0.000	0.93
	MOR	0.000	0.96	0.000	0.94
	MOE	0.000	0.99	0.000	0.94
	Tu_{lp}	0.014	0.82	0.001	0.87
	$Tu_{Pm\acute{a}x}$	0.125	0.59	0.001	0.87
DJ	DE	0.015	0.77	0.142	0.45
	DL	0.001	0.90	0.018	0.67
IT	Tu	0.000	0.96	0.000	0.94

CP = compresión paralela a la fibra, CB = compresión perpendicular a la fibra, VR = cortante paralelo a la fibra, FE = flexión estática, DJ = dureza Janka, IT = tenacidad, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión paralela a la fibra (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa), E = módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{2.5}}$ = esfuerzo a 2,5 mm en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra (MPa), MOR = módulo de ruptura en flexión (MPa), MOE = módulo de elasticidad en flexión (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad en flexión (kJ/m³), $Tu_{Pm\acute{a}x}$ = trabajo en el esfuerzo máximo en flexión (kJ/m³), DE = dureza en los extremos (N), DL = dureza lateral (N), Tu = Tenacidad (J/cm³).

En la condición verde (Tabla 4), la variedad *typica* demostró tener correlación con la DBr (pa/vv) en casi todas las propiedades, con excepción de $f_{C_{lp}}$ en compresión perpendicular y DE en dureza Janka. En la variedad *bicolor* se presentaron correlaciones significativas en compresión perpendicular, flexión estática y dureza Janka.

Tabla 4. Correlación de densidad básica (pa/vv) vs propiedades mecánicas en condición verde (CH ≥ 30 %) de la madera de dos variedades *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	Verde			
		<i>O. pyramidale var. typica</i>		<i>O. pyramidale var. bicolor</i>	
Ensayo	Propiedad	ρ	r	ρ	R
CP	$f_{C_{lp}}$	0.000	0.76	0.102	0.47
	$f_{C_{m\acute{a}x}}$	0.000	0.85	0.005	0.70
	E	0.001	0.60	0.224	0.42
CB	$f_{C_{lp}}$	0.685	0.21	0.002	0.82
	$f_{C_{2,5}}$	0.042	0.83	0.001	0.83
VR	$f_{C_{max}}$	0.005	0.97	0.324	0.44
FE	$f_{C_{lp}}$	0.000	0.93	0.000	0.95
	MOR	0.000	0.94	0.000	0.94
	MOE	0.001	0.92	0.001	0.80
	Tu_{lp}	0.060	0.65	0.004	0.74
	$Tu_{Pm\acute{a}x}$	0.065	0.64	0.000	0.85
DJ	DE	0.626	0.27	0.005	0.78
	DL	0.038	0.78	0.005	0.78

CP = compresión paralela a la fibra, CB = compresión perpendicular a la fibra, VR = cortante paralelo a la fibra, FE = flexión estática, DJ = dureza Janka, IT = tenacidad, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión paralela a la fibra (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa), E = módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{2,5}}$ = esfuerzo a 2,5 mm en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra (MPa), MOR = módulo de ruptura en flexión (MPa), MOE = módulo de elasticidad en flexión (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad en flexión (kJ/m^3), $Tu_{Pm\acute{a}x}$ = trabajo en el esfuerzo máximo en flexión (kJ/m^3), DE = dureza en los extremos (N), DL = dureza lateral (N).

VIII.2 Propiedades mecánicas en condición seca (CH = 12 % \pm 2 %) y verde (CH ≥ 30 %)

En la Tabla 5 y 6 se presentan la significancia y los valores medios de los resultados de los ensayos en condición seca; en la tabla 9 y 10 se presentan los correspondientes para la condición verde de madera de dos variedades de *O. pyramidale*. En la condición seca se muestran diferencias significativas para $f_{C_{lp}}$ en compresión perpendicular a la fibra, en dureza lateral (DL) y para Tu en tenacidad por impacto. Entre los resultados por trozas no hubo interacción significativa, es decir, los resultados para cada una son independientes.

Tabla 5. Significancia y grados de libertad de los resultados del MLG para los ensayos mecánicos en condición seca (CH = 12 % ± 2 %) de la madera de dos variedades *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	Troza (Variedad)			Variedad		
		gl	F	Sig.	gl	F	Sig.
CP	$f_{Cmáx}$	10	1.07	0.400	1	1.74	0.208
CB	$f_{C_{lp}}$	9	0.46	0.900	1	8.81	0.010
	$f_{C_{2.5}}$	9	0.62	0.800	1	3.55	0.082
VR	$f_{Cmáx}$	9	0.49	0.900	1	2.49	0.133
FE	$f_{C_{lp}}$	9	0.72	0.700	1	0.64	0.438
	MOR	9	0.78	0.600	1	0.39	0.542
	MOE	9	1.09	0.500	1	1.16	0.304
	Tu_{lp}	9	0.46	0.900	1	0.17	0.685
	$Tu_{Pmáx}$	9	0.40	0.900	1	1.1	0.312
DJ	DE	9	1.31	0.300	1	1.36	0.268
	DL	9	0.97	0.500	1	8.96	0.012
IT	Tu	10	0.92	0.500	1	9.46	0.009

CP = compresión paralela a la fibra, CB = compresión perpendicular a la fibra, VR = cortante paralelo a la fibra, FE = flexión estática, DJ = dureza Janka, IT = tenacidad, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión paralela a la fibra (MPa), $f_{Cmáx}$ = esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa), E = módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{2.5}}$ = esfuerzo a 2,5 mm en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{Cmáx}$ = esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra (MPa), MOR= módulo de ruptura en flexión (MPa), MOE= módulo de elasticidad en flexión (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad en flexión (kJ/m³), $Tu_{Pmáx}$ = trabajo en el esfuerzo máximo en flexión (kJ/m³), DE = dureza en los extremos (N), DL = dureza lateral (N), Tu = Tenacidad (J/cm³).

Tabla 6. Descripción de los valores medios de los ensayos mecánicos en condición seca (CH = 12 % \pm 2 %) para la madera de dos variedades de *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	<i>O. pyramidale</i> var <i>typica</i>			<i>O. pyramidale</i> var <i>bicolor</i>			UM
		Media \pm SD	Mín.	Máx.	Media \pm SD	Mín.	Máx.	
CP	$f_{C_{lp}}$	12.49 \pm 2.54	8.10	16.90	12.05 \pm 3.99	5.20	18.05	MPa
	$f_{C_{máx}}$	15.01 \pm 2.97	10.50	20.20	13.91 \pm 3.66	5.60	20.00	
	E	3156 \pm 1110	1744	5651	2785 \pm 1053	1046	5235	
CB	$f_{C_{lp}}$	0.85 \pm 0.15	0.67	1.05	0.60 \pm 0.28	0.00	1.00	MPa
	$f_{C_{2.5}}$	1.57 \pm 0.26	1.19	2.05	1.41 \pm 0.32	1.01	1.93	
VR	$f_{C_{máx}}$	2.12 \pm 1.03	1.16	4.49	1.60 \pm 0.55	1.16	3.32	MPa
FE	$f_{C_{lp}}$	15.51 \pm 3.28	10.75	18.65	17.05 \pm 3.97	11.40	23.40	MPa
	MOR	19.43 \pm 3.94	13.90	23.50	21.00 \pm 4.91	13.70	28.30	
	MOE	3089 \pm 736	1967	3940	3568 \pm 914	2020	5212	
	Tu_{lp}	4.81 \pm 1	3.05	6.00	5.07 \pm 1.13	3.90	7.25	
	$Tu_{Pmáx}$	12.69 \pm 1.86	9.10	15.00	11.85 \pm 3.13	7.60	17.30	
DJ	DE	926 \pm 195	697	1274	819 \pm 211	574	1293	N
	DL	527 \pm 97	426	722	391 \pm 127	255	709	
IT	Tu	0.007 \pm 0.001	0.01	0.01	0.004 \pm 0.001	0.00	0.01	J/cm ³

CP = compresión paralela a la fibra, CB = compresión perpendicular a la fibra, VR = cortante paralelo a la fibra, FE = flexión estática, DJ = dureza Janka, IT = tenacidad, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión paralela a la fibra (MPa), $f_{C_{máx}}$ = esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa), E = módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{2.5}}$ = esfuerzo a 2,5 mm en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C_{máx}}$ = esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra (MPa), MOR = módulo de ruptura en flexión (MPa), MOE = módulo de elasticidad en flexión (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad en flexión (kJ/m³), $Tu_{Pmáx}$ = trabajo en el esfuerzo máximo en flexión (kJ/m³), DE = dureza en los extremos (N), DL = dureza lateral (N), Tu = Tenacidad (J/cm³).

En la condición verde (CH \geq 30 %) se observó diferencias significativas en $f_{C_{max}}$ en cortante paralelo a las fibras. La influencia de las trozas no resultó significativa en el análisis de factores anidados en ninguna de las propiedades evaluadas. Finalmente, la variedad *typica* presentó los valores más altos en los ensayos de compresión paralela, cortante paralelo y dureza Janka, mientras que la variedad *bicolor* desarrolló un mayor intervalo de variabilidad en los resultados (Tabla 7 y 8).

Tabla 7. Significancia y grados de libertad para los resultados del MLG univariante para los ensayos mecánicos en condición verde (CH \geq 30 %) de la madera de dos variedades *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	Troza (Variedad)			Variedad		
		gl	F	Sig.	gl	F	Sig.
CP	f_{Cp}	10	1.57	0.20	1	0.35	0.57
	$f_{Cm\acute{a}x}$	10	1.33	0.29	1	0.23	0.64
	E	9	1.17	0.38	1	3.29	0.09
CB	f_{Cp}	8	0.79	0.63	1	2.30	0.16
	$f_{C2,5}$	8	0.46	0.85	1	1.73	0.21
VR	$f_{Cm\acute{a}x}$	8	0.35	0.90	1	9.86	0.01
FE	f_{Cp}	9	0.91	0.55	1	0.90	0.36
	MOR	9	0.80	0.63	1	0.55	0.47
	MOE	9	1.05	0.46	1	1.71	0.22
	Tu_{lp}	9	1.09	0.44	1	0.06	0.81
	$Tu_{Pm\acute{a}x}$	9	0.55	0.81	1	0.01	0.91
DJ	DE	8	0.64	0.73	1	0.18	0.68
	DL	8	0.68	0.70	1	3.30	0.09

CP = compresión paralela a la fibra, CB = compresión perpendicular a la fibra, VR = cortante paralelo a la fibra, FE = flexión estática, DJ = dureza Janka, IT = tenacidad, f_{Cp} = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión paralela a la fibra (MPa), $f_{Cm\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (MPa), E = módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (GPa), f_{Cp} = esfuerzo en el límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{C2,5}$ = esfuerzo a 2,5 mm en compresión perpendicular a la fibra (MPa), $f_{Cm\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra (MPa), MOR = módulo de ruptura en flexión (MPa), MOE = módulo de elasticidad en flexión (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad en flexión (kJ/m³), $Tu_{Pm\acute{a}x}$ = trabajo en el esfuerzo máximo en flexión (kJ/m³), DE = dureza en los extremos (N), DL = dureza lateral (N).

Tabla 8. Descripción de los valores medios de los ensayos mecánicos en condición verde (≥ 30 % de humedad) para la madera de dos variedades de *O. pyramidale*.

Ensayo	Propiedad	<i>O. pyramidale</i> var <i>typica</i>			<i>O. pyramidale</i> var <i>bicolor</i>			UM
		Media \pm SD	Mínimo	Máximo	Media \pm SD	Mínimo	Máximo	
CP	$f_{C_{lp}}$	6.55 \pm 1.49	3.48	8.34	7.06 \pm 2.28	4.80	11.60	MPa
	$f_{C_{m\acute{a}x}}$	7.71 \pm 1.65	4.18	9.62	7.99 \pm 2.30	5.03	11.75	
	E	1782 \pm 524	1192	2748	2838 \pm 1507	992	6994	
CB	$f_{C_{lp}}$	0.65 \pm 0.10	0.51	0.81	0.58 \pm 0.12	0.44	0.84	MPa
	$f_{C_{2,5}}$	1.14 \pm 0.16	0.89	1.34	1.06 \pm 0.24	0.74	1.53	
VR	$f_{C_{m\acute{a}x}}$	1.69 \pm 0.17	1.47	1.95	1.38 \pm 0.22	1.17	1.87	MPa
FE	$f_{C_{lp}}$	10.21 \pm 3.03	4.31	14.10	11.23 \pm 2.62	7.48	14.75	MPa
	MOR	13.31 \pm 3.84	5.80	18.20	14.34 \pm 3.44	9.30	19.00	
	MOE	2381 \pm 955	934	3749	2861 \pm 745	1813	4282	
	Tu_{lp}	2.86 \pm 0.85	1.20	4.30	2.90 \pm 0.86	1.60	4.05	
	$Tu_{Pm\acute{a}x}$	10.89 \pm 3.10	5.50	14.80	10.60 \pm 3.10	7.00	15.30	
DJ	DE	845 \pm 133	654	1022	791 \pm 262	533	1365	N
	DL	620 \pm 87	525	771	524 \pm 133	370	810	

CP= compresión paralela, CB= compresión perpendicular, VR= cortante paralelo a la fibra, FE= flexión estática, DJ= dureza Janka, IT= importacto por tenacidad, SD= desviación estándar, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo (MPa), E= módulo de elasticidad (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad (MPa), $f_{C_{2,5}}$ =esfuerzo a 2,5 mm de compresión (MPa), $f_{C_{m\acute{a}x}}$ = esfuerzo máximo (MPa), MOR= módulo de ruptura (MPa), MOE= módulo de elasticidad (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad (kJ/m^3), $Tu_{Pm\acute{a}x}$ = trabajo en el esfuerzo máximo (kJ/m^3), DE= dureza en los extremos (N), DL= dureza lateral (N), T= Tenacidad (J/cm^3), Tu = Trabajo unitario (J/cm^3), UM= Unidades de medida, MPa= MegaPascales, GPa= GigaPascales, kJ= KiloJoules, m^3 = metro cúbico, N= Newton.

VIII.3 Volumen maderable a los tres años de crecimiento

En la Tabla 9 se observa que a la edad de tres años los árboles presentan un promedio en el DAP de 16 cm y una altura de 10 m. Se estimó que a la edad de aprovechamiento comercial para esta parcela, la variedad *bicolor* producirá mayor volumen en comparación a la variedad *typica*. Anualmente la variedad *bicolor* produce $19.89 \text{ m}^3/\text{ha}^{-1}/\text{años}^{-1}$ y la variedad *typica* $14.06 \text{ m}^3/\text{ha}^{-1}/\text{años}^{-1}$.

Tabla 9. Valores descriptivos de diámetro a la altura de pecho y altura total a los tres años de crecimiento e incremento medio anual de dos variedades de *O. pyramidale*

Variedad (N)	Diámetro a la altura de pecho (cm)			Altura total (m)			IMA m ³ /ha ⁻¹ /años ⁻¹	Madera a los cinco y seis años
	Media + SD	Mín.	Máy.	Media + SD	Mín.	Máy.		
<i>Typica</i> (N. 63)	16.91 + 3.57	3.02	23.24	10.53 + 1.34	6.50	13.00	14.06	70.32 - 84.38
<i>Bicolor</i> (N. 74)	16.21 + 3.91	8.09	26.42	10.80 + 1.53	7.00	14.00	19.89	99.45 - 119.34

N: número de árboles en la parcela, SD: desviación estándar, Mín.: mínimo, Máx.: máximo, IMA: incremento medio anual

IX. Discusión

Los resultados que se obtuvieron en los ensayos mecánicos son inéditos para la madera de las dos variedades de *Ochroma pyramidale* que crecen en nuestro país. Su comparación sólo se hará para los obtenidos en condición seca, debido a que no existe información en el nivel nacional e internacional para todas las propiedades ensayadas.

IX.1 Propiedades físicas

Las densidades básicas obtenidas para la madera de las dos variedades de *O. pyramidale* provenientes de Lacanjá Chansayab, permiten clasificarla como extremadamente liviana (Fuentes-Salinas 1988) (Anexo 2). Por lo cual se considera como la madera comercial más ligera disponible en el mercado (Borrega y Gibson 2015). A su vez, los resultados que nosotros obtuvimos pertenecen a una densidad media (Midgley *et al.* 2010) (Anexo 3) para su comercialización en el nivel internacional. Esta característica es una ventaja, de acuerdo con Kotlarewski *et al.* (2016) porque los especímenes ensayados con una densidad similar, demostraron valores más altos de esfuerzos en compresión perpendicular y cortante paralelo.

La variabilidad de la densidad resulta de la competencia entre árboles y la calidad de sitio (Douterlungne *et al.* 2005), a su vez, depende del volumen de las fibras en la madera. En una densidad mayor los lúmenes son más pequeños y las paredes celulares más anchas, lo que hace que el peso de la madera balsa aumente cinco veces aproximadamente, como consecuencia del espesor de la capa S2, la cual representa 73 % del total de la pared secundaria. En cambio, cuando una madera balsa desarrolla una densidad baja, la capa secundaria tiene un porcentaje similar a las capas S1 y S3 (30 %) (Borrega *et al.* 2015).

Los resultados del ensayo de contracciones, los valores en la dirección tangencial y los volumétricos fueron clasificados como altos y muy altos (Fuentes-Salinas 1988) (anexo 5), característicos del nivel de densidad que desarrolla la

madera balsa (Echenique-Manrique *et al.* 1975). La relación entre las contracciones tangencial y radial (CT/CR) indican que nuestra madera balsa presenta una estabilidad regular Silva-Guzmán (2008), por su parte Fuentes- Salinas (1988) clasifica a las relaciones (CT/CR) como muy altas (anexo 6). Las cuales se consideran desfavorables para la madera, debido a que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir distorsiones y agrietamientos durante el proceso de secado como consecuencia de que un mayor porcentaje de contracción, se asocia a una baja densidad (Echenique-Manrique *et al.* 1975).

En la actualidad, no existe información sobre las contracciones de la madera balsa mexicana, pero sí de otras latitudes con ensayos realizados con base en la norma ASTM. Los valores de las contracciones que obtuvimos con la balsa ensayada, son similares a los reportados por Kretschmann (2010), quien describe valores para las contracciones tangenciales de 7.6 %, radiales de 3 % y volumétricas de 10.8%. También coinciden con los valores recopilados por Echenique-Manrique *et al.* (1975) para la misma especie; con excepción de clasificación *alta* en los valores de contracciones volumétricas (Anexo 9).

Por otra parte, el tiempo que requirió en secarse nuestra madera balsa proveniente de Lacanjá Chansayab, fue similar al reportado por Echenique-Manrique *et al.* (1975), la cual se puede clasificar como una madera de secado rápido (Bárceñas-Pazos 1995) (anexo 4). Este ensayo fue favorecido por la baja densidad y a la presencia de lúmenes anchos que permitieron el paso libre del agua (Borrega *et al.* 2015).

Finalmente, es importante reconocer que la densidad, el tiempo de secado y los porcentajes de contracciones que presenta la madera balsa la hacen propensa para desarrollar algunos defectos, por ejemplo, acanalamientos, arqueamientos, alabeos de canto, grietas en las superficies y rajaduras en los extremos, por lo que es importante tomar precauciones durante el proceso de secado para evitar su aparición. Se recomienda utilizar metodologías específicas

como las que propusieron Echenique-Manrique et al. (1975) o las recomendadas por los programas (US) de secado como T10-D4S para 1" pulgada y el T8-D3S para 2" pulgadas (Silva 2008).

Correlación lineal entre la densidad básica relativa o DBr (pa/vv) vs las propiedades mecánicas

Nuestros resultados mostraron que la densidad básica relativa (pa/vv) de la madera balsa ensayada está directamente relacionada con la resistencia y la rigidez de la madera en compresión perpendicular, flexión estática y con su dureza en la condición seca. Esta propiedad física se considera la más importante de la madera debido a que es un indicador confiable principalmente por su resistencia mecánica, trabajabilidad, contracciones, calidad de acabados y poder calorífico (Easterling *et al.* 1982; Echenique-Manrique y Robles-Fernández 1993; Borrega *et al.* 2015). Las propiedades mecánicas que presenta la madera balsa en relación con su peso, se explican por los ángulos que desarrollan las microfibrillas de la pared secundaria en las células de la madera balsa y la alta cristalinidad de la celulosa, obteniendo así, una baja densidad y alta resistencia mecánica en comparación a otras maderas (Borrega y Gibson 2015; Honorato Salazar *et al.* 2015).

IX.3 Propiedades mecánicas

De acuerdo con las fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México Silva (2008), los resultados en esfuerzo máximo ($f_{Cmáx}$) en compresión paralela, esfuerzo máximo ($f_{Cmáx}$) en cortante paralelo, módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en flexión, así como dureza lateral (DL) correspondieron dentro del intervalo de propiedades recomendadas para el uso de la madera balsa en México, con excepción de tenacidad (T) en el que obtuvimos un valor menor al recopilado por la misma autora (Anexo 11).

No obstante, en la “clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca” (Dávalos-Sotelo y Bárcenas-Pazos 1999), los resultados de las propiedades evaluadas en este trabajo corresponden con los valores del grupo de *muy bajos*, debido a que esta clasificación es general para maderas tropicales (anexo 7).

En general, los valores incluidos en la tabla 6 son mayores a los presentados por Echenique-Manrique *et al.* (1975), Kotlarewski *et al.* (2016), Kretschmann (2010) y Moncayo-Galárraga (2017) (anexo 10); sin embargo la madera balsa es muy porosa y no es recomendable para fabricar pisos, retener clavos o para elaborar estructuras. El uso más popular que se le otorga a la madera, es la fabricación de paneles end-grain, que forman parte de los paneles estructurales tipo sándwich o para rellenar contrachapados, MDF, aglomerados, puertas y otros materiales industriales (AirexBaltekBanova, 2018; Migley *et al.* 2010), los cuales se caracterizan por ser materiales livianos que requieren buen desempeño mecánico y este se explica, además de su baja densidad por la composición de sus paredes celulares.

La tenacidad de la madera al impacto es una propiedad mecánica que mide la capacidad de una madera para ser usada cuando sea necesario absorber y disipar energía ante una carga súbita, como en mangos de herramientas y en algunos artículos deportivos (Drow *et al.* 1965), como se mencionó anteriormente, la madera balsa se le han encontrado aplicaciones exclusivas para la elaboración de paneles end-grain y uso en el que no necesariamente requieren madera con altos valores de tenacidad.

IX.1 Volumen maderable a los tres años de crecimiento

De acuerdo con los resultados de la estimación obtenida a la edad de aprovechamiento recomendada, se sugiere que la producción de madera será *baja* en las dos variedades de *O. pyramidale* de la parcela de Frontera Corozal; sin embargo, la variedad *bicolor* desarrolla un volumen anual superior al reportado (17

m³/ha⁻¹/año⁻¹), pero es importante mencionar que hay 11 árboles más que en la variedad *typica*, lo que significa mayor producción de madera.

Este resultado se relaciona con el escaso manejo que se realizó en la parcela. Según Douterlungne *et al.* (2005) las plantas trasplantadas pueden competir y sobrevivir al lado de las arvenses en parcelas sin escardas, pero su crecimiento resulta raquítico en diámetro y en altura, así como en la producción de hojas. La presencia de estas plantas retrasa el crecimiento de los árboles debido a la competencia de las raíces, mayor incidencia de plagas y enfermedades.

X. Conclusiones

Las características morfológicas que ayudan a reconocer a la variedad *bicolor* no son un factor de diferencias significativas en las propiedades físicas y mecánicas de su madera. Tropicos (2018) y Plant list (2013) reconocen a las dos variedades de madera balsa como *sinonimias*. No obstante, los resultados de la caracterización mecánica de su madera en condición seca con material proveniente de Lacanjá Chansayab, se consideran dentro del intervalo de valores requeridos para la madera balsa comercializada en México.

Pese a la extremada ligereza de la madera balsa, se reconoció su capacidad de absorción de energía, propiedades físicas y de resistencia mecánica, que cuales resultan adecuados para la elaboración de paneles end-grain (bloques encolados y cortados en finas tiras).

Finalmente, la cuantificación realizada para evaluar el potencial de la producción de madera para las variedades de *O. pyramidale* en la parcela de Frontera Corozal, nos permite asegurar que será baja a la edad de aprovechamiento comercial (5 o 6 años).

XI. Recomendaciones

Se recomienda probar diferentes protocolos para el aserrado y de secado para la madera balsa.

Durante el aserrado de la madera recién derribada es recomendable que la sierra contenga dientes grandes y bien afilados, para evitar que se desperdicie madera y cortes inexactos.

Es importante realizar estudios para determinar la composición celular, la capacidad térmica y de absorción de energía de la madera balsa proveniente del sureste mexicano. Gran parte de las aplicaciones de esta madera se derivan del aislamiento de sonido y de temperatura.

Se recomienda estudiar las plagas y enfermedades dentro de las parcelas demostrativas-experimentales, así como realizar comparaciones con madera balsa provenientes de otros sitios.

Es necesario realizar un estudio de mercado para determinar el ingreso de la madera balsa nacional a mercados nacionales e internacionales.

Literatura citada

AirexBaltekBanova. 2018. [Consultado 2018 ene 6]. www.airexbaltekbanova.com

[ASTM] American Society of Testing Materials. 2009. ASTM D143-09: standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM Annual Book of Standards:Part. 22, pp. 47–72.

Bárcenas-Pazos G. 1995. Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la Selva Lacandona. *Madera y Bosques* 1: 9–38.

Bárcenas-Pazos G, Dávalos Sotelo R. 1999. Importancia de la lignina en las contracciones de la madera: revisión bibliográfica. *Madera y Bosques* 5:13–26.

Barragán Moncayo. D. 2008. Aporte y descomposición de biomasa aérea en asociaciones agroforestales y su influencia en los cultivos de cacao y café. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. 85.

Barrance, A. 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Biblioteca Conmemorativa Orton IICA/CATIE.

Bodig J, Jayne BA. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 712.

Araújo, H. J. B. D. 2002. Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

- Borrega M, Ahvenainen P, Serimaa R, Gibson L. 2015. Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*). *Wood Science and Technology*. 49:403– 420.
- Borrega M, Gibson L. 2015. Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*. 84:75–90.
- Castillo Santiago M. Á. 2009. Análisis con imágenes satelitales de los recursos forestales en el Trópico Húmedo de Chiapas: un estudio de caso en Marqués de Comillas. [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. 123.
- [CEIEG] Centro de Información Estadística y Geográfica del Estado de Chiapas. 2015. Perfiles municipales 2015. [Consultado 2016 mar 3]. <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- [CONABIO] La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Especies para la reforestación. [Consultado 2018 abr 13]. <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/reforestacion/indiceEspecies.html>
- [CONAFOR] La Comisión Nacional Forestal. 2010. Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. Morelia, Michoacán.
- Contreras F. 1998. ¿Cómo determinar la tasa de crecimiento de los árboles?. BOLFOR. Ecuador. *Notas Técnicas* 2:3–4.
- Da Silva A, Kyriakides S. 2007. Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*. 44:8685–8717.

- Dávalos Sotelo R, Bárcenas-Pazos G. 1999. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición “seca”. *Madera y Bosques* 5:61–69.
- Dávalos Sotelo R, Zárata Morales R, De la Paz Pérez C. 2001. Tablas de clasificación de algunas propiedades mecánicas de maderas mexicanas en condición “verde”. *Madera y Bosques* 7:71–78.
- de Jong B, Rojas-García F, Olguín-Álvarez M, Martínez-Zurimendi P (2009). Base de datos con ecuaciones alométricas de árboles y arbustos de bosques y selvas de México. El colegio de la frontera sur unidad, Villahermosa, Tabasco, México.
- Douterlungne D, Levy-Tacher S, Perales Rivera H, Álvarez Solís D. 2005. Establecimiento de acahuales a través del manejo tradicional lacandón de *Ochroma pyramidale* Cav. *El Colegio de La Frontera Sur*. 36.
- Douterlungne D, Levy-Tacher SI, Golicher DJ, Román F. 2010. Applying Indigenous Knowledge to the Restoration of Degraded Tropical Rain Forest Clearings Dominated by Bracken Fern. *Restoration Ecology*. 18:322–329.
- Douterlungne D, Thomas E, Levy-Tacher SI. 2013. Fast-growing pioneer tree stands as a rapid and effective strategy for bracken elimination in the Neotropics. *Journal of Applied Ecology*. 50:1257–1265.
- Drow JT, Markwardt LJ, Youngquist WG. 1965. Results of impact tests to compare the pendulum impact and toughness test methods. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. US. 17.
- Dytham C. 2011. Choosing and using statics: A biologist’s guide. Tercera ed. John Wiley & Sons. 292.

- Easterling KE, Harrysson R, Gibson LJ, F. AM. 1982. On the Mechanics of Balsa and Other Woods. Royal Society of London. 383:31–41.
- Echenique-Manrique R. 1970. Descripción, características y usos de 25 maderas tropicales mexicanas. Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, México. 237.
- Echenique-Manrique R, Barajas Morales J, Pinzón Picaseño LM, Pérez Morales V. 1975. Estudio botánico y ecológico de la región del Río Uxpanapa, Veracruz N. 1, Características Tecnológicas de la madera de diez especies: 66.
- Echenique-Manrique R, Robles Fernández F. 1993. Ciencia y tecnología de la Madera I. Primera ed. México: Universidad Veracruzana.
- Ecuadorforestal. 2010. [Consultado 2018 abr 01]. <http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/08/PACHACO.pdf>.
- Evans J, Turnbull JW. 2004. Plantation forestry in the Tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes. Tercera ed. Oxford University Press. UK. 480.
- Fernández Tovar UL. 2012. Efecto de la fertilización sobre el crecimiento de la balsa *Ochroma pyramidale* Cav. en la hacienda Mira, Cantón Buena Fé, Provincia Los Ríos. [Tesis de licenciatura] Universidad Técnica Estatal de Quevedo. 45.
- Fletcher MI. 1951. Balsa: Production and Utilization. Economic Botany. 5:107–125.
- Flinta CM. 1960. Prácticas de plantación forestal en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. 500.

- Francis J, Lowe C. 2000. Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales. Silvics of Native and Exotic Trees of Puerto Rico and the Caribbean Islands. Puerto Rico. 582.
- Fritz Durán A, Berdichewsky Aranda K. 2004. Manual la construcción de viviendas en madera. Santiago, Chile. Santiago: CORMA. 643.
- Fuentes Salinas M. 1988. Apuntes para el curso de tecnología de la madera I. Texcoco, México: Universidad Autónoma de Chapingo. 97.
- Fuentes Salinas M. 1998. Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 4:221–229.
- Gibson L, Ashby M. 1997. Cellular solids: structure and properties. 2nd ed. Cambridge, editor. New York: Cambridge University. 510.
- Givnish, Thomas J. 1978. On the adaptive significance of compound leaves, with particular reference to tropical trees. En: Tropical trees as living systems: Proceedings of the Fourth Cabot Symposium. Cambridge University. 351-380.
- González K. 2016. Germinación, crecimiento y densidad de la madera en dos variedades de *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. de la Selva Lacandona, Chiapas. [Tesis de Maestría]. El colegio de la Frontera Sur. 46
- Hallé F, Oldeman RAA, Tomlinson PB. 2012. Tropical trees and forests, an architectural analysis. New York, EUA: Springer Science & Business Media. 429.

Honorato Salazar JA, Fuentes López ME. 2001. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encinos del estado de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 26:5–28.

Hueck K. 1961. *The forests of Venezuela*. Verlag Paul Parey. 106.

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015. Principales resultados del Censo de Población y vivienda. [Consultado 2016 mar 3]. <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/>

Játiva-Banquero EF. 2017. Análisis de la cadena de valor de la madera de balsa: El caso de la provincia de Esmeraldas, Ecuador. En: XXII Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática. Ciudad de México: UNAM. 9.

Honorato Salazar JA, Apolinar Hidalgo F, Aburto J. 2015. Principales componentes químicos de la madera de *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma pyramidale*. *Madera y Bosques* 21:131–146.

Kammesheidt L. 2000. Comparative study on the drainage requirements and growth pattern of three neotropical pioneer species. *Journal of Tropical Forest Science*. 12:761–770.

Kotlarewski NJ, Belleville B, Gusamo BK, Ozarska B. 2016. Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 74:83–89.

Kretschmann DE. 2010. Mechanical Properties of Wood. En: *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. US: Centennial. Madison, Wisconsin.. 509.

- Levy-Tacher SI. 2000. Sucesión causada por roza-tumba-quema en las selvas de Lacanhá, Chiapas. [Tesis de Doctorado] Colegio de Posgraduados. 165.
- Levy-Tacher SI, Duncan Golicher J. 2004. How predictive is traditional ecological knowledge? The case of the Lacandon Maya fallow enrichment system. *Interciencia* 29:496–503.
- Levy-Tacher SI, Rivera JR. 2005. Successional pathways derived from different vegetation use Patterns by Lacandon Mayan Indians. *Journal of Sustainable Agriculture*. 26: 49–82.
- Levy-Tacher S.I, Neptalí Ramírez-Marcial, Mario González Espinoza y Francisco Román Dañobeitia. 2012. Rehabilitación ecológica de áreas agropecuarias degradadas en la Selva Lacandona: una alternativa fincada en el conocimiento ecológico tradicional maya. *La Otra Innovación para el Ambiente y la Sociedad en la Frontera Sur de México*. 10.
- Levy-Tacher, S. I., Aguirre Rivera, J. R., Vleut I., Román Dañobeitya F., Perales Rivera, H., González-Espinosa M., Zúñiga Morales J., Domínguez Álvarez A., Caso Chávez M., Herrera Gloria J. M., Ramírez-Marcial N., Heins K., Pignataro G., Sánchez Gonzáles A., Macario Mendoza P. 2016. Experiencias y perspectivas para la rehabilitación ecológica en las zonas de amortiguamiento de las áreas naturales protegidas Montes Azules y Calakmul. En: *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. UNAM-CRIM-UAEM-CONABIO, Cuernavaca, Morelos, México. P. 295-320
- Longwood F. 1962. Present and potential commercial timbers of the Caribbean with special reference to the West Indies, the Guianas, and British Honduras. United States Department of Agriculture Forest Service, editor. Madison, Wisconsin. 167

- Longwood, F. 1971. Present and Potential: Commercial Timbers of The Caribbean. Washington, D.C. U.S. Department of Agriculture. 162.
- Mapasanta M. EN. 2015. Efecto del raleo, sobre el crecimiento de balsa (*Ochroma pyramidale* Cav. *Ex Lam.*), plantada en cinco densidades poblacionales. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de las Fuerzas Armadas. 62.
- Midgley S, Blyth M, Howcroft N, Midgley D, Brown A. 2010. Balsa: biology, production and economics in Papua New Guinea. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. 98.
- Mohammadi MS, Nairn JA. 2013. Crack propagation and fracture toughness of solid balsa used for cores of sandwich composites. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 16:22–41.
- Moncayo Galárraga GA. 2017. Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera balsa (*Ochroma pyramidale*) ecuatoriana. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de las Fuerzas Armadas. 100.
- Nutsch W. 1996. Tecnología de la madera y del mueble. primera ed. Bueno JC, editor. España: Reverté. 485.
- Osei-Antwi M, De Castro J, Vassilopoulos AP, Keller T. 2013. Shear mechanical characterization of balsa wood as core material of composite sandwich panels. *Construction and Building Materials*. 41:231–238.
- Paillacho Cedeño CD. 2010. Evaluación del crecimiento inicial de *Eucalyptus urograndis*, *Gmelina arborea* Roxb y *Ochroma pyramidale* Cav bajo la aplicación de cuatro dosis de potasio en la hacienda Zoila Luz del cantón Santo Domingo. [Tesis de Licenciatura]. Santo Domingo, Ecuador. 130.

- Panshin AJ, Zeeuw CD. 1980. Textbook of wood technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. Cuarta ed. McGraw-Hill, editor. Nueva York: McGraw-Hill Book Co. 643
- Parra P. 2016. La balsa, la apuesta del sector maderero. Ecuador. Revista Gestión: 3. 42-44.
- Pennington TD, Sarukhán J. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Tercera ed. México: UNAM, Fondo de Cultura Económica. 511.
- PROECUADOR. 2013. [consultado 2018 feb 12]. <http://www.proecuador.gob.ec/exportadores/sectores/madera/>
- Rzedowski J. 1988. Bosque tropical perennifolio. En: Vegetación de México. Cuarta ed. México, DF.: Editorial Limusa S. A. de C. V. 397.
- Román Dañobeytia, F., Levy Tacher, S., Perales Rivera, H., Ramírez Marcial, N., Douterlungne, D., & López Mendoza, S. 2007. Establecimiento de seis especies arbóreas nativas en un pastizal degradado en la selva lacandona, Chiapas, México. Journal of Applied Ecology Ecología Aplicada, 6: 1-8.
- Da Silva A, Kyriakides S. 2007. Compressive response and failure of balsa wood. Int. J. Solids Struct. 44: 8685–8717.
- Silva Guzmán JA. 2008. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Coordinación, Educación y Desarrollo Tecnológico. Conafor. Tomo I. Zapopan, Jalisco.

- Silva Guzmán JA. 2008. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Coordinación, Educación y Desarrollo Tecnológico. Conafor. Tomo II. Zapopan, Jalisco.
- Sotomayor Castellanos JR. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 1:1–24.
- Standley P, Steyermark J. 1949. Flora of Guatemala. En: Williams TP, Gentry J, Williams P, editores. Flora of Guatemala. Chicago: Chicago Natural History Museum. p. 601.
- Stewart A, Martin F, Diemont W. 2009. Lacandon Maya ecosystem management: sustainable design for subsistence and environmental restoration. *Ecological Engineering*. 19:254–266.
- The Plant List, A working list of all plant species. 2013. [Consultado 2018 junio 18]. <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/search?q=ochroma+pyramidal%2B>
- TROPICOS. 2018. [Consultado 2018 junio 18]. <http://www.tropicos.org/NameSearch.aspx?name=Ochroma+pyramidale&commonname=&langid=66>
- Vargas J. 1987. Manual del técnico forestal. Anatomía y tecnología de la madera. Cochabamba. Universidad Mayor de San Simón. 119.
- Vignote Peña S, Martínez Rojas I. 2005. Tecnología de la madera. Tercera ed. España: Mundi-Prensa Libros S.A. 678.
- Vleut I, Levy-Tacher SI, de Boer WF, Galindo-González J, Ramírez-Marcial N. 2013. Can a fast-growing early-successional tree (*Ochroma pyramidale*,

Malvaceae) accelerate forest succession? *Journal of Tropical Ecology*. 29: 173–180.

Whitmore TC, Wooi-Khoon G. 1983. Growth analysis of the seedlings of balsa, *Ochroma lagopus*. *New Phytol.* 95: 305–311.

Anexos

Anexo 1. Características fenológicas entre las dos variedades de *O. pyramidale* de Lacanjá Chansayab.

Atributos	Características	
	<i>O. pyramidale</i> var. <i>típica</i>	<i>O. pyramidale</i> var. <i>bicolor</i>
Ciclo de vida	< 15 años	>15 años
Altura total	< 20 m	>20 m
Forma del tallo	Curvado	Recto
Diámetro a la altura de pecho (DAP)	< 70 cm	Hasta 160 cm
Forma de la copa	Irregular	Redonda
Pubescencia de las hojas	Escasa	Abundante
Pecíolo	Rojo y corto (10-30 cm)	Blanco y largo (20-35 cm)
Época de floración	Febrero-Abril	Diciembre-Febrero
Flores	Grandes, color blanco a beige 20-25 cm	Pequeñas, color blanco 10-20 cm
Frutos	Grandes, color café, menor pubescencia, muchas semillas 20-25 cm	Pequeños, color café claro, muy pubescentes, pocas semillas 10-20 cm
Semillas	Pequeñas, color café Tamaño de 1-2 mm Peso promedio de 5.9 mg	Grandes, color café claro Tamaño de 1-3 mm Peso promedio de 7.1 mg
Sitio de crecimiento	Vegetación secundaria	Vegetación madura

Chankin, Adolfo y Levy-Tacher com. pers; observación directa.

Anexo 2. Clasificación de la densidad básica (Pa/Vv)

Densidad básica	Clasificación
< 0.20	Extremadamente livianas
0.20 - 0.25	Excesivamente livianas
0.25 - 0.30	Muy livianas
0.30 - 0.36	Livianas
0.36 - 0.42	Moderadamente livianas
0.42 - 0.50	Moderadamente pesadas
0.50 - 0.60	Pesadas
0.60 - 0.72	Muy pesadas
0.72 - 0.86	Excesivamente pesadas
> 0.86	Extremadamente pesadas

Fuente: Fuentes-Salinas (1988)

Anexo 3. Segregación en tres clases de densidad (kg/m³) de madera de balsa

Densidad (kg/m ³)	Clasificación
80 - 120	Baja
120 - 180	Media
180 - 220	Alta

Fuente: Migley et al. (2010)

Anexo 4: clasificación para rangos de velocidad de secado

Tiempo (días)	Clasificación
≤90	Rápido
90 - 150	Moderadamente Rápido
151- 200	Moderadamente Lento
≥ 200	Lento

Fuente: Bárcenas-Pazos (1995)

Anexo 5. Clasificación de las contracciones en la madera según su intensidad (%)

Grado	Tangencial		Radial		Volumétrica	
	Tv - To	Tv - T ₁₂	Rv - Ro	Rv - R ₁₂	Vv - Vo	Tv - T ₁₂
Muy baja	3.5	2.5	2	1	7.5	4.1
Baja	3.6 - 5	2.6 - 4	2.1 - 3	1.1 - 2.1	7.6 - 10	4.2 - 5.6
Mediana	5.1 - 6.5	4.1 - 5.5	3.1 - 4.0	2.1 - 3.0	10.1 - 15	5.7 - 8.5
Alta	6.6 - 8.8	5.6 - 7.0	4.1 - 5.0	3.1 - 4.0	15.1 - 19	8.6 - 10.8
Muy alta	8.1	7.1	5.1	4.1	19.1	10.9

Tv, Rv, Vv: dimensiones en estado verde (≥ 30 % CH),

To, Ro, Vo: dimensiones en estado anhidro (0 % CH),

T₁₂, R₁₂, V₁₂: dimensiones al 12 % de CH,

Fuente: Fuentes-Salinas (1988).

Anexo 6. Clasificación de la relación de anisotropía (A) en la madera, según su intensidad

Grado	Valores	Fórmula
Baja	< 1.70	$A = \frac{B \text{ tangencial total}}{B \text{ radial total}}$
Alta	1.71 - 2.30	
Muy alta	> 2.30	

Fuente: Fuentes-Salinas (1988)

Anexo 7. Clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas (libre de defectos) en condición secada al aire (CH=12%)

Ensayo	Propiedades	Clasificación				
		Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
FLEXION	Módulo de Ruptura (Mpa)	< 53.94	54.03 - 78.45	78.55-98.07	98.16-127.49	> 127.49
	Módulo de Elasticidad (Mpa)	< 7354.99	7453.05-10296.98	10395.05-12258.31	12356.38-14709.98	> 14709.98
COMPRESION	PARALELA (E. Máx.) (Mpa)	< 31.87	31.97-44.13	44.23-51.98	52.07-63.74	> 63.74
	PERP. (E. Lím. Prop.) (Mpa)	< 3.43	3.53-6.37	6.47-8.33	8.43-12.26	> 12.26
CORTANTE	Esf. Máx. (Mpa)	< 4.90	5-8.83	8.92-11.77	11.87-16.18	> 16.18
DUREZA	Lateral (N)	< 1471	1480.8-3432.33	3442.13-5393.66	5403.46-8825.98	> 8825.98
	Extremos (N)	< 1569.06	1578.87-3922.66	3932.47-6129.16	6129.16-10296.98	> 10296.98

Fuente: Dávalos-Sotelo y Bárcenas-Pazos (1999)

Anexo 8. tabla de relación años de edad - rendimiento

Años	Rendimiento	Comentarios
5 - 6	Alto	Volumen de producción: 125 a 200 m ³ /ha ⁻¹ /año ⁻¹
7 - 8	Medio	Duramen saturado de agua
12 - 15	Pobre	Deterioro inmediato
20 - 30	Nulo	Muy pocos sobreviven hasta esta edad

Fuente: Jaramillo Romero (2014)

Anexo 9. Cuadro de comparación de propiedades físicas de madera de balsa de origen internacional

Ensayo	Propiedad	Madera proveniente de			Revisión de literatura		UM
		Chiapas (2018). <i>Typica</i>	<i>Bicolor</i>	Da Silva y Kyriakides (2007)	Kretschmann (2010)	Echenique-Manrique <i>et al.</i> (1975)	
		Media					
DB o DBr	Densidad básica relativa	0.156	0.152	0.027 -0.26	*	0.5 - 0.26	
CC	Tangencial	6.08	7.17	*	7.6	6.6 - 7.6	%
	Radial	2.27	2.74	*	3.00	2.9 - 3.0	
	Longitudinal	1.16	1.13	*		0.26 - 0.47	
	Volumétrica	10.44	11.68	*	10.8	10.4 - 10.8	
	Procedencia:	Chiapas, México		Sin especificar	América	Veracruz, México	
	Metodología:	Norma ASTM D143-09			No especifica	No especifica	

DB: densidad básica, DBr: densidad básica relativa, CC: contracciones, *: propiedades no reportadas

Anexo 10. Cuadro de comparación de propiedades mecánicas de madera de balsa de origen internacional

Ensayo	Propiedad	Madera					Revisión de literatura Echenique-Manrique et al. (1975)	UM
		proveniente de Chiapas (2018). <i>Typica Bicolor</i>	Moncayo (2017)	Kotlarewski et. al (2016)	Kretschmann (2010)	Media		
CP	$f_{C_{lp}}$	12.49	12.1	*	*	*	6.18 - 6.28	Mpa
	$f_{C_{máx}}$	15.01	13.9	9.88	9.24	14.9	8.63 - 25.70	
	E	3156	2785	*	*	*	*	Gpa
CB	$f_{C_{lp}}$	0.85	0.60	0.61	*	*	*	
	$f_{C_{2.5}}$	1.57	1.41	0.89	1.14	*	*	MPa
VR	$f_{C_{máx}}$	2.12	1.6	1.00	1.90	2.1	1.67 - 3.24	
DJ	DE	926	819	*	426.17	*	745 - 961	N
	DL	527	391	*	307	*	353 - 666	
FE	$f_{C_{lp}}$	15.51	17.1	*	*	*	8.14 - 20.89	
	MOR	19.43	21	15.09	16.63	21.6	*	
	MOE	3089	3568	1929	2037	3400	2941 - 6080	Mpa
	Tu_{lp}	4.81	5.07	*	*	*	*	
	$Tu_{Pmáx}$	12.69	11.9	*	*	*	*	
IT	T	0.73	0.54	*	*	*	*	J/cm ³
	Tu	0.007	0.004	*	*	*	*	kg-cm/cm ³
Procedencia:		Chiapas, México	Ecuador	Papúa Nueva Guinea	EUA	Veracruz, México		
Metodología:		Norma ASTM D143-09			Norma ASTM D143			

Condición: Seca ($\leq 12\%$ de contenido de humedad)

CP= compresión paralela, CB= compresión perpendicular, VR= cortante paralelo a la fibra, FE= flexión estática, DJ= dureza Janka, IT= importacto por tenacidad, SD= desviación estándar, $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad (MPa), $f_{C_{máx}}$ = esfuerzo máximo (MPa), E= módulo de elasticidad (GPa), $f_{C_{lp}}$ = esfuerzo en el límite de proporcionalidad (MPa), $f_{C_{2.5}}$ =esfuerzo a 2,5 mm de compresión (MPa), $f_{C_{máx}}$ = esfuerzo máximo (MPa), MOR= módulo de ruptura (MPa), MOE= módulo de elasticidad (MPa), Tu_{lp} = trabajo en el límite de proporcionalidad (kJ/m³), $Tu_{Pmáx}$ = trabajo en el esfuerzo máximo (kJ/m³), DE= dureza en los extremos (N), DL= dureza lateral (N), T= Tenacidad (J/cm³), Tu= Trabajo unitario (J/cm³), UM= Unidades de medida, MPa= MegaPascales, GPa= GigaPascales, kJ= KiloJoules, m³= metro cúbico, N= Newton, kg-cm/cm³.

*Propiedades no reportadas.

Anexo 11. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México

Ensayo	Propiedad	Intervalos	UM
Propiedades físicas			
Densidad	Densidad	~ 800	kg/m ³
	Densidad al 12-15 % de CH	0.45 - 0.54 - 0.63	gr/cm ³
Total			
Contracciones	radial	1.8 - 3.0	%
	tangencial	3.5 - 5.4	
Estabilidad dimensional		Buena a regular	
Propiedades mecánicas al 12-15% de CH			
Compresión paralela	f _{máx}	9 -15- 27	Mpa
Flexión estática	MOR	15 -24 -39	Mpa
	MOE	2200 – 4400 - 6000	Mpa
Resistencia al impacto	T	0.2 - 0.4	J/cm ³
Cortante	f _{máx}	1 – 2.3	Mpa
Dureza Janka	Dureza lateral	500 - 1000	Mpa

CH: contenido de humedad, f_{máx}: esfuerzo máximo, MOR: módulo de ruptura, MOE: módulo de elasticidad, T: tenacidad

Fuente: Silva (2008)

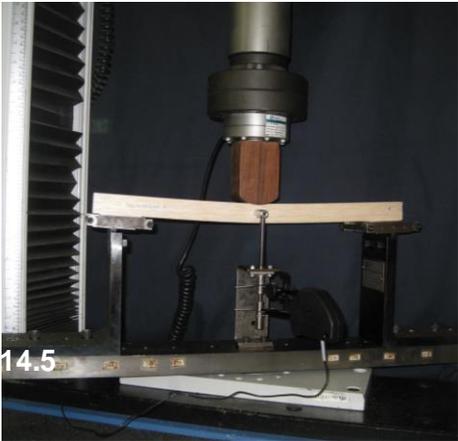
Anexo 12. Rolletes de cada árbol. 1 al 5 var. *typica*, 6 al 10 var.



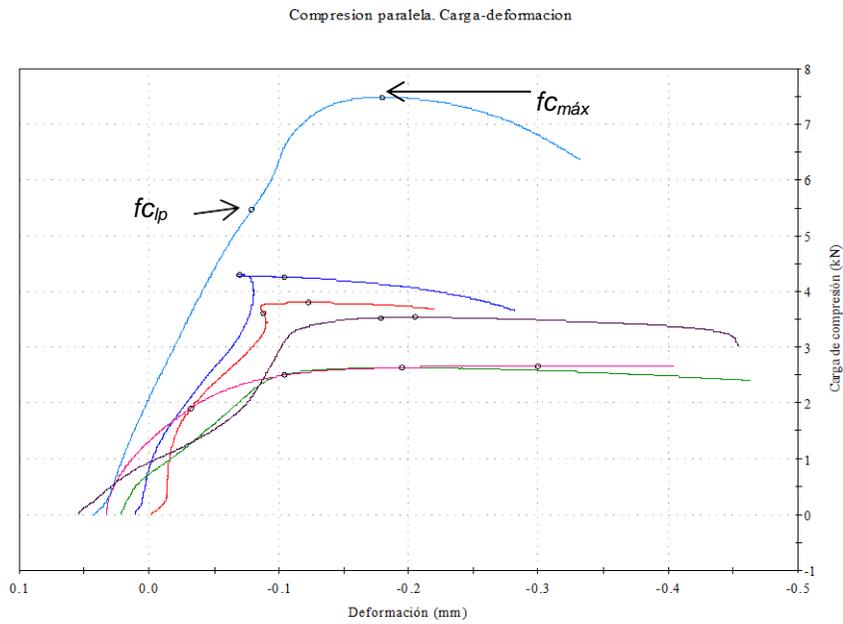
Anexo 13. Preparación y selección de material



Anexo 14. Realización de ensayos mecánicos



Anexo 15. Absorción de energía, curva carga-deformación



Anexo 16. Rigidez, curva carga-deformación

