



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LA MADERA DE Balsa (*Ochroma
pyramidale*) ECUATORIANA**

AUTOR:

Moncayo Galárraga Germán Andrés

DIRECTOR:

Ing. Narváez Muñoz Christian Patricio, MPhil.

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE Balsa (*Ochroma pyramidale*) ECUATORIANA” realizado por el señor GERMÁN ANDRÉS MONCAYO GALÁRRAGA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor GERMÁN ANDRÉS MONCAYO GALÁRRAGA para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 14 de junio de 2017

Atentamente,



Ing. Christian Patricio Narvárez Muñoz, MSc.
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo GERMÁN ANDRÉS MONCAYO GALÁRRAGA, con cédula de identidad N° 1717554008, declaro que este trabajo de titulación “CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE Balsa (*Ochroma pyramidale*) ECUATORIANA” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 14 de junio de 2017



Sr. Germán Andrés Moncayo Galárraga

CI: 1717554008



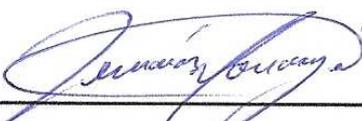
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, GERMÁN ANDRÉS MONCAYO GALÁRRAGA, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE Balsa (*OCHROMA PYRAMIDALE*) ECUATORIANA” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 14 de junio de 2017



Sr. Germán Andrés Moncayo Galárraga

CI: 1717554008

DEDICATORIA

Por darme la vida y enseñarme cada cosa que ha forjado mi personalidad, por enseñarme incansablemente a luchar día a día con mentalidad ganadora, este trabajo es dedicado a mis padres Germán y María de Lourdes cuyo amor es el más grande por sobre todas las cosas, demostrándome que el verdadero amor es aquel que está en los actos y no en las palabras, por levantarme en esos días que me sentía derrotado y por confiar en mí cuando nadie más lo hacía. A mis hermanos quienes siempre están presentes en mi corazón y son quienes me motivan a seguir adelante para poder apoyarlos cada día de mi vida hasta cuando deje de existir. A mis familiares quienes me mostraron su total apoyo previo a la realización y culminación de este trabajo. A mi novia María José Mier quien es un gran ejemplo como persona y profesional y quien me ha enseñado que si Dios está de mi lado nada es imposible, por caminar siempre conmigo y darme su apoyo y amor incondicional en todos estos años.

Germán A. Moncayo G.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, padre y hermanos por todo el amor que me han brindado a lo largo de mi vida, y por todo el apoyo mostrado a lo largo de la realización de este proyecto porque estando lejos de casa los he podido sentir muy cerca con cada conversación por teléfono diariamente.

Al Ing. Cristóbal Barba y al Ing. Marcelino Guachambala quienes me supieron brindar su ayuda cuando más lo necesitaba, y por abrirme las puertas del conocimiento a un mundo que hasta hace poco para mí era desconocido.

Al Ing. Christian Narváez por su paciencia e invaluable guía y apoyo mostrado a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Germán A. Moncayo G.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Definición del problema	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Justificación e importancia.....	5
1.6. Alcance.....	6
CAPÍTULO II.....	8
ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. Descripción de la especie	8
2.2. La madera de balsa	9

2.3.	Requisitos físicos de la balsa.....	10
2.3.1.	Clima	10
2.3.2.	Topografía.....	10
2.3.3.	Suelos	10
2.4.	Distribución natural	11
2.5.	Explotación forestal	13
2.6.	Secado.....	13
2.7.	Propiedades de trabajo.....	14
2.8.	Durabilidad.....	14
2.9.	Aplicaciones.....	14
2.10.	Estructura y función de la madera	19
2.10.1.	Estructura macroscópica.....	19
2.10.2.	Maderas blandas y maderas duras.....	21
2.10.3.	Sistemas axiales y radiales.....	22
2.10.4.	Planos de sección.....	23
2.10.5.	Estructura microscópica.....	24
2.11.	Relaciones de humedad y propiedades físicas de la madera	27
2.11.1.	Relaciones Madera-Humedad	28
2.12.	Propiedades mecánicas de la madera	33
2.12.1.	Propiedades elásticas.....	34
2.12.2.	Propiedades de resistencia comunes	36
2.13.	Defectos en la madera de balsa	39
CAPÍTULO III.....		41
DISEÑO EXPERIMENTAL.....		41
3.1.	Introducción	41
3.2.	Flexión estática.....	45

3.2.1. Materiales y Equipos	46
3.2.2. Procedimiento	46
3.2.3. Cálculos	48
3.3. Compresión paralela a la fibra	49
3.3.1. Materiales y Equipos	49
3.3.2. Procedimiento	50
3.3.3. Cálculos	51
3.4. Compresión perpendicular a la fibra	51
3.4.1. Materiales y Equipos	52
3.4.2. Procedimiento	53
3.4.3. Cálculos	53
3.5. Cizalla paralela a la fibra.....	53
3.5.3. Cálculos	55
CAPÍTULO IV.....	56
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
4.1. Flexión estática.....	56
4.1.1. Análisis de varianza	61
4.2. Compresión paralela a la fibra	64
4.2.1. Análisis de varianza	67
4.3. Compresión perpendicular a la fibra	68
4.3.1. Análisis de varianza	72
4.4. Cizalla paralela a la fibra.....	73
4.4.1. Análisis de varianza	75
CAPÍTULO V.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
6.1. Conclusiones	78

6.2. Recomendaciones	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Espesor de capas de pared celular en fibras de madera de balsa de diferentes densidades	26
Tabla 2: Valores de contracción de la madera de balsa	31
Tabla 3: Expresiones de peso específico y densidad en madera	33
Tabla 4: Relaciones elásticas para la madera de balsa con un contenido de humedad de 12%	35
Tabla 5: Resultados de MOE para las distintas clases de densidad.....	59
Tabla 6: Resultados de MOR para las distintas clases de densidad	60
Tabla 7: Resumen e intervalos de confianza de 95% para MOE.....	62
Tabla 8: Resumen e intervalos de confianza de 95% para MOR.....	63
Tabla 9: Análisis de varianza para MOE con $\alpha = 0,05$	63
Tabla 10: Análisis de varianza para MOR con $\alpha = 0,05$	64
Tabla 11: Resultados de resistencia a la compresión paralela a la fibra para las distintas clases de densidad.....	66
Tabla 12: Resumen e intervalos de confianza de 95% para R.C. Paralela.....	67
Tabla 13: Análisis de varianza para resistencia a la compresión paralela a la fibra con $\alpha = 0,05$	67
Tabla 14: Resultados de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra para distintas clases de densidad	70
Tabla 15: Resultados de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5 mm de compresión para las distintas clases de densidad	71
Tabla 16: Resumen e intervalos de confianza de 95% para R.C. Perpendicular a la fibra	72
Tabla 17: Análisis de varianza para resistencia a la compresión perpendicular a la fibra con $\alpha = 0,05$	72
Tabla 18: Resultados de resistencia a la cizalla paralela a la fibra para las distintas clases de densidad	74
Tabla 19: Resumen e intervalos de confianza de 95% para R. Cizalla paralela a la fibra.....	75

Tabla 20: Análisis de varianza para resistencia a la cizalla paralela a la fibra con $\alpha = 0,05$	76
Tabla 21: Resumen de resultados	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Microestructura idealizada de la madera de balsa.....	2
Figura 2: Esquema de una estructura tipo sándwich	3
Figura 3: Fruto de árbol de balsa	9
Figura 4: Distribución natural de la balsa.....	11
Figura 5: Principales áreas de producción de balsa de Ecuador	12
Figura 6: Paneles de balsa end grain flexibles.....	15
Figura 7: Ejemplos de productos que incorporan balsa	18
Figura 8: Vista macroscópica de la sección transversal de un árbol.....	19
Figura 9: A) Forma general de un árbol de madera suave. B) Forma general de un árbol de madera dura. C) Sección transversal de una madera blanda; los espacios redondos en blanco son canales de resina. D) Sección transversal de una madera dura; las estructuras blancas redondas son vasos o poros.....	22
Figura 10: Planos de sección tangencial y radial de un tronco	24
Figura 11: Estructura simplificada de la microestructura de la pared celular de la madera.....	25
Figura 12: Micrografía de una sección transversal del tronco de árbol de balsa en la que se muestra la sección transversal de las fibras, rayos y vasos	27
Figura 13: Equilibrio del contenido de humedad de la madera en función de la humedad relativa y la temperatura	29
Figura 14: Contracción y distorsión característica de piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento.....	31
Figura 15: Curva típica de contenido de humedad Vs contracción.....	32
Figura 16: Ejes principales de la madera con respecto a la dirección del grano y anillos de crecimiento.....	34
Figura 17: Máquina y probeta de ensayo de flexión estática	36
Figura 18: Máquina y probeta de ensayo de compresión paralela al grano.	37

Figura 19: Máquina y probeta de ensayo de compresión perpendicular al grano	38
Figura 20: Máquina y probeta de ensayo de corte paralelo al grano	38
Figura 21: (A) Corazón de agua en tronco, (B) Nudo en probeta	40
Figura 22: Selección y marcado de árbol previamente al apeo	41
Figura 23: Aplicación de emulsión de parafina en los extremos libres al aire	42
Figura 24: A) Secado al aire. B) Secado al horno.....	42
Figura 25: Esquema de corte.....	43
Figura 26: Temperatura y humedad relativa en el laboratorio de Resistencia de Materiales	44
Figura 27: Secado de probetas a 103 °C durante 24 horas.....	45
Figura 28: Dimensiones de probeta para ensayo de flexión estática.....	46
Figura 29: Probetas para ensayo de flexión estática	46
Figura 30: Calibración de celda de carga del equipo a 2500N	47
Figura 31: Ensayo de flexión en máquina de ensayos universales MTS TK/T5002	48
Figura 32: Dimensiones de probeta para ensayo de compresión paralela a la fibra	49
Figura 33: Máquina de ensayos universales AMSLER.....	50
Figura 34: Probeta de ensayo de compresión paralela: (A) antes y (B) después del ensayo	51
Figura 35: Dimensiones de probeta para ensayo de compresión perpendicular a la fibra.....	52
Figura 36: Probetas para ensayo de compresión perpendicular a la fibra ...	52
Figura 37: Dimensiones de probeta para ensayo de cizalla paralela a la fibra	54
Figura 38: Ensayo de cizalla paralela a la fibra.....	54
Figura 39: Probetas para ensayo de cizalla paralela a la fibra	55
Figura 40: Histograma de frecuencias de %CH en flexión estática	56
Figura 41: MOE vs Densidad.....	57
Figura 42: MOR vs Densidad.....	57

Figura 43: MOR vs MOE.....	58
Figura 44: MOR y MOE en probetas de distintas densidades	59
Figura 45: MOE según distintos autores.....	61
Figura 46: MOR según distintos autores.....	61
Figura 47: Intervalos de confianza al 95% para MOE.....	62
Figura 48: Intervalos de confianza al 95% para MOR.....	63
Figura 49: Histograma de frecuencias de %CH en compresión paralela a la fibra	64
Figura 50: Resistencia a la compresión paralela a la fibra vs Densidad	65
Figura 51: Resistencia a la compresión paralela a la fibra según distintos autores	66
Figura 52: Intervalos de confianza al 95% para R.C. Paralela a la fibra	67
Figura 53: Histograma de frecuencias de %CH en compresión perpendicular a la fibra.....	68
Figura 54: Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra vs Densidad.....	69
Figura 55: R.C. Perpendicular a la fibra en probetas de distintas densidades.....	69
Figura 56: Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5mm de compresión según distintos autores.....	71
Figura 57: Intervalos de confianza al 95% para R.C. Perpendicular a la fibra	72
Figura 58: Histograma de frecuencias de %CH en cizalla paralela a la fibra	73
Figura 59: Resistencia a la cizalla paralela a la fibra vs Densidad.....	74
Figura 60: Resistencia a la cizalla paralela a la fibra según distintos autores	75
Figura 61: Intervalos de confianza al 95% para R. Cizalla paralela a la fibra	76

RESUMEN

La madera de balsa ecuatoriana tiene una alta importancia a nivel comercial debido a su peso ligero y sus propiedades mecánicas únicas. A lo largo del tiempo el uso de este material natural ha aumentado considerablemente para ser empleado como núcleo en estructuras tipo sándwich, que se utilizan en la fabricación de aviones, aspas de aerogeneradores, y otros tipos de estructuras ligeras. En el presente trabajo se realizó un estudio experimental con el fin de determinar las propiedades mecánicas de dicho material de acuerdo a la norma ASTM D143 por lo que se llevaron a cabo ensayos que evalúan las propiedades tales como: MOE, MOR, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y resistencia a la cizalla paralela a la fibra, sobre muestras secas con un contenido de humedad aproximado de 12%, las muestras utilizadas fueron clasificadas en las tres clases de densidad internacional: baja (80–120 kg/m³), media (120–180 kg/m³) y alta (180–220 kg/m³). Además de determinar valores promedio para cada propiedad según la clase a la que pertenece, se describen modelos que relacionan las propiedades mecánicas con la densidad. Así tenemos que el MOE, MOR, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra son proporcionales con la densidad de manera lineal, mientras que la resistencia a la cizalla paralela a la fibra se comporta de manera no lineal.

PALABRAS CLAVE:

- OCHROMA PYRAMIDALE
- MADERA DE BALSA
- DENSIDAD
- PROPIEDADES MECÁNICAS

ABSTRACT

Ecuadorian balsa wood has a high commercial importance because of its light weight and unique mechanical properties. Over time the use of this natural material has increased considerably to be used as a core in sandwich structures, which are used in the manufacture of aircrafts, wind turbine blades, and other types of light structures. In the present work an experimental study was carried out in order to determine the mechanical properties of this material according to the ASTM D143 standard, so that tests were carried out evaluating the properties such as: MOE, MOR, compressive strength parallel and perpendicular to the grain, and resistance to shear parallel to the grain, on dried samples with a moisture content of approximately 12%, the samples used were classified into three classes of international density: light (80–120 kg/m³), medium (120–180 kg/m³) and heavy (180–220 kg/m³). In addition to determining average values for each property according to the class to which it belongs, models are described that relate the mechanical properties to the density. Thus we have that the MOE, MOR, parallel and perpendicular compression resistance to the grain are proportional to the density in a linear way, while the resistance to the shear parallel to the fiber behaves in a non-linear way.

KEYWORDS:

- OCHROMA PYRAMIDALE
- BALSA WOOD
- DENSITY
- MECHANICAL PROPERTIES

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La balsa (*Ochroma pyramidale*) es una de las maderas más ligeras del mundo. Su densidad varía dentro del rango de 40 – 380 kg/m^3 dependiendo de la edad y hábitat del árbol. A pesar de su baja densidad, la balsa posee excelentes propiedades mecánicas: alto módulo elástico, resistencia y capacidad de absorción de energía. Esta combinación excepcional de propiedades hace que la balsa sea uno de los materiales de núcleo preferidos en las estructuras de sándwich utilizadas, por ejemplo para palas de aerogeneradores, equipos deportivos, barcos y aviones (Borrega, Ahvenainen, Serimaa, & Gibson, 2015).

Ecuador es uno de los principales productores y exportadores de balsa, sin embargo existen muy pocas referencias en nuestro país sobre la caracterización de las propiedades mecánicas de esta madera. Es por eso que se llevó a cabo el presente proyecto de investigación, con el objetivo de realizar la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa ecuatoriana, por medio de la realización de ensayos mecánicos (según lo que indica la norma ASTM D143) que permitan determinar las propiedades mecánicas de módulo de elasticidad longitudinal (MOE), Módulo de Ruptura (MOR), resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y resistencia a la cizalla paralela a la fibra, de madera de balsa procedente de provincia de Los Ríos, ya que esta área productora abarca el 36% de la producción de balsa de todo el país, siendo así el principal foco de producción (Ministerio del Ambiente, 2010).

1.2. Antecedentes

La madera ha sido históricamente, y de hecho sigue siendo hoy en día uno de los materiales estructurales más ampliamente utilizados. Es un material natural, renovable, biodegradable y de costo relativamente bajo con

sobresaliente relación rigidez axial – peso y resistencia – peso (Gibson & Ashby, 1997). La balsa es un árbol que se cultiva principalmente en el país sudamericano de Ecuador (Da Silva & Kyriakides, 2007) y son pocos los trabajos de investigación a nivel nacional que se han realizado con el fin de determinar las propiedades mecánicas de esta madera.

El trabajo “Compressive response and failure of balsa wood” realizado por Da Silva & Kyriakides en el año 2007, determinó de manera experimental las propiedades mecánicas (elásticas e inelásticas) en las direcciones axial, radial y tangencial en función de la densidad de la madera bajo cargas a compresión. Se trabajaron con probetas cuyos rangos de densidad se encontraban entre $40 - 380 \text{ kg/m}^3$. En los ensayos realizados se pudo observar que al someter las probetas bajo compresión en la dirección axial, la mayoría de las fallas se iniciaron con un retorcimiento en el plano axial–tangencial, debido a que la microestructura de la madera de balsa está compuesta por largas y delgadas células alineadas axialmente a lo largo del tronco del árbol y dispuestas en capas circulares que constituyen los anillos de crecimiento anuales, dichas células son conocidas como traqueidas (constituyen el 80-90% del volumen del tronco), este tipo de células tienen como función principal dar soporte estructural al árbol. La sección transversal de las células tiene una forma hexagonal tipo panel de abeja como se puede apreciar en la Figura 1.

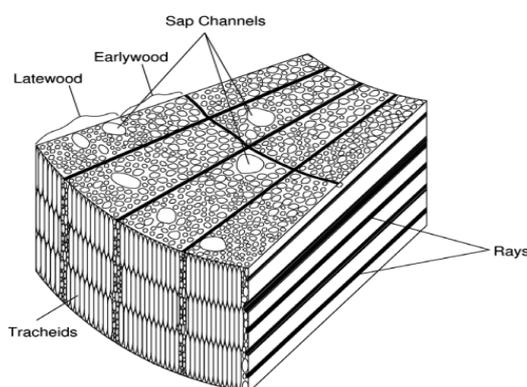


Figura 1: Microestructura idealizada de la madera de balsa

Fuente: (Da Silva & Kyriakides, 2007)

La microestructura celular de la madera de balsa incluye un volumen muy importante de espacio vacío, lo que hace que tenga una rigidez y resistencia

axial específica superior en relación a otros materiales. Exhibe además, destacadas características de absorción de energía que se derivan de su relativamente baja densidad. De hecho, puede ser el único material con absorción de energía específica similar a la de los panales metálicos hexagonales¹ de la misma densidad (Da Silva & Kyriakides, 2007).

En lo que a materiales compuestos se refiere, estas atractivas propiedades hacen que la madera de balsa sea uno de los materiales más atractivos para el uso como núcleos en estructuras tipo sándwich (estructuras formadas por la adhesión de dos caras o revestimientos relativamente delgados a un núcleo central espeso y de baja densidad), ver Figura 2, particularmente para aplicaciones marinas. Además tiene aplicaciones en otras industrias comerciales tales como: aeronáutica, transporte, energía eólica, etc.

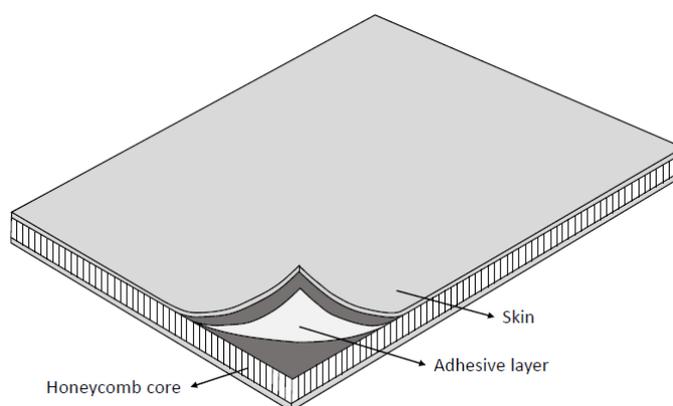


Figura 2: Esquema de una estructura tipo sándwich

Fuente: (Meruane, del Fierro, & Ortiz-Bernardin, 2014)

Otro trabajo de investigación cuyo tema es “Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood” realizado por Kotlarewski en 2016, tuvo como objetivo determinar las propiedades mecánicas de la madera de balsa proveniente de Papúa Nueva Guinea, los ensayos mecánicos se los realizó de acuerdo a la norma ASTM D143-09. Entre las pruebas que se realizaron tenemos las siguientes: flexión estática, dureza, compresión paralela y

¹ Material utilizado para paneles sándwich cuya estructura geométrica es similar al de un panal de abeja, lo que permite minimizar la cantidad de material para alcanzar un peso mínimo.

perpendicular a las fibras y corte paralelo a las fibras. El estudio de las propiedades mecánicas de la balsa de Papúa Nueva Guinea se determinaron con el fin establecer nuevas aplicaciones, mejorar la competitividad internacional y para poder diferenciar esta balsa con la de otros proveedores de balsa internacionales. (Kotlarewski, Belleville, Gusamo, & Ozarska, 2016). Según Midgley y otros (2010) citado por Kotlarewski (2016) señala además que, durante los últimos 60 años de acuerdo con las cifras de producción de 2008 Ecuador suministra el 89% de los mercados mundiales de balsa, seguido de Papúa Nueva Guinea con un 8%.

De acuerdo al Boletín de Análisis de Mercados Internacionales de Julio a Agosto de 2013, nuestro país es uno de los productores y exportadores más importantes de madera de balsa de calidad internacional. A nivel nacional la demanda es muy pequeña, solamente el 10% es utilizado para elaborar artesanías, mientras que el 90% de la producción se destina a la exportación. El Banco Central del Ecuador registra un promedio de 40 empresas exportadoras de madera de balsa (PROECUADOR, 2013).

Según González, Cervantes, Torres & Simba (2010), en su estudio titulado “Caracterización del Cultivo de Balsa en la Provincia de Los Ríos - Ecuador”, las provincias de mayor producción de madera de balsa en Ecuador son Los Ríos, Guayas, El Oro, y Santo Domingo de los Tsáchilas con más de 20 mil hectáreas de plantaciones, entre bosques naturales y reforestados.

La balsa coloniza suelos arcillosos, margosos y limosos, sin embargo no tolera los suelos de alta salinidad. Las características edafoclimáticas de la provincia de Los Ríos, hacen de este territorio, un espacio idóneo para la producción de esta especie en cuanto lo que se refiere a: crecimiento, mejores características de su madera y posición ante los mercados. (González, Cervantes, Torres, Sánchez, & Simba, 2010).

1.3. Definición del problema

La madera de balsa que se produce en el Ecuador es una de las materias primas naturales más cotizada por los mercados extranjeros para la fabricación de ciertos productos como son las estructuras de tipo sándwich y

ello se debe a las excelentes propiedades mecánicas que esta madera posee a pesar de su baja densidad.

Siendo nuestro país uno de los mayores exponentes en lo que a la exportación de madera de balsa se refiere debido a que es catalogada como una de las mejores a nivel mundial, existen pocas investigaciones sobre el estudio de las propiedades mecánicas de la misma, en la literatura existente no se especifica si los valores de dichas propiedades que se presentan en tablas de fichas técnicas son producto de una media o una máxima registrada.

A nivel nacional el consumo de esta madera se destina básicamente a la elaboración de artesanías, maquetería, etc., sin saber que esta madera puede tener distintas aplicaciones en la industria.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Realizar la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) ecuatoriana.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el valor de las propiedades mecánicas módulo de elasticidad longitudinal y módulo de ruptura, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y resistencia a la cizalla paralela a la fibra, utilizando la norma de ensayos mecánicos ASTM D143.
- Comprobar la existencia de variación de las propiedades mecánicas originadas por la diferente densidad de los especímenes de balsa estudiados.
- Hacer un análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre las diferentes clases de densidad.

1.5. Justificación e importancia

Se conoce según datos estadísticos que Ecuador exporta más del 90% de la madera de balsa a nivel mundial (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010). La razón para ello es que nuestro país debido a su ambiente,

altitud y clima ofrece una madera más estable en cuanto densidad, forma, suavidad y color se refiere. Tiene un crecimiento extremadamente rápido en relación a otros árboles, lo cual facilita su cultivo, la maduración física y económica de la balsa se alcanza entre los 4 a 5 años de edad (Euronews, 2016).

En la actualidad el nivel de investigación acerca de la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera balsa en nuestro país es escaso y la literatura existente resume las propiedades mecánicas de la balsa mediante la indicación de valores que no justifican datos cuantitativos exactos, como la densidad de una muestra, o si los valores presentados fueron resultado de una media o una máxima registrada.

Es importante destacar que las propiedades mecánicas derivadas de la presente investigación podrían ser de interés aplicativo en diferentes áreas como: marina, transporte, aeronáutica, energía eólica, lo que hace que este estudio sea necesario ya que nuestro país es uno de los principales productores y exportadores de madera de balsa a nivel mundial.

Por lo tanto, dentro del presente proyecto, el estudio planteado se centra en conocer las propiedades mecánicas de la madera de balsa que se produce en nuestro país, específicamente en la provincia de los Ríos y de esa forma convertirse en una base o referencia para la creación de nuevos materiales compuestos de estructura de sándwich así como de nuevas aplicaciones que sean de beneficio tanto para investigadores como para el desarrollo de la industria en el Ecuador. Con lo cual este proyecto se alinea al Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017, cuyo décimo objetivo establece que el Estado debe “Impulsar la transformación de la matriz productiva”.

1.6. Alcance

El presente proyecto pretende determinar las propiedades mecánicas de la madera de balsa de nuestro país, específicamente la producida en la provincia de Los Ríos. Para ello se realizarán ensayos tales como flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra y ensayo de corte

paralelo a la fibra de acuerdo a lo que se establece en la norma ASTM D143; para así determinar las propiedades mecánicas de MOE_L y MOR, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra y resistencia a la cizalladura paralela a la fibra respectivamente. Antes de realizar cada uno de los ensayos se medirán las dimensiones y la masa de cada probeta para así ser clasificada según su densidad, lo que luego nos permitirá determinar si esta propiedad física influye en las propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. Descripción de la especie

El nombre científico de la balsa es *Ochroma pyramidale*, aunque se usa también como sinónimo *Ochroma lagopus*. La madera se conoce en todo el mundo como la balsa, o madera de balsa, y de vez en cuando como madera de corcho en el comercio de la madera. El nombre 'balsa', que significa "balsa" en español, se desarrolló cuando los primeros colonos españoles observaron por primera vez a los indios que usaban la madera en la construcción de balsas (Longwood, 1971).

Los árboles de balsa son caducifolios y alcanzan alturas de hasta 18 m o más cuando se les da suficiente espacio en un suelo rico y bien drenado a baja altura. En la madurez dos tercios a tres cuartos de sus troncos pueden estar libres de ramas. En general el crecimiento es muy acelerado, superado tal vez solamente por el árbol de papaya. En un año puede alcanzar una altura de 3,5 m y un diámetro de 5 cm o más, y los árboles de cinco a ocho años de edad pueden alcanzar una altura de 18 m y 60 a 75 cm de diámetro (Fletcher, 1951).

En general después de 12 años de edad, cuando los árboles alcanzan la madurez, hay una tendencia a que la madera más densa se forme en el exterior de los árboles. Después de esta edad la madera se deteriora rápidamente, el crecimiento se ralentiza, el duramen se pudre, y el nuevo crecimiento se vuelve duro y pesado (Longwood, 1971).

En Ecuador la floración ocurre en el mes de agosto, y las grandes flores llamativas son sucedidas por las frutas color castaño muy parecidas a las cápsulas de algodón que tienen un tamaño cercano al de la mano de una persona. Este fruto se asemeja a la forma de una pata de un conejo (Figura 3), lo que presumiblemente explica el origen de su nombre científico (Fletcher, 1951).



Figura 3: Fruto de árbol de balsa

2.2. La madera de balsa

Son las características de la madera de balsa las que le confieren un valor especial en el comercio a nivel mundial. Ya que esta madera aunque no es la más ligera conocida, es la madera comercial más ligera. Existen otras maderas más ligeras que la balsa, pero carecen de su resistencia y no se encuentran disponibles en tamaño y cantidad suficientes para ser comercialmente importantes (Fletcher, 1951).

La madera en general, debe sus propiedades de peso, dureza y otras características al hecho de que las paredes de las células que lo componen aumentan de espesor a medida que maduran y experimentan complicados cambios químicos, incluyendo la deposición de una sustancia conocida como lignina. Este proceso de lignificación da lugar a la erradicación total o parcial de las cavidades dentro de las células. Sin embargo en la balsa y otras maderas ligeras, el proceso de lignificación tiene lugar solo en un grado muy leve, por lo que en la madurez las células que componen dichas maderas aún tienen paredes delgadas, y esa es la razón de su ligereza (Fletcher, 1951).

El color de la madera es de amarillento a rosáceo. Los árboles se cosechan antes de la madurez biológica para evitar el desarrollo de “corazón de agua”. La madera de balsa suele tener una densidad de 100 kg/m^3 a 170 kg/m^3 , pero puede variar de 50 kg/m^3 a 410 kg/m^3 (Francis, 1991).

En la madera de balsa no se puede apreciar sus anillos de crecimiento como en otros árboles, sin embargo tiene un crecimiento uniforme, como es generalmente característico de los árboles tropicales. Por lo general es de color blanco oscuro, a veces se tiñe con tonos que van desde el rosa al marrón, tiene un brillo sedoso y aparenta ser aterciopelada al tacto. Es tan suave que se puede hundir fácilmente la uña del dedo en ella. En la actualidad, es la madera más ligera conocida que tiene resistencia y rigidez suficientes para ser comercialmente útil (Fletcher, 1951).

2.3. Requisitos físicos de la balsa

2.3.1. Clima

La balsa es un árbol de clima tropical húmedo donde existe abundante precipitación y altas temperaturas con pequeños rangos de variación. Para un desarrollo fisiológico y productivo óptimo la precipitación anual requerida es de 2540 mm y un promedio de temperatura que varíe de 20 a 30 °C. Quevedo, el centro de producción de balsa en Ecuador, tiene una precipitación media anual de 2540 mm y una temperatura que oscila entre los 20 a 33 °C (Fletcher, 1951).

2.3.2. Topografía

Los árboles de balsa prosperan en las tierras bajas costeras tropicales en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 800 m.s.n.m cerca de las montañas donde hay mucha humedad y drenaje adecuado que es esencial. El litoral del Ecuador no se ve gravemente afectado por las condiciones topográficas, ya que la mayor parte del territorio es de poca altura, con pocas colinas que pueden considerarse serios obstáculos (Fletcher, 1951).

2.3.3. Suelos

El árbol de balsa requiere un rico abastecimiento de nutrientes, se desarrolla mejor en suelos bien drenados, húmedos y arenosos de la selva. Estas condiciones, junto con las fuertes lluvias, aseguran un rápido crecimiento que da a la madera su singular ligereza (Fletcher, 1951).

2.4. Distribución natural

La balsa es autóctona de toda América Central y la parte norte de América del Sur (Figura 4). Crece en una docena de variedades desde el sur de México hasta Bolivia, hacia el este gran parte de Venezuela, y en la región insular de América Central (Francis, 1991).

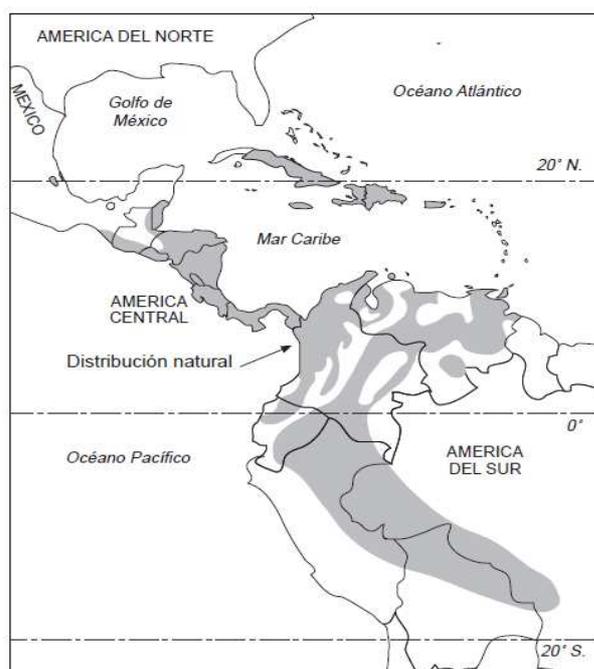


Figura 4: Distribución natural de la balsa

Fuente: (Francis, 1991)

Ecuador es el principal proveedor mundial de balsa y lo ha sido durante más de 60 años; Fletcher (1951) señaló que Ecuador controlaba el 95% de la producción en 1943 y la conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD 2001) informó que Ecuador satisfizo el 80% de la demanda mundial de balsa en 2001. Según Midgley y otros (2010), en el año de 2008, Ecuador representó el 89% del suministro mundial de balsa, seguido de Papúa Nueva Guinea que proporciona el 8%.

Aunque fuentes de la industria sugieren que una parte significativa de este amplio recurso se encuentra en áreas con acceso limitado o lejos de las instalaciones de procesamiento. Indican que Ecuador seguirá siendo el líder en suministros globales de balsa. Es una práctica común establecer más

plantaciones de las necesarias con el fin de asegurar la continuidad del suministro a los procesadores en caso de que existan carreteras bloqueadas o fallas en la infraestructura (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010). La balsa se produce naturalmente en Ecuador y se cultiva principalmente en las llanuras y colinas costeras tropicales húmedas (Figura 5), donde la precipitación anual es de 2500 mm. Las plantaciones de balsa comenzaron a establecerse desde 1937 después de que el gobierno ecuatoriano aprobara una ley que requería plantar dos plántulas de balsa para cada corte de árbol para uso comercial, para 1940 se habían establecido tres plantaciones comerciales (Fletcher, 1951).

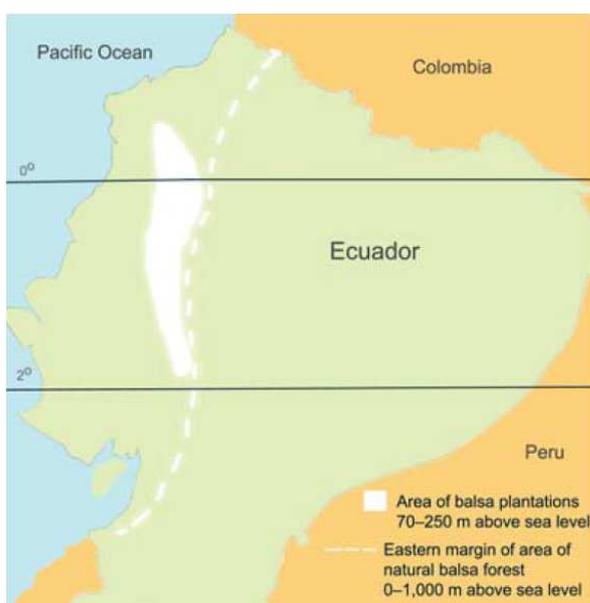


Figura 5: Principales áreas de producción de balsa de Ecuador

Fuente: (Bonet, Coello, & Andrade, 2009)

Las cuatro áreas de mayor producción se encuentran en las provincias de Los Ríos, Guayas, El Oro y Santo Domingo de los Tsáchilas. La principal área de crecimiento y producción se encuentra entre Quito y Guayaquil, en las estribaciones andinas que rodean Quevedo, en la provincia de Los Ríos, donde el suelo y las condiciones climáticas son ideales para su crecimiento. La principal área productora actualmente es la provincia de Los Ríos abarcando el 36% de la producción de balsa en Ecuador. Debido a los métodos de plantación, así como al crecimiento silvestre, se espera que éste

siga siendo el principal foco de producción en nuestro país (Ministerio del Ambiente, 2010).

2.5. Explotación forestal

La balsa es un árbol de fácil reproducción y por lo tanto es un recurso que se encuentra en constante renovación en las regiones donde se produce. Cuando se cosecha a los 4-6 años, hay muy poco o ningún tipo de corazón de agua en el tronco. Los árboles talados se cortan en longitudes de 1,2 m produciendo un promedio de 15 a 20 trozas por árbol después de ser eliminadas las ramas. Los troncos son transportados por maquinaria hasta camiones, los cuales los transbordan hasta las plantas de procesado (Bonet, Coello, & Andrade, 2009).

La balsa se considera un recurso natural, renovable y en expansión, cuya tala no es perjudicial para el medio ambiente, tampoco es considerada una especie en peligro, la autorización y regulación del corte de esta madera lo realiza el Ministerio del Ambiente (Bonet, Coello, & Andrade, 2009).

El hongo de mancha azul es una fuente importante de degradación comercial y puede desarrollarse en la madera si hay retrasos entre la cosecha, aserrado y secado. En Ecuador, la balsa se cosecha, se aserra y se seca en 3 días para evitar la degradación que causa este hongo (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010).

Casi todas las operaciones de procesamiento de balsa segregan la madera de balsa en tres clases de densidad. Mientras que estas clases varían en la nomenclatura y el valor entre los procesadores, se describen generalmente como: baja ($80 - 120 \text{ kg/m}^3$), media ($120 - 180 \text{ kg/m}^3$) y alta ($180 - 220 \text{ kg/m}^3$) (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010).

2.6. Secado

La madera se caracteriza por ser extremadamente difícil de secar al aire desde el estado verde, por lo que el secado en horno es el mejor método de secado recomendado. Previamente al proceso de secado en horno, la madera es sumergida en fungicida para evitar las manchas azules. El secado en horno

normalmente lleva el contenido de humedad (CH) a un 10-14% durante un tiempo de 8 días. Incluso en el secado en horno existe el peligro de que la madera se agriete, pandee, endurezca y es propensa a quemarse. La balsa es algo variable en sus características de secado, y ello se debe en gran parte a la variación de su densidad y CH (Longwood, 1971).

2.7. Propiedades de trabajo

La balsa es muy fácil de trabajar con herramientas eléctricas o manuales afiladas y con bordes finos, y prácticamente no tiene un efecto atenuador en las cuchillas. Las herramientas con bordes gruesos tienden a hacer que la madera se desmorone y le dan un acabado lanudo al cepillado. Puede ser fácilmente penetrada por clavos y tornillos pero es demasiado blanda para mantenerlos en su sitio. Afortunadamente, la madera se pega satisfactoriamente; el encolado es el método más eficaz para la fijación o sujeción. La madera puede ser pintada y pulida bastante bien pero absorbe mucho del material utilizado en los procesos (Longwood, 1971)

2.8. Durabilidad

La balsa tiene muy poca resistencia al deterioro. La madera es muy susceptible al ataque de termitas de madera seca. Los troncos y la madera en estado verde pueden ser atacados fácilmente por los escarabajos de ambrosía y si los tratamientos para procesar la madera se retrasan, los troncos pueden resultar muy afectados (Longwood, 1971).

2.9. Aplicaciones

Debido a su baja densidad, resistencia y versatilidad, la balsa es adecuada para una amplia gama de usos finales. Se utiliza extensivamente para elaborar maquetas y modelos a escala, incluyendo modelos de barcos, aviones, planeadores y edificios. Debido a su flotabilidad, se utiliza para la elaboración de tablas de surf, balsas salvavidas y chalecos salvavidas. Los estándares técnicos para la balsa son muy altos, con clientes demandando madera uniforme de color claro, libre de nudos y otros defectos, además de

corte a dimensiones exactas (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010).

Su principal uso industrial, y el uso que forma la mayor parte del mercado global de la madera de balsa, son como paneles end grain (perpendicular a la fibra) como se puede apreciar en la Figura 6. Los paneles end grain se usan ampliamente en estructuras sándwich, que normalmente es un material de núcleo de baja densidad intercalado entre dos caras con un módulo de elasticidad relativamente alto para producir un panel ligero con una rigidez excepcional. Las pieles de la cara actúan como los patines de una viga, soportando cargas de tensión y compresión. El núcleo desempeña el papel de alma, separando las pieles y transfiere los esfuerzos de cizalla entre las pieles. Los materiales del núcleo proporcionan un aumento en el espesor de la estructura, con rigidez asociada, y peso mínimo (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010).



Figura 6: Paneles de balsa end grain flexibles

Fuente: (BALSA PNG, s.f.)

Para la fabricación de paneles end grain, la balsa cosechada se seca al aire y luego se seca en horno hasta un 10-14% de CH. La madera seca se cepilla, se corta a una determinada longitud, se mide con precisión y se pesa para determinar la densidad. Después de la segregación en clases de densidad, la madera es pegada, prensada en bloques grandes y cortada en láminas de modo perpendicular a la fibra. Esta orientación del grano ofrece unas propiedades resistencia a la compresión y cizalladura muy elevadas,

fundamentales para una buena construcción en sándwich y una alta relación resistencia/peso y rigidez/peso.

Según Midgley y otros (2010), las características de la balsa que son atractivas para los fabricantes de paneles son:

- Su precio relativamente bajo en comparación con otros materiales que se usan como núcleo.
- Es un material procedente de un recurso natural.
- Tiene un amplio rango de temperatura de operación (-212 °C a 163 °C).
- Ofrece un buen aislamiento acústico y térmico.
- Tiene alta resistencia al impacto.
- Excelente resistencia a la fatiga.

La madera de balsa se desempeña muy bien en aplicaciones críticas al fuego. No es muy combustible, y cuando se quema produce un humo blanco que no es tóxico. Si la madera entra en contacto con la llama, se forma una capa uniforme de carbón que protege al núcleo material no consumido de la fuente de calor. Por el contrario algunos materiales núcleo competitivos hechos de espumas sintéticas pueden producir humos que contienen subproductos tóxicos. Es por estas razones que la balsa es aprobada en la mayoría de aplicaciones de tránsito y como aislamiento para salas de máquinas.

La balsa logra una excelente unión con la mayoría de los tipos de resinas y adhesivos y es compatible con una variedad de procesos de fabricación. Mientras que la balsa es utilizada como paneles rígidos, muchos fabricantes prefieren el material de lámina flexible en el que el panel se corta en pequeños cuadrados que se mantienen juntos por medio de una malla (principalmente de fibra de vidrio) que permite que el núcleo se ajuste a una superficie curvada y moldeada. Como material básico, la balsa ha encontrado una amplia gama de aplicaciones en muchos sectores industriales como se describe a continuación. Ejemplos de tales aplicaciones se ilustran en la Figura 7.

Marina.- Como material compuesto ligero y fuerte, los paneles de balsa end grain se han utilizado en cascos, cubiertas, mamparos, superestructuras, interiores, herramientas y moldes. Muchos barcos de motor, embarcaciones recreativas y buques comerciales también tienen componentes hechos de compuestos de balsa. La balsa se ha utilizado para aislamiento masivo en buques de transporte de gases criogénicos como el Gas Natural Licuado.

Carretera y ferrocarril.- Los criterios importantes en la ingeniería de vehículos ferroviarios incluyen el ahorro de peso mientras se mantiene la rigidez y la resistencia, el aislamiento acústico y térmico, así como la protección contra incendios. Debido a su menor costo y mejor durabilidad, los paneles de fibra de vidrio con núcleo de balsa, han reemplazado los núcleos de espuma, siendo parte de los pisos de los trenes Bay Area Rapid Transit (BART) que operan en el área metropolitana de San Francisco. Y muchos de los vagones de ferrocarril modernos utilizan paneles de balsa ligeros en el revestimiento de techos y compartimentos. El suelo de las cabinas de las marcas más populares de camiones y autobuses están compuestos por balsa, al igual que los paneles de techo, paneles de la carrocería, faldones laterales.

Energía eólica.- La mejora de las tecnologías ha incrementado el rendimiento y la eficiencia de las turbinas eólicas, y la balsa se utiliza como núcleo en la estructura de sándwich de las aspas del rotor que cada vez son más grandes. En las áreas de las aspas del rotor donde se requieren una alta resistencia al cortante y a la compresión, los núcleos de balsa (end grain) proporcionan una de las soluciones más baratas y confiables. La energía eólica representa una de las aplicaciones más prometedoras para la balsa, ya que ambas son amigables con el medio ambiente, la mayoría de aspas tienen un promedio de vida de 25 años.

Aeroespacial.- Entre las aplicaciones aeroespaciales más conocidas para la balsa fue su uso en el bombardero Mosquito en la Segunda Guerra Mundial, un avión diseñado ingeniosamente construido en gran medida de madera. Algunos de los fabricantes de aviones más famosos como Boeing y McDonnell Douglas han utilizado (y continúan utilizando) paneles de balsa para revestir

el suelo, carros de cocina, particiones interiores, contenedores y piezas de aviación en general.

Industrial.- Los materiales compuestos de balsa son ampliamente utilizados en el aislamiento de conductos para tuberías industriales, como aislamiento para cámaras frigoríficas, cajas de embalaje para alimentos perecederos, tanques, limitadores de impacto, esquís, snowboards, wakeboards, revestimiento de cascos de médula, salvavidas, refrigeradores, enfriadores de agua, materiales de embalaje ligeros para mercancías frágiles, almohadillas para maquinaria pesada para absorber vibraciones. La innovación se ha convertido en el sello de las empresas exitosas que utilizan la madera de balsa.

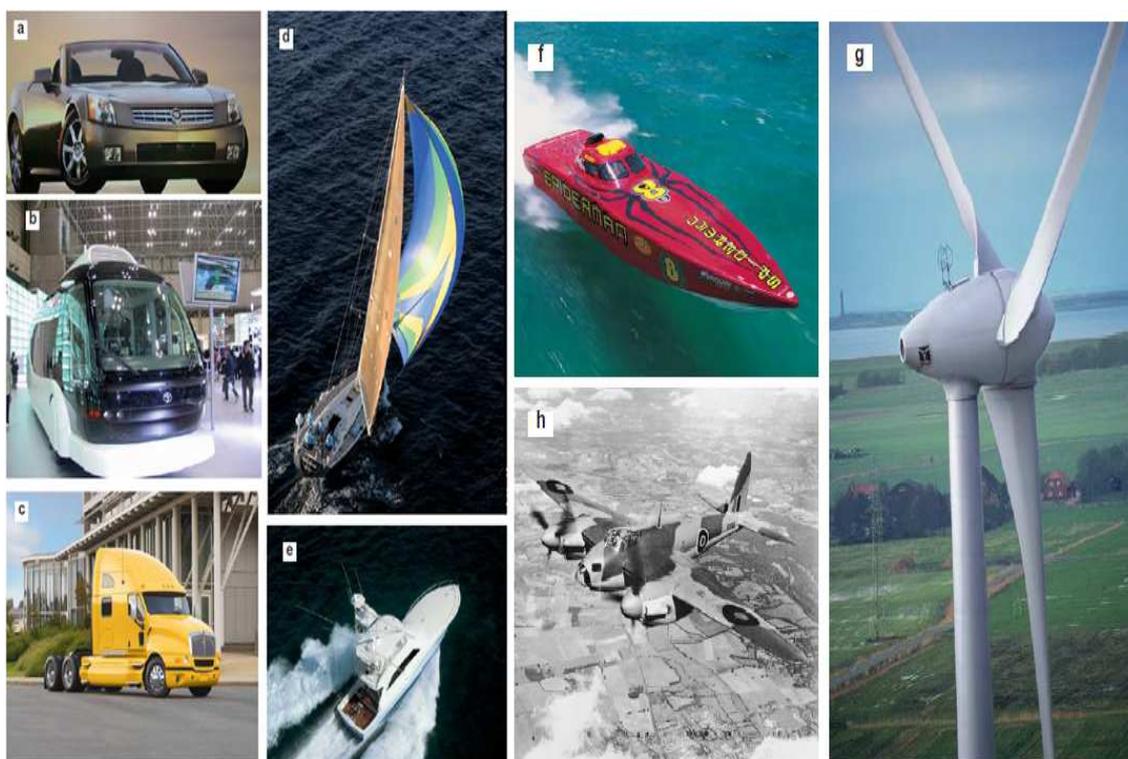


Figura 7: Ejemplos de productos que incorporan balsa

Fuente: (Midgley, Blyth, Howcroft, Midgley, & Brown, 2010)

Nota: (a) paneles de suelo del Cadillac XLR, (b) carrocería estructural del bus IMTS de Toyota, (c) el piso de la cabina del camión Kenworth T2000, (d) el casco y la cubierta del yate Dehler 47, (e) varias secciones del barco de pesca deportivo Viking 74, (f) el casco y cubierta del Douglas Marine Spiderman, (g) paneles end-grain como núcleo en palas para turbinas eólicas donde se requiere alta resistencia de cizallamiento y compresión, (h) Históricamente, el bombardero De Havilland Mosquito de la Segunda Guerra Mundial incorporó balsa en su famosa construcción de madera.

2.10. Estructura y función de la madera

La madera es una estructura biológica compleja, un compuesto formado por muchos químicos y tipos de células que actúan juntas para satisfacer las necesidades de una planta viva. La madera ha evolucionado a lo largo de millones de años para llevar a cabo tres funciones principales en las plantas: conducir el agua desde las raíces hacia las hojas, soportar el peso del cuerpo de la planta, almacenar productos bioquímicos.

No hay ninguna propiedad de la madera física, mecánica, química, biológica o tecnológica, que no se derive fundamentalmente del hecho de que la madera se forma para satisfacer las necesidades del árbol vivo. Para lograr cualquiera de estas funciones, la madera debe tener células diseñadas e interconectadas de manera suficiente para realizar estas funciones. Estas tres funciones han influido en la evolución de aproximadamente 20 000 especies diferentes de plantas leñosas, cada una con propiedades, usos y capacidades únicas, tanto en el contexto vegetal como en el humano. Al comprender la función de la madera en el árbol vivo, podemos comprender mejor las fortalezas y limitaciones que presenta como material.

2.10.1. Estructura macroscópica

Si se hace un corte normal al eje del árbol y examina su sección transversal, se puede apreciar que el tronco está compuesto de varios materiales presentes en bandas concéntricas, tal como se indica en la Figura 8.

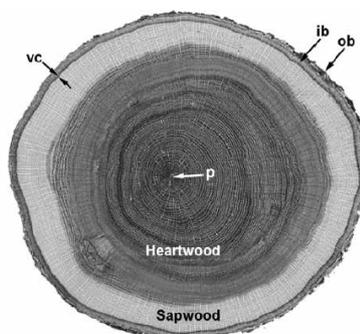


Figura 8: Vista macroscópica de la sección transversal de un árbol

Fuente: (Wiedenhoeft, 2010)

Corteza exterior (Outer bark): proporciona protección mecánica a la corteza interna más blanda y también ayuda a limitar la pérdida de agua por evaporación (Wiedenhoeft, 2010).

Corteza interior (Inner bark): tejido a través del cual los nutrientes (savia) producidos por la fotosíntesis son transportados desde las hojas hacia el resto del árbol (Wiedenhoeft, 2010).

Cambium vascular (Vascular cambium): los sistemas axial y radial y sus células componentes se derivan del cambium vascular. Es una fina capa de células que se encuentra entre la corteza interna y la madera, que produce por medio de división celular, madera al interior y corteza al exterior, haciendo que aumente el diámetro del tronco (Wiedenhoeft, 2010).

Albura (Sapwood): es la madera activa (madera viva) que transporta el agua o savia desde las raíces hacia las hojas. Es la madera más joven del árbol, con el tiempo las células de las capas internas mueren, convirtiéndose en duramen (Wiedenhoeft, 2010).

Duramen (Heartwood): se encuentra más cercana a la médula. Es la madera inactiva que está constituida por células biológicamente muertas que no cumplen funciones como conducción de agua o almacenamiento de nutrientes (Wiedenhoeft, 2010).

Anillos de crecimiento (Growth rings): En las regiones de clima templado, los árboles forman su madera en anillos; es decir, toda la madera producida en una estación de crecimiento se organiza en una entidad reconocible y funcional que muchas fuentes denominan anillos anuales de crecimiento. Las células formadas al principio del incremento de crecimiento se denominan células de madera temprana y las células formadas en la última porción del incremento de crecimiento se denominan células de la madera tardía (Wiedenhoeft, 2010). Mientras que en árboles que provienen de bosques tropicales, los anillos de crecimiento pueden llegar a ser la mitad o el doble de la edad del árbol y no son completamente evidentes (como es el caso

de la balsa), ello se debe a que las estaciones seca y lluviosa no son muy marcadas (Fletcher, 1951).

Médula (Pith): se encuentra en el centro del tronco y es el remanente del crecimiento temprano del tronco, antes de que se formara la madera. Generalmente es desechado en los procesos de elaboración de la madera debido a que es muy poroso y presenta una baja resistencia (Wiedenhoeft, 2010).

2.10.2. Maderas blandas y maderas duras

A pesar de lo que se podría pensar sobre la base de los nombres, no todas las maderas blandas tienen madera suave y ligera, ni todas las maderas duras tienen madera dura y pesada. Para definir las botánicamente, las maderas blandas son aquellas maderas que provienen de gimnospermas (en su mayoría coníferas), y maderas duras son maderas que provienen de angiospermas (plantas con flores).

Las maderas blandas y las maderas duras no sólo difieren en términos de los tipos de árboles de los que se derivan, sino que también difieren en términos de sus células componentes. Las maderas blandas tienen una estructura básica más simple que las maderas duras porque tienen solamente dos tipos de células y relativamente poca variación en la estructura dentro de estos tipos de células. Las maderas duras tienen una mayor complejidad estructural porque tienen un mayor número de tipos de células básicas y un grado mucho mayor de variabilidad dentro de los tipos de células. La distinción más importante entre los dos tipos generales de madera es que las maderas duras tienen un tipo característico de célula llamada vaso (o poro), mientras que las maderas blandas carecen de estas (Figura 9).

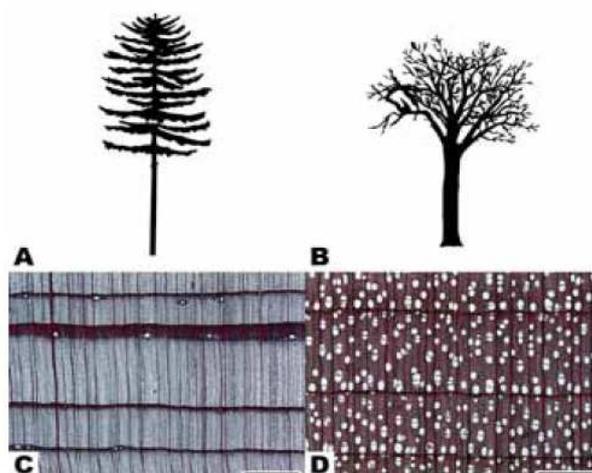


Figura 9: A) Forma general de un árbol de madera suave. B) Forma general de un árbol de madera dura. C) Sección transversal de una madera blanda; los espacios redondos en blanco son canales de resina. D) Sección transversal de una madera dura; las estructuras blancas redondas son vasos o poros.

Fuente: (Wiedenhoeft, 2010)

2.10.3. Sistemas axiales y radiales

La distinción entre la albura y el duramen, aunque importante, es una característica que a menudo se observa con bastante facilidad. Una investigación más detallada sobre la estructura de la madera muestra que la madera está compuesta de células discretas conectadas e interconectadas de una manera predecible para formar un sistema integrado que es continuo. Las células de madera son típicamente muchas veces más largas que anchas y están específicamente orientadas en dos sistemas separados de células: el sistema axial y el sistema radial. Las células del sistema axial tienen sus ejes largos paralelos al eje largo del tronco. Las células del sistema radial son alargadas perpendicularmente al eje largo del tronco y están orientadas como radios en un círculo o radios en una rueda de bicicleta, desde la médula hasta la corteza. En el tronco de un árbol, el sistema axial corre hacia arriba y hacia abajo, proporciona el transporte de agua a larga distancia, y proporciona la mayor parte de la resistencia mecánica del árbol. El sistema radial se ejecuta en una dirección de la médula a la corteza, proporciona el transporte lateral para los productos bioquímicos, y en muchos casos realiza una gran fracción

de la función del almacenaje en la madera. Estos dos sistemas están interpenetrados e interconectados, y su presencia es una característica definitoria de la madera como tejido (Wiedenhoeft, 2010).

2.10.4. Planos de sección

Aunque la madera se puede cortar en cualquier dirección para ser examinada, la organización y la interrelación entre los sistemas axiales y radiales dan lugar a tres perspectivas principales desde las que se puede ver para recoger la mayor cantidad de información. Estas tres perspectivas son el plano transversal de sección (la sección transversal), el plano radial de sección y el plano tangencial de sección. Las secciones radiales y tangenciales se denominan secciones longitudinales porque se extienden paralelas al sistema axial.

El plano transversal de sección es la cara que se expone cuando se corta un árbol (como en la Figura 8). El plano transversal de la sección proporciona información sobre características que varían tanto en la dirección de la médula a la corteza (dirección radial) como también en aquellas que varían en la dirección circunferencial (dirección tangencial).

El plano radial de la sección se extiende en la dirección de la médula hacia la corteza, y es paralelo al sistema axial, por lo que proporciona información sobre los cambios longitudinales en el tallo y de la médula a la corteza a lo largo del sistema radial. Para describirlo geoméricamente, es paralelo al radio de un cilindro, y se extiende arriba y abajo de la longitud del cilindro. En un sentido práctico, es la cara o el plano que se expone cuando un tronco se divide exactamente desde la médula hacia la corteza. No proporciona ninguna información sobre características que varían en la dirección tangencial.

El plano tangencial está en un ángulo recto con el plano radial. Geométricamente, es paralelo a cualquier línea tangente que toque el cilindro, y se extiende a lo largo de la longitud del cilindro. Una manera en la que el plano tangencial estaría expuesto es si la corteza fuera pelada de un tronco; La cara expuesta es el plano tangencial. El plano tangencial de sección no

proporciona ninguna información sobre características que varían en la dirección radial.

Los tres planos de sección (Figura 10) son importantes para la correcta observación de la madera, y sólo mirando cada uno se puede recoger una comprensión total y precisa de la estructura tridimensional de la madera. Los tres planos de sección se determinan por la estructura de la madera y la forma en que las células de madera están dispuestas.

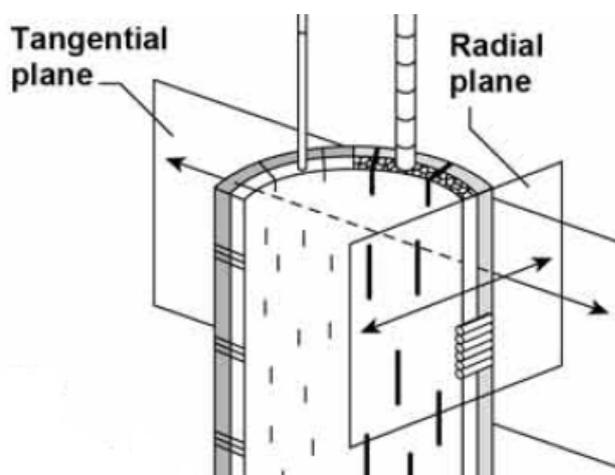


Figura 10: Planos de sección tangencial y radial de un tronco

Fuente: (Wiedenhoeft, 2010)

2.10.5. Estructura microscópica

Como todas las maderas, la madera de balsa tiene su propia microestructura celular mostrada en la micrografía de la Figura 12. Y sus principales células componentes se describen a continuación:

Fibras o traqueidas: son células que tienen la forma de un frijol largo, dispuestas axialmente a lo largo del tronco del árbol (desde las raíces a la copa), representan entre el 80–90% del volumen de la madera. En la vista o sección transversal las traqueidas aparecen como células hexagonales irregulares en filas radiales (Easterling, Harrysson, Gibson, & Ashby, 1982). Funcionan casi exclusivamente como células de soporte mecánico. El grosor de la pared celular de la fibra es el factor principal que gobierna la densidad y la resistencia mecánica de la madera (Wiedenhoeft, 2010). La pared celular

de las traqueidas está constituida por una pared primaria exterior (P) y una pared interior secundaria (S) formada por tres subcapas, S1, S2 y T o S3 como se muestra en la Figura 11, las mismas que están formadas por microfibrillas de celulosa orientadas de forma distinta en cada capa (Gracia, 2011). Las propiedades estructurales en la dirección axial se deben a la capa secundaria S2 que es mucho más gruesa que las demás ocupando el 85% de espesor total de la pared secundaria (Da Silva & Kyriakides, 2007) y las microfibrillas que están orientadas de 10–30° con respecto al eje longitudinal de la célula y por lo tanto forma la capa estructural principal de toda la célula traqueídica (Osei-Antwi, de Castro, Vassilopoulos, & Keller, 2013).

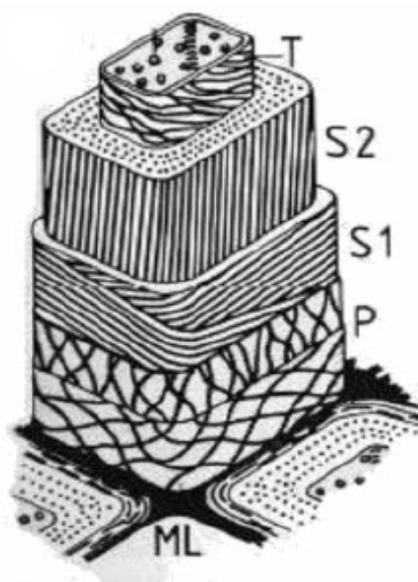


Figura 11: Estructura simplificada de la microestructura de la pared celular de la madera

Fuente: (Newaz, Mayeed, & Rasul, 2016)

En la capa primaria P, las microfibrillas de celulosa no tienen una orientación definida, mientras que en las capas secundarias S1 y S3, las microfibrillas de celulosa están orientadas casi a 90° del eje longitudinal de la célula. La contribución mecánica de las capas S1 y S3 parece ser significativa cuando la madera se carga en la dirección transversal (Bergander & Salmén, 2002).

Según Borrega y otros (2015) el aumento del espesor de las paredes de las células de fibra con aumento de la densidad de la balsa se debe predominantemente a la presencia de una capa S2 más gruesa, con sólo una pequeña contribución de las demás capas, tal como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1:
Espesor de capas de pared celular en fibras de madera de balsa de diferentes densidades

	Baja densidad	Alta densidad
Densidad [kg/m³]	75	264
Espesor [µm]		
ML	0,08 ± 0,02	0,13 ± 0,06
S1	0,11 ± 0,04	0,16 ± 0,06
S2	0,12 ± 0,04	1,09 ± 0,38
S3	0,10 ± 0,06	0,12 ± 0,03
Total (t/2)	0,41	1,49

Fuente: (Borrega, Ahvenainen, Serimaa, & Gibson, 2015)

Parénquima: son células de longitud más corta y de forma más rectangular. Están dispuestas en grupos (rayos) que penetran radialmente a las traqueidas y son responsables del almacenamiento y conducción radial de carbohidratos junto con fluidos (Da Silva & Kyriakides, 2007).

Vasos o canales de savia: son células especializadas en conducir el agua, tienen paredes celulares más delgadas y son relativamente más grandes en diámetro, los mismos que oscilan entre 150-250 µm en comparación con 30-40 µm para las traqueidas (Osei-Antwi, de Castro, Vassilopoulos, & Keller, 2013). Se hallan apiladas una encima de otra para formar canales. Cuando los extremos de los vasos entran en contacto uno con el otro, se forma un orificio llamado placa de perforación. En la sección transversal, los vasos aparecen como grandes aberturas y a menudo se denominan poros (Wiedenhoeft, 2010).

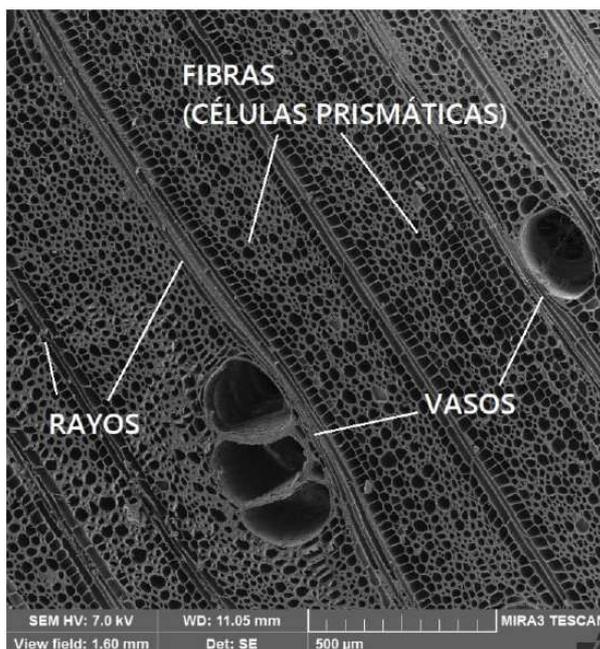


Figura 12: Micrografía de una sección transversal del tronco de árbol de balsa en la que se muestra la sección transversal de las fibras, rayos y vasos

Fuente: (Almeida & Martínez, 2017)

2.11. Relaciones de humedad y propiedades físicas de la madera

La madera, como muchos materiales naturales, es higroscópica (absorbe la humedad del ambiente circundante). El intercambio de humedad entre la madera y el aire depende de la humedad relativa y la temperatura del aire y la cantidad actual de agua en la madera. Esta relación de humedad tiene una influencia importante en las propiedades de la madera y el rendimiento. Muchos de los desafíos del uso de la madera como material de ingeniería surgen de cambios en el CH o de una abundancia de humedad dentro de la madera. En este apartado se discute las propiedades físicas macroscópicas de la madera con énfasis en su relación con el CH.

2.11.1. Relaciones Madera-Humedad

2.11.1.1. Contenido de humedad y madera verde

Muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera dependen del contenido de humedad de la madera. El CH generalmente se expresa como un porcentaje y se puede calcular a partir de:

$$\%CH = \frac{m_{agua}}{m_{madera}} (100\%) \quad (1)$$

Donde m_{agua} es la masa de agua en la madera y m_{madera} es la masa de la madera secada al horno. Operacionalmente el %CH de una pieza de madera se puede calcular a partir de:

$$\%CH = \frac{m_{húmeda} - m_{seca}}{m_{seca}} (100\%) \quad (2)$$

Donde $m_{húmeda}$ es la masa de la muestra a un CH dado y m_{seca} es la masa de la muestra secada al horno.

La madera verde a menudo se define como madera recién aserrada en la cual las paredes y cavidades celulares están completamente saturadas con agua. El CH de la madera verde puede oscilar entre aproximadamente 30% y más de 200%.

2.11.1.2. Punto de saturación de fibra (PSF)

La humedad puede existir en la madera como agua libre (agua líquida o vapor de agua en las cavidades celulares) o como agua límite (agua contenida dentro de las paredes celulares). El CH en el que sólo las paredes celulares están completamente saturadas (de agua límite) pero no existe agua en las cavidades celulares se llama punto de saturación de la fibra (CH=30%). Operacionalmente, el PSF se considera como ese CH por encima del cual las propiedades físicas y mecánicas de la madera no cambian en función del CH.

La resistencia de la madera aumenta cuanto más seca está. No obstante, este aumento no se inicia hasta que la madera pase por el PSF, además a partir de ese momento la madera experimentará contracciones.

2.11.1.3. Absorción de vapor de agua

Cuando la madera está protegida del contacto con el agua líquida y está protegida de la luz solar bajo sombra, su CH por debajo del PSF es una función tanto de la humedad relativa (HR) como de la temperatura del aire circundante. La madera en servicio está expuesta a cambios tanto a largo plazo (estacional) como a corto plazo (diarios) en la humedad relativa y la temperatura del aire circundante, lo que induce cambios en el CH de la madera. Estos cambios suelen ser graduales, y las fluctuaciones a corto plazo tienden a influir sólo en la superficie de la madera. Los cambios de CH pueden ser retardados, pero no evitados, por revestimientos protectores tales como barnices, lacas o pinturas.

2.11.1.4. Contenido de humedad en equilibrio

Cuando el contenido de humedad es inferior al PSF, este es función de la humedad relativa y de la temperatura ambiente. El contenido de humedad en equilibrio (CHE) se define como el CH en el que la madera no está ganando ni perdiendo humedad. La relación entre CHE, HR y temperatura se muestra en la Figura 13 y puede ser aplicado para cualquier especie de madera.

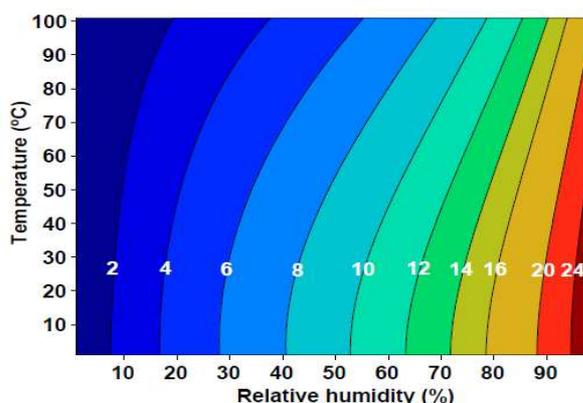


Figura 13: Equilibrio del contenido de humedad de la madera en función de la humedad relativa y la temperatura

Fuente: (Glass & Zelinka, 2010)

2.11.1.5. Absorción de agua líquida

Los productos de madera en servicio pueden estar expuestos al agua líquida a través de una variedad de mecanismos. El contacto con agua líquida puede inducir cambios rápidos en el contenido de humedad de la madera, en contraste con los cambios lentos que se producen debido a la absorción del vapor de agua. Además, la absorción de agua líquida puede llevar el contenido de humedad de la madera por encima de la saturación de fibra (la absorción de vapor de agua por sí sola no puede). Como la madera absorbe el agua por encima de su PSF, el aire en las cavidades celulares es reemplazado por agua. La absorción de agua líquida puede continuar hasta alcanzar el máximo contenido de humedad.

2.11.1.6. Estabilidad dimensional

La madera es dimensionalmente estable cuando el CH es mayor que el PSF. Debajo del PSF la madera cambia de dimensión, a medida que aumenta la humedad (se hincha) o pierde humedad (se contrae), porque el volumen de la pared celular depende de la cantidad de agua límite. Esta contracción e hinchazón puede dar lugar a deformación y agrietamiento de la madera, lo que a su vez puede conducir a la disminución de la utilidad de los productos de madera. Lo que hace importante que la estabilidad dimensional se entienda y se considere cuando un producto de madera se va a ser expuesto a grandes fluctuaciones de humedad en servicio.

Con respecto a la estabilidad dimensional, la madera es un material ortotrópico. Se contrae (o se hincha) más en la dirección de los anillos de crecimiento anual (tangencialmente), aproximadamente la mitad a través los anillos (radialmente), y sólo ligeramente a lo largo del grano (longitudinalmente). Los efectos combinados de la contracción radial y tangencial pueden distorsionar la forma de las piezas de madera debido a la diferencia en la contracción y la curvatura de los anillos anuales. Los principales tipos de distorsión como resultado de estos efectos se ilustran en la Figura 14.

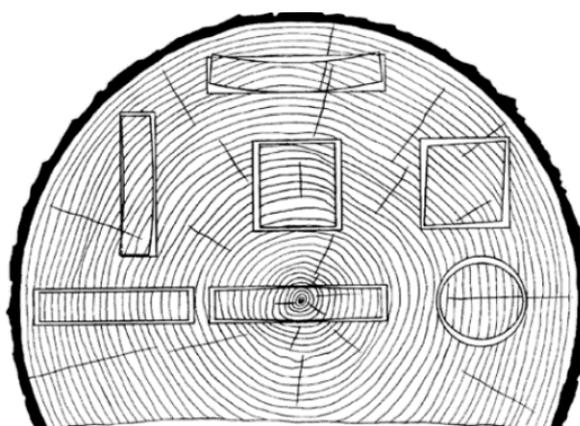


Figura 14: Contracción y distorsión característica de piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento

Fuente: (Glass & Zelinka, 2010)

2.11.1.7. Contracción transversal y volumétrica

Se han recogido datos para representar la contracción media radial, tangencial y volumétrica de numerosas especies domésticas mediante métodos descritos en la ASTM D143. Los valores de contracción para la madera de balsa, expresados como un porcentaje de la dimensión verde, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2:
Valores de contracción de la madera de balsa

Especie	% de contracción		
	Radial	Tangencial	Volumétrica
Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	3.0	7.6	10.8

Fuente: (Glass & Zelinka, 2010)

2.11.1.8. Contracción longitudinal

La contracción longitudinal (contracción paralela a la fibra) es generalmente bastante pequeña. Los valores promedio para la contracción desde el estado verde se hallan entre el 0.1% y 0.2%.

2.11.1.9. Relación entre contenido de humedad y contracción

En una pieza de madera pequeña sin gradientes de humedad, la contracción normalmente comienza alrededor del PSF y continúa de una manera bastante lineal hasta que la madera está completamente seca. No obstante, en el secado normal de la madera o de otras piezas grandes, la superficie de la madera se seca primero, causando un gradiente de humedad. Cuando el contenido de humedad superficial cae por debajo del PSF, empieza a encogerse aunque el interior todavía puede estar bastante húmedo y no encogerse. Debido a los gradientes de humedad, la contracción de la madera puede ocurrir incluso cuando el contenido de humedad promedio de toda la pieza de madera está por encima de la saturación de la fibra. Con gradientes de humedad, la relación de contenido de humedad-contracción no es lineal, sino más bien similar a la de la Figura 15. La forma exacta de la curva de contracción con gradientes de humedad depende de varias variables, principalmente tamaño y forma de la pieza, especies de madera y condiciones de secado utilizadas.

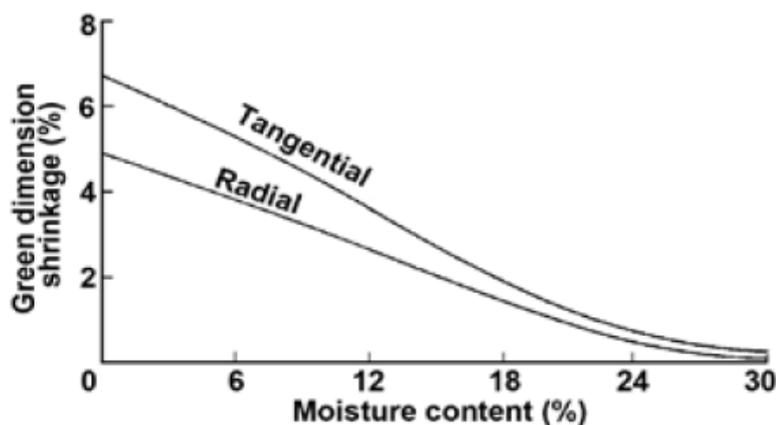


Figura 15: Curva típica de contenido de humedad Vs contracción

Fuente: (Glass & Zelinka, 2010)

2.11.2. Densidad y peso específico

La densidad ρ de una sustancia se define como la relación entre su masa y su volumen y se expresa en el Sistema Internacional (SI) en unidades de kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), en el sistema inglés en unidades de

libras por pie cúbico (lb/ft^3) o en el sistema centímetro-gramo-segundo (CGS) en unidades de gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). El peso específico G se define como la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua ρ_a a una temperatura de referencia especificada, típicamente $4^\circ C$ ($39^\circ F$), donde ρ_a es $1 g/cm^3$ ($1000 kg/m^3$ o $62.43 lb/ft^3$). Por lo tanto, un material con una densidad de $5 g/cm^3$ tiene un peso específico de 5.

Para hacer comparaciones entre especies o productos, se hace necesaria una base de referencia estándar. Varias opciones válidas son posibles para la madera, incluyendo la densidad en estado seco al horno (ρ_0) y el peso específico G hacen referencia a un volumen en particular. Como se muestra en la Tabla 3, el peso específico de la madera puede hacer referencia a su volumen en cualquier contenido de humedad, pero en todos los casos G se basa en masa secada al horno. Las bases comúnmente utilizadas para el volumen son (a) secado al horno, (b) verde, y (c) 12% de CH.

Tabla 3:
Expresiones de peso específico y densidad en madera

Símbolo	Masa	Volumen
G_0	Seca al horno	Seco al horno
G_b (peso específico básico)	Seca al horno	Verde
G_{12}	Seca al horno	12% CH
G_x	Seca al horno	x% CH
ρ_0	Seca al horno	Seco al horno
ρ_{12}	12% CH	12% CH
ρ_x	x% CH	x% CH

Fuente: (Glass & Zelinka, 2010)

2.12. Propiedades mecánicas de la madera

A menudo la literatura se refiere a la madera como un material ortotrópico, es decir, que posee propiedades mecánicas diferentes en la dirección de cada uno de sus tres ejes principales ortogonales entre sí, estos ejes son el

longitudinal, el radial y el tangencial. El eje longitudinal (L) es paralelo a la dirección del grano; el eje radial (R) es normal a los anillos de crecimiento y perpendicular al grano; y el eje tangencial (T) es perpendicular al grano pero tangente a los anillos de crecimiento (Krestchmann, 2010). Estos tres ejes se exhiben en la Figura 16.

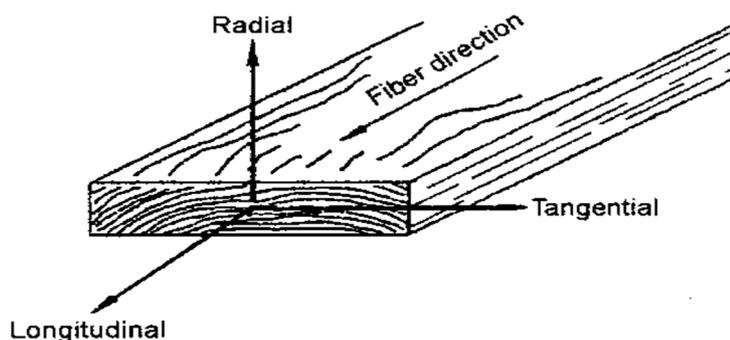


Figura 16: Ejes principales de la madera con respecto a la dirección del grano y anillos de crecimiento

Fuente: (Krestchmann, 2010)

2.12.1. Propiedades elásticas

Las características elásticas que representan un material son el módulo de elasticidad, el módulo de corte y el coeficiente de Poisson. Al ser la madera un material ortotrópico tiene en total doce constantes, tenemos: tres módulos de elasticidad, tres módulos de rigidez o de corte y seis coeficientes de Poisson. Los módulos de elasticidad y los coeficientes de Poisson pueden relacionarse por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}, i \neq j, i, j = L, R, T \quad (3)$$

2.12.1.1. Módulo de elasticidad (MOE)

La elasticidad comprende que las deformaciones causadas por bajos esfuerzos desaparecen después de que se eliminan las cargas. Cuando los niveles de esfuerzo son muy altos, se origina una deformación plástica o rotura. Los tres módulos de elasticidad, que se denotan por E_L , E_R y E_T , respectivamente, son los módulos elásticos de los ejes longitudinal, radial y

tangencial. Usualmente estos módulos se obtienen a partir de ensayos de compresión, sin embargo los datos para E_R y E_T no son extensos en la literatura (Krestchmann, 2010). Los valores promedio para determinar E_R y E_T para balsa se muestran en la Tabla 4 como proporciones con E_L :

Tabla 4:
Relaciones elásticas para la madera de balsa con un contenido de humedad de 12%

Especie	E_T/E_L	E_R/E_L
Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	0.015	0.046

Fuente: (Krestchmann, 2010)

El módulo de elasticidad longitudinal (E_L) determinado a partir del ensayo de flexión estática en lugar del ensayo de compresión axial, es el único módulo de elasticidad disponible en la literatura. Cuando se utiliza el ensayo de flexión estática, E_L incluye un efecto de deflexión por cizallamiento; E_L de flexión puede ser incrementado en un 10% aproximadamente para eliminar este efecto. Este E_L de flexión ajustado se puede usar para determinar E_R y E_T basándose en las relaciones en la Tabla 4 (Krestchmann, 2010).

2.12.1.2. Módulo de rigidez o de corte (G)

El módulo de rigidez indica la resistencia a la deformación de un miembro producida por esfuerzos de cizallamiento. Los tres módulos de rigidez expresados por G_{LR} , G_{LT} y G_{RT} , respectivamente, son las constantes elásticas en los planos LR, LT y RT. Por ejemplo, G_{LR} es el módulo de rigidez basado en la deformación por cizalla en el plano LR y las tensiones de cizallamiento en los planos LT y RT (Krestchmann, 2010).

2.12.1.3. Coeficiente de Poisson

Cuando un miembro se carga axialmente, la relación entre la deformación transversal y axial se denomina coeficiente de Poisson. Las relaciones de Poisson se expresan por μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{TL} , μ_{LT} , μ_{RT} y μ_{TR} . La primera letra del subíndice hace referencia a la dirección de la carga aplicada y la segunda letra

a la dirección de la deformación lateral. Por ejemplo, μ_{LR} es la relación de Poisson para la deformación a lo largo del eje radial causada por la tensión a lo largo del eje longitudinal (Krestchmann, 2010).

2.12.2. Propiedades de resistencia comunes

Krestchmann (2010) detalla que las propiedades mecánicas más comúnmente medidas y representadas como "propiedades de resistencia" para el diseño incluyen el módulo de rotura en flexión, el esfuerzo máximo en compresión paralela al grano, el esfuerzo de compresión perpendicular al grano y la resistencia al corte paralelo al grano. Los esfuerzos básicos para las propiedades de resistencia antes nombradas se obtienen a partir de probetas pequeñas libres de defectos usando la norma ASTM D143.

A menudo se hacen mediciones adicionales para evaluar el trabajo de carga máxima en flexión, resistencia a la flexión de impacto, resistencia a la tracción perpendicular al grano y dureza.

2.12.2.1. Módulo de ruptura (MOR)

Esta propiedad se refiere a la capacidad máxima de carga de un miembro sometido a flexión (Figura 17) y es equivalente al momento máximo soportado por el espécimen. El módulo de ruptura es una medida del esfuerzo de flexión en la fractura, calculada asumiendo la elasticidad lineal hasta la fractura (Borrega & Gibson, 2015).

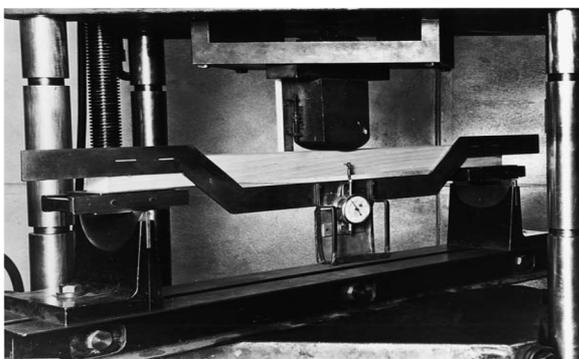


Figura 17: Máquina y probeta de ensayo de flexión estática

Fuente: (ASTM, 2014)

2.12.2.2. Resistencia a la compresión paralela al grano

Según Krestchmann (2010) es el esfuerzo máximo soportado por un espécimen sometido a compresión paralela al grano (Figura 18) que tiene una relación de esbeltez (longitud/ancho) menor a 11. La madera muestra una alta resistencia a los esfuerzos de compresión paralela al grano y ello se debe a que las fibras están orientadas alineadas al eje longitudinal en esa dirección y además está muy cerca de la orientación de las microfibrillas que forman parte de la capa media de la pared celular.

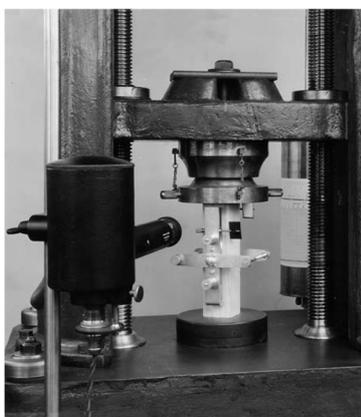


Figura 18: Máquina y probeta de ensayo de compresión paralela al grano

Fuente: (ASTM, 2014)

2.12.2.3. Resistencia a la compresión perpendicular al grano

Las fibras bajo este tipo de carga están sometidas a un esfuerzo perpendicular a su eje (Figura 19), que tiende a comprimir las pequeñas cavidades contenidas en ellas, está caracterizada por el esfuerzo en el límite proporcional (Krestchmann, 2010).

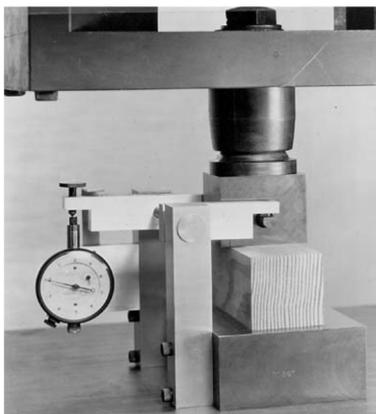


Figura 19: Máquina y probeta de ensayo de compresión perpendicular al grano

Fuente: (ASTM, 2014)

2.12.2.4. Resistencia a la cizalladura paralela al grano

Es la capacidad de resistir el deslizamiento interno de una parte sobre otra en la dirección paralela a las fibras (Krestchmann, 2010), como se puede apreciar en la Figura 20.



Figura 20: Máquina y probeta de ensayo de corte paralelo al grano

Fuente: (ASTM, 2014)

2.12.3. Propiedades menos comunes

Las propiedades de resistencia menos comúnmente medidas en especímenes de madera clara incluyen torsión, dureza, cizalladura de rodadura y tenacidad a la fractura. Otras propiedades que implican tiempo

bajo carga incluyen fluencia, ruptura por fluencia o duración de la carga, y resistencia a la fatiga.

2.12.3.1. Tenacidad

Es la energía requerida para causar un fallo completo rápido en un espécimen cargado centralmente a flexión.

2.12.3.2. Fatiga

Resistencia al fallo bajo combinaciones específicas de condiciones de carga cíclicas: frecuencia y número de ciclos, tensión máxima, relación entre el máximo y el mínimo esfuerzo y otros factores.

2.12.3.3. Dureza con nanoindentación

La nanoindentación utiliza un indentador extremadamente pequeño de un material duro y una forma específica (generalmente piramidal) para presionar en la superficie con la suficiente fuerza para que la madera se deforme. El historial de carga y deformación se utiliza para desarrollar información de propiedades mecánicas. La dureza con nanoindentación proporciona un método para describir la respuesta de un material a diversas condiciones de carga aplicada a una escala pequeña y ayuda a predecir el rendimiento del material después de aplicar algún tratamiento químico.

2.13. Defectos en la madera de balsa

A continuación se detallan los defectos más comúnmente observados en la madera de balsa, cuyas características se pueden observar en la Figura 21. La madera procesada que posee estos defectos hace que la misma sea desechada, ya que no se considera un material de calidad.

Corazón de agua: Defecto por el cual las paredes de las células, en cierta zona del árbol, se han deteriorado por el excesivo contenido de agua. Esta zona debilitada sufre rupturas en sus paredes celulares al secarse, lo que produce una depresión superficial llamada “colapso”.

Nudos: Representan el área donde antes descansaba una rama del árbol. Son zonas redondeadas de más de 1/4" de diámetro cuya consistencia es sumamente dura en comparación con las fibras vecinas.



Figura 21: (A) Corazón de agua en tronco, (B) Nudo en probeta

CAPÍTULO III

DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

La metodología aplicada en esta investigación abarca la realización de ensayos mecánicos estandarizados acorde a lo que indican las normas ASTM D143 y la ASTM D5536, las mismas que detallan los materiales, equipos y procedimientos a seguir para la obtención de las propiedades mecánicas de la madera de balsa planteadas en este trabajo de investigación tales como: módulo de elasticidad longitudinal y módulo de ruptura, resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y resistencia a la cizalla paralela a la fibra.

En el capítulo II se detalló que la provincia de Los Ríos es la zona de mayor producción balsa según el Ministerio de Ambiente (2010), por ello para el presente trabajo se seleccionaron cinco árboles de cuatro años de edad de manera aleatoria procedentes de la provincia de Los Ríos, cantón Valencia, parroquia El Vergel. Los árboles fueron seleccionados y marcados como se puede ver en la Figura 22, con la ayuda de personal calificado ya que debían cumplir algunos requisitos tales como: buen estado fitosanitario (ausencia de fitóftora o “pata roja” en la base y corazón de agua en el xilema), buena rectitud del fuste y escaza presencia de nudos.



Figura 22: Selección y marcado de árbol previamente al apeo

Una vez apeado y troceado el árbol en trozas de 1,2 m aproximadamente se aplicó emulsión de parafina en los extremos expuestos al aire, con el fin de reducir la deshidratación del tronco que provoca agrietamiento en la madera tal como se observa en la Figura 23.



Figura 23: Aplicación de emulsión de parafina en los extremos libres al aire

El proceso de secado de la madera cosechada se lo realizó en un tiempo de dos semanas por cada árbol cosechado, en la primera semana de dicho proceso fue secada al aire (Figura 24A) y los siete días restantes secada al horno (Figura 24B), al final del proceso de secado el contenido humedad fue de aproximadamente de 12%. Este proceso de secado se lo llevó a cabo con el fin de que el secado no sea brusco y así evitar al máximo el agrietamiento que genera pérdida de material.



Figura 24: A) Secado al aire. B) Secado al horno

El esquema de corte ejecutado es el que se muestra en la Figura 25, esto con el objetivo de obtener piezas radiales de aproximadamente 75 mm de grosor útiles para la fabricación posterior de las probetas de ensayo. Cada probeta fue codificada según el árbol del que proviene, la orientación cardinal y la troza a la que pertenece. Así por ejemplo una probeta cuyo código es: 1Na quiere decir que pertenece al árbol 1, punto cardinal Norte y troza “a” (1er troza a partir de la base).

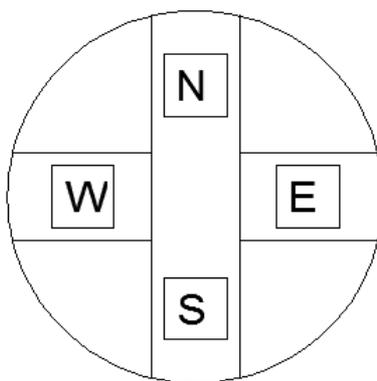


Figura 25: Esquema de corte

Todos los ensayos mecánicos fueron llevados a cabo en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en probetas pequeñas libres de defectos con la finalidad de obtener datos confiables en la determinación de las propiedades mecánicas de la madera de balsa. Las muestras de balsa fueron secadas hasta que se obtuvo un peso seco al aire constante antes de la prueba.

Todas las muestras fueron medidas y pesadas inmediatamente antes de la prueba para determinar el volumen de cada muestra, su peso seco al aire, y su densidad. La densidad está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Donde:

- ρ : densidad
- m : masa de la probeta
- V : volumen de la probeta

Las pruebas se efectuaron de tal manera que no se produjeron grandes cambios en el contenido de humedad. Según ASTM D143 cuando se ensayan los especímenes deben estar a una temperatura de entre 20 y 23 °C (Figura 26).



Figura 26: Temperatura y humedad relativa en el laboratorio de Resistencia de Materiales

Después de cada ensayo, las muestras se colocaron en un horno a 103 ± 2 °C durante 24 horas para obtener el peso seco al horno. El peso seco al aire y el peso seco al horno se utilizaron para calcular el contenido de humedad de equilibrio a la condiciones ambiente de cada muestra después de que la prueba fue concluida. El peso seco al aire y el volumen de las muestras se utiliza para calcular la densidad seca al aire al momento de la prueba. El proceso de secado al horno post ensayo (Figura 27) se lo realizó en las instalaciones del laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



Figura 27: Secado de probetas a 103 °C durante 24 horas

Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas fueron segregados en las clases de densidad: baja, media y alta. Y se compararon mediante un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre clases.

La norma ASTM D143 especifica que al menos se deben muestrear cinco árboles para obtener resultados representativos sin embargo no especifica el número de probetas a ensayarse, por lo que se tomó en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC 301 en la cual se establece en el numeral 4.6 que por cada uno de los ensayos mecánicos a realizar se requieren de al menos 30 probetas.

3.2. Flexión estática

Para los ensayos de flexión estática se prepararon especímenes de 25 x 25 mm² de sección transversal y longitud de 410 mm como se aprecia en la Figura 28. El ensayo consiste en ubicar la probeta como una viga simplemente apoyada con una longitud entre apoyos de 360 mm y aplicar una carga en el centro del vano, la probeta se colocó de tal manera de que la carga sea aplicada a la superficie tangencial más cercana a la médula.

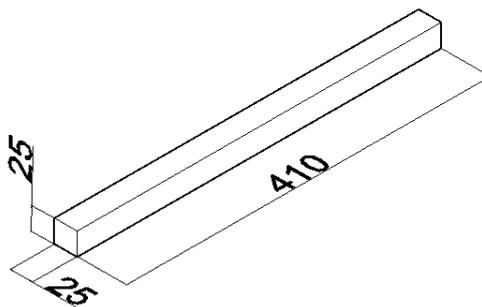


Figura 28: Dimensiones de probeta para ensayo de flexión estática

3.2.1. Materiales y Equipos

- Máquina de ensayos universales MTS TK/T5002 y celda de carga tipo S.
- Celda de carga Quantrol A ± 1 N.
- Memoria USB.
- Balanza KERN A $\pm 0,01$ g.
- Probetas de madera de balsa para ensayos de flexión estática (Figura 29)
- Pie de rey MITUTOYO A $\pm 0,02$ mm.
- Termohigrómetro.



Figura 29: Probetas para ensayo de flexión estática

3.2.2. Procedimiento

- Acoplar el aplicador de fuerza en la celda de carga y la base de acero que formará los apoyos para el ensayo.
- Encender la máquina de ensayos universales y en el touch panel seleccionar la opción: "Calibrar celda". La misma que debe calibrarse

con una carga de 2500N con la ayuda de la celda de carga Quantrol lo cual es apreciable en la Figura 30.

- Por medio del touch panel seleccionar: “Ensayo Tracción/Compresión” y configurar las unidades de fuerza y desplazamiento con las que se tomarán los datos a lo largo del ensayo.
- Posicionar la probeta de madera de tal manera que la carga se aplique en el centro del vano mediante el aplicador de fuerza.
- La carga se debe aplicar de forma continua a lo largo de toda la prueba a una velocidad de 1,3 mm/min hasta que la probeta falle (Figura 31).
- Antes de empezar el ensayo se deben borrar los datos basura y encerrar la carga y el desplazamiento.
- Una vez que el ensayo ha concluido se debe descargar los datos tomados por la máquina con la ayuda de una memoria USB.

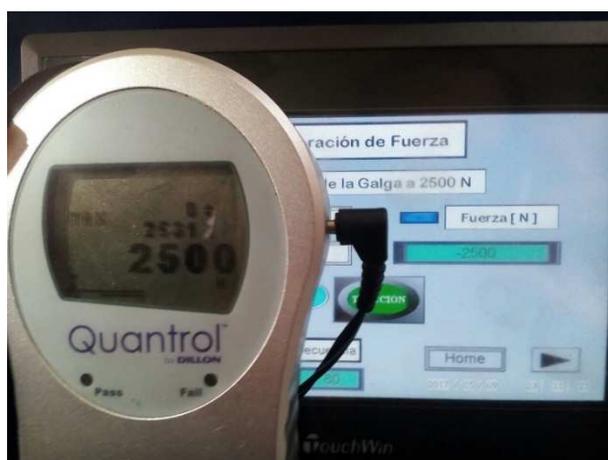


Figura 30: Calibración de celda de carga del equipo a 2500N



Figura 31: Ensayo de flexión en máquina de ensayos universales MTS TK/T5002

3.2.3. Cálculos

El MOE se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$MOE = \frac{PL^3}{48\delta_{m\acute{a}x}I} \quad (5)$$

Donde:

- MOE: módulo de elasticidad.
- P: valor de la carga en la zona elástica.
- L: longitud entre apoyos.
- $\delta_{m\acute{a}x}$: deflexión en el centro de la viga.
- I: inercia de la sección transversal.

El MOR se calculó mediante la siguiente expresión:

$$MOR = \frac{My}{I} \quad (6)$$

Donde:

- MOR: módulo de ruptura.
- M: momento flector máximo.
- y: distancia del eje neutro a la fibra más alejada.
- I: inercia de la sección transversal.

3.3. Compresión paralela a la fibra

Los ensayos de compresión paralela a la fibra se realizaron en especímenes de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ de sección transversal y longitud de 200 mm como se puede observar en la Figura 32. Debe tenerse especial cuidado en la preparación de las muestras asegurando que las superficies cuadradas sean paralelas entre sí y perpendiculares al eje longitudinal.



Figura 32: Dimensiones de probeta para ensayo de compresión paralela a la fibra

3.3.1. Materiales y Equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER (Figura 33).
- Balanza KERN A $\pm 0,01\text{g}$.
- Probetas de madera de balsa para ensayos de compresión paralela a la fibra.
- Pie de rey MITUTOYO A $\pm 0,02\text{mm}$.
- Termohigrómetro.



Figura 33: Máquina de ensayos universales AMSLER

3.3.2. Procedimiento

- Encender el equipo y colocar los topes cilíndricos para realizar el ensayo.
- Colocar la probeta de tal forma que la misma quede en el centro de los topes cilíndricos inferior y superior para que la aplicación de la carga sea uniforme.
- La carga se aplicará de forma continua a lo largo de toda la prueba a una velocidad de 0,6 mm/min.
- La probeta será sometida a carga hasta que llegue a la rotura (Figura 34). Cuando se alcance la carga máxima la máquina detendrá su aguja en dicho valor, el cual debe ser registrado para los cálculos.



Figura 34: Probeta de ensayo de compresión paralela: (A) antes y (B) después del ensayo

3.3.3. Cálculos

La resistencia a la compresión paralela a la fibra está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P_{\text{máx}}}{A} \quad (7)$$

Donde:

- σ : resistencia a la compresión paralela a la fibra.
- $P_{\text{máx}}$: carga máxima.
- A : área de la sección transversal.

3.4. Compresión perpendicular a la fibra

Los ensayos de compresión perpendicular a la fibra se realizaron en muestras de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ de sección transversal y longitud de 150 mm como se observa en la Figura 35. La carga se aplica por medio de una placa metálica cuadrada de 50 mm de lado, colocada a distancias iguales a los extremos, las probetas se colocaron de tal forma que la carga fue aplicada a través de la placa metálica a una superficie radial.

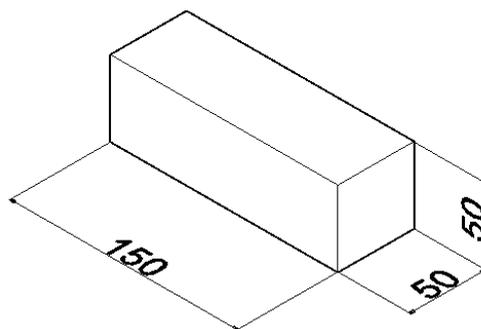


Figura 35: Dimensiones de probeta para ensayo de compresión perpendicular a la fibra

3.4.1. Materiales y Equipos

- Máquina de ensayos universales MTS TK/T5002 y celda de carga tipo S.
- Celda de carga Quantrol A \pm 1N.
- Memoria USB.
- Balanza KERN A \pm 0,01g.
- Probetas de madera de balsa para ensayo de compresión perpendicular a la fibra (Figura 36).
- Pie de rey MITUTOYO A \pm 0,02mm.
- Termohigrómetro.
- Placa de acero cuadrada de 50,40 x 50,30 mm².



Figura 36: Probetas para ensayo de compresión perpendicular a la fibra

3.4.2. Procedimiento

- Encender la máquina y en el touch panel seleccionar la opción: “Calibrar celda”. La misma que debe calibrarse con una carga de 2500N con la ayuda de la celda de carga Quantrol.
- Por medio del touch panel seleccionar: “Ensayo Tracción/Compresión” y configurar las unidades de fuerza y desplazamiento con las que se tomarán los datos a lo largo del ensayo.
- Acoplar la placa aplicadora de fuerza en la celda de carga.
- Posicionar la probeta de madera de tal manera que la carga se aplique en el centro de la misma mediante la placa metálica cuadrada.
- La carga se aplicará de forma continua a lo largo de toda la prueba a una velocidad de 0,305 mm/min hasta que la placa se incruste 2,5 mm después de lo cual debe ser suspendido el ensayo. La compresión se debe medir entre las superficies de contacto.
- Antes de empezar el ensayo se deben borrar los datos basura y encerrar la carga y el desplazamiento.
- Una vez que el ensayo ha concluido se debe descargar los datos tomados por la máquina con la ayuda de una memoria USB.

3.4.3. Cálculos

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (8)$$

Donde:

- σ : resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.
- P: carga en el límite proporcional
- A: área de contacto entre las superficies de madera y acero

3.5. Cizalla paralela a la fibra

Los ensayos de cizalla paralela a la fibra se realizaron en especímenes de 50 x 50 x 63 mm con una muesca como se indica en la Figura 37 para provocar una falla de corte en una superficie de 50 x 50 mm.

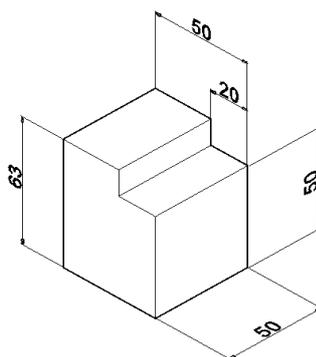


Figura 37: Dimensiones de probeta para ensayo de cizalla paralela a la fibra

3.5.1. Materiales y equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER (Figura 38).
- Balanza KERN A $\pm 0,01g$.
- Probetas de madera de balsa para ensayo de cizalla paralela a la fibra (Figura 39).
- Pie de rey MITUTOYO A $\pm 0,02mm$.
- Termohigrómetro.



Figura 38: Ensayo de cizalla paralela a la fibra

3.5.2. Procedimiento

- Encender el equipo y colocar el accesorio para la sujeción de la probeta.
- Colocar la probeta dentro del accesorio de tal manera que el punzón ejerza una carga cortante a la superficie de $50 \times 50 \text{ mm}^2$.
- La carga se aplicará de forma continua a una velocidad de $0,6 \text{ mm/min}$.

- La probeta será sometida a carga hasta que falle por cortante.
- Cuando se alcance la carga máxima la máquina detendrá su aguja en dicho valor, el cual debe ser registrado para los cálculos.



Figura 39: Probetas para ensayo de cizalla paralela a la fibra

3.5.3. Cálculos

La resistencia a la cizalla está dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{V_{m\acute{a}x}}{A} \quad (9)$$

Donde:

- τ : resistencia a la cizalla paralela a la fibra.
- $V_{m\acute{a}x}$: carga cortante máxima.
- A : área de corte.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y exhiben los resultados de los ensayos mecánicos llevados a cabo en el laboratorio de resistencia de materiales, tales como: flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra y cizalla paralela a la fibra en madera de balsa de procedente de la provincia de Los Ríos.

4.1. Flexión estática

En esta prueba se ensayaron un total de 50 probetas, de las cuales 20 fueron categorizadas en la clase de baja densidad, 23 en la media y 7 en la alta. En promedio el %CH de las probetas ensayadas fue de 11,9%, mostrando una distribución normal (Figura 40).

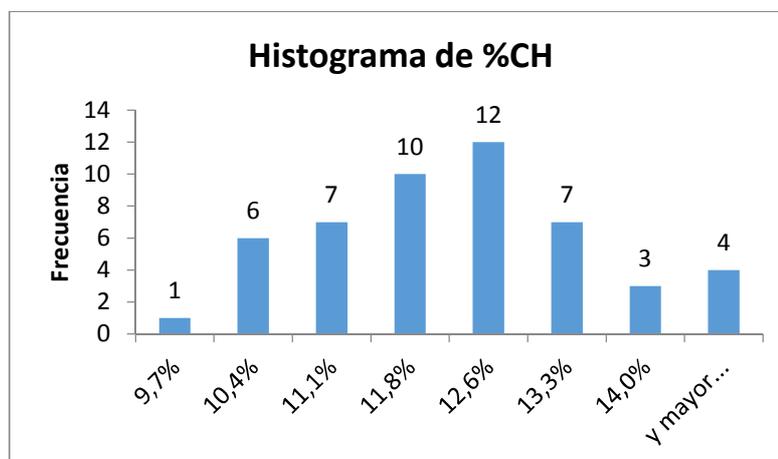


Figura 40: Histograma de frecuencias de %CH en flexión estática

En la Figura 41 se denota que la relación MOE vs densidad tiene una tendencia lineal directamente proporcional, con un valor de $R^2 = 0,9022$ lo cual nos indica que hay una correlación fuerte entre los datos obtenidos y la ecuación de la recta ajustada por mínimos cuadrados. El MOE aumentó en un porcentaje promedio de 67 y 117% en las clases de densidad media y alta con respecto a la clase baja.

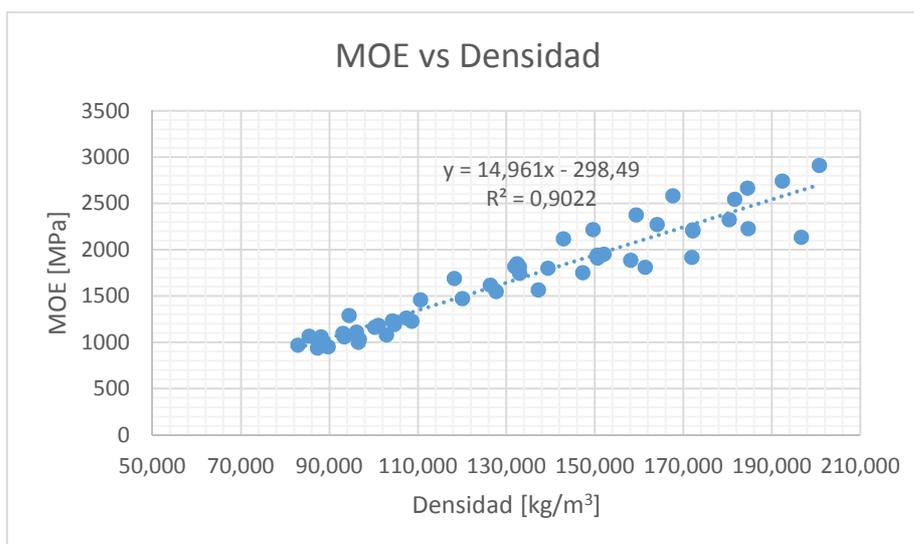


Figura 41: MOE vs Densidad

Analizando la Figura 42 es evidente que la relación MOR vs densidad tiene una tendencia lineal directamente proporcional, con un valor de $R^2 = 0,8941$ lo cual es un indicador de que existe una fuerte correlación entre los datos obtenidos y el modelo matemático ajustado por mínimos cuadrados. El MOR aumentó en un porcentaje promedio de 81 y 160% en las clases de densidad media y alta con respecto a la clase baja.

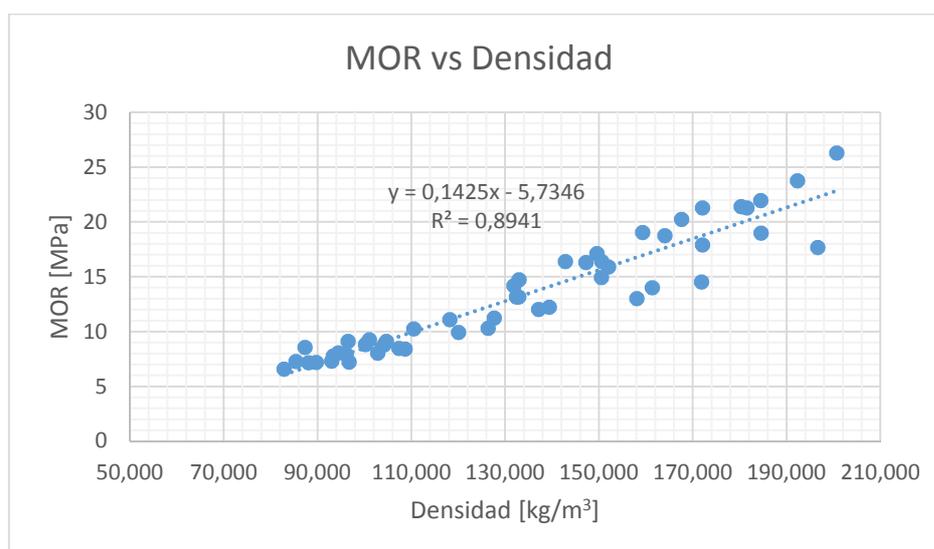


Figura 42: MOR vs Densidad

En la Figura 43 obtenida haciendo una comparación entre MOR vs MOE podemos notar que existe una correlación fuerte entre los datos obtenidos y

la recta ajustada por mínimos cuadrados con un $R^2 = 0,9445$. Es decir que muestras con un alto MOE generan un alto valor de MOR, lo cual también fue reportado por Kotlarewski (2016).

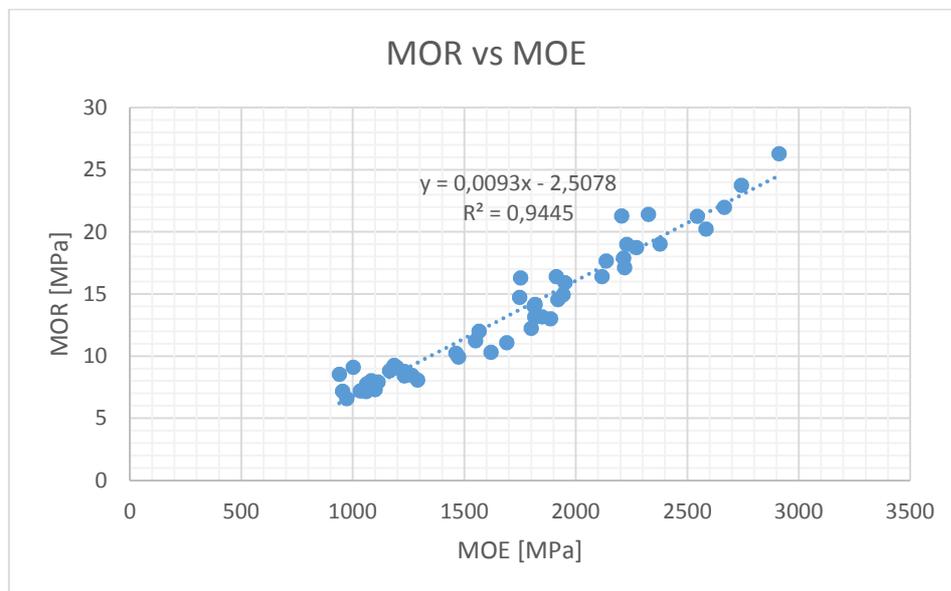


Figura 43: MOR vs MOE

En la Figura 44 se muestran seis diagramas representativos de fuerza vs deflexión donde es apreciable que conforme la densidad incrementa, la pendiente del diagrama es mayor y por lo tanto el MOE también, al mismo tiempo se evidencia que conforme la densidad de la probeta incrementa la fuerza que resiste la probeta es mayor y por lo tanto el MOR también. El diagrama de color naranja y plomo pertenecen a la probetas P1 y P8 (densidad baja) cuyas densidades son 96,47 y 102,81 kg/m^3 respectivamente, el amarillo y azul pertenecen a P35 y P40 (densidad media) cuyas densidades son 120,01 y 149,52 kg/m^3 respectivamente, mientras que el verde y celeste pertenecen a P26 y P36 (densidad alta) cuyas densidades son 184,56 y 200,65 kg/m^3 .

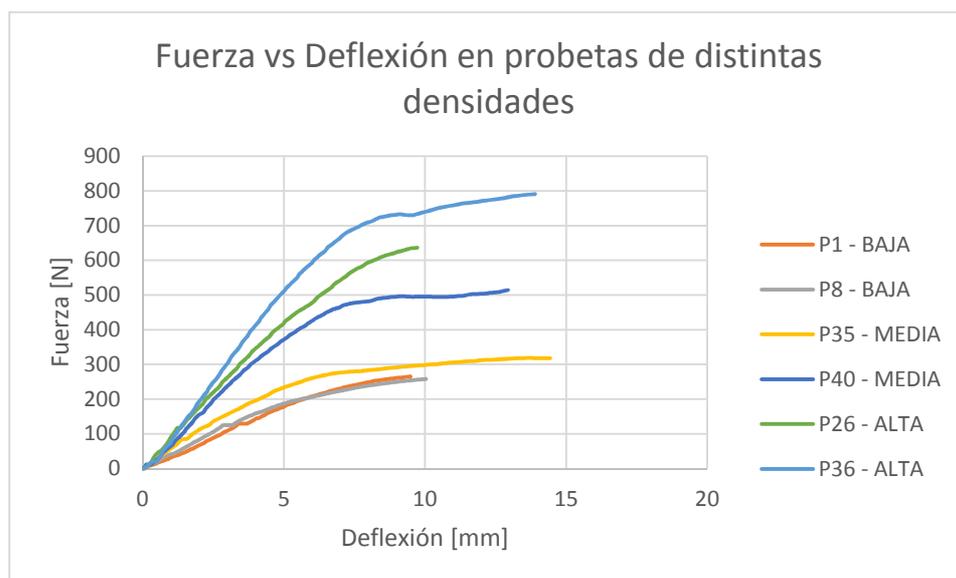


Figura 44: MOR y MOE en probetas de distintas densidades

Los valores promedio de MOE y MOR para la clase de densidad baja fueron de 1154,2 y 8,33 MPa, en la clase de densidad media se encontraron valores de 1929,89 y 15,09 MPa, mientras que en la clase de densidad alta los valores fueron 2507,25 y 21,63 MPa. Los datos estadísticos obtenidos en esta prueba una vez segregada la muestra se resumen en las Tablas 5 y 6 mostradas a continuación:

Tabla 5:
Resultados de MOE para las distintas clases de densidad

CLASE	MOE [MPa]		
	BAJA	MEDIA	ALTA
Media	1154,20	1929,89	2507,25
Mediana	1105,49	1885,30	2544,41
Desviación estándar	180,64	280,68	286,69
Varianza de la muestra	32629,23	78783,05	82191,43
Rango	751,62	1110,63	774,68
Mínimo	938,29	1472,50	2136,00
Máximo	1689,91	2583,13	2910,68
Suma	23083,93	44387,37	17550,74
Cuenta	20	23	7

Tabla 6:
Resultados de MOR para las distintas clases de densidad

CLASE	MOR [MPa]		
	BAJA	MEDIA	ALTA
Media	8,33	15,09	21,63
Mediana	8,26	14,75	21,41
Desviación estándar	1,12	3,07	2,87
Varianza de la muestra	1,25	9,42	8,22
Rango	4,50	11,36	8,64
Mínimo	6,59	9,94	17,67
Máximo	11,09	21,30	26,31
Suma	166,55	347,03	151,41
Cuenta	20	23	7

Los valores promedio de MOE y MOR que se presentan en este estudio en la clase baja son similares a los valores mínimos reportados por Wiselius (1998), además los valores máximos obtenidos por el autor antes mencionado son ligeramente inferiores a los registrados en este estudio en la clase media. Por otra parte Kotlarewski (2016) evidencia valores similares a los registrados en este trabajo. Los dos autores antes mencionados utilizaron balsa de Papua Nueva Guinea. Los valores de Wiselius y Kotlarewski para MOE fueron de 1155-1645 MPa y 1222-2037 MPa respectivamente; mientras que para MOR fueron de 8,5-12,5 MPa y 9,83-16,63 MPa. Cabe destacar que el estudio presentado por Kotlarewski (2016) no posee datos informativos acerca del MOE y MOR de clase alta, a diferencia del presente estudio que tiene una información más completa y detallada. Por otro lado Almeida y Martínez (2017) quienes utilizaron madera procedente de la provincia de Guayas evidencian valores para MOE que son mayores a los de este trabajo en 40 y 57% en las clases media y alta respectivamente. Los datos antes mencionados se resumen en las Figuras 45 y 46:

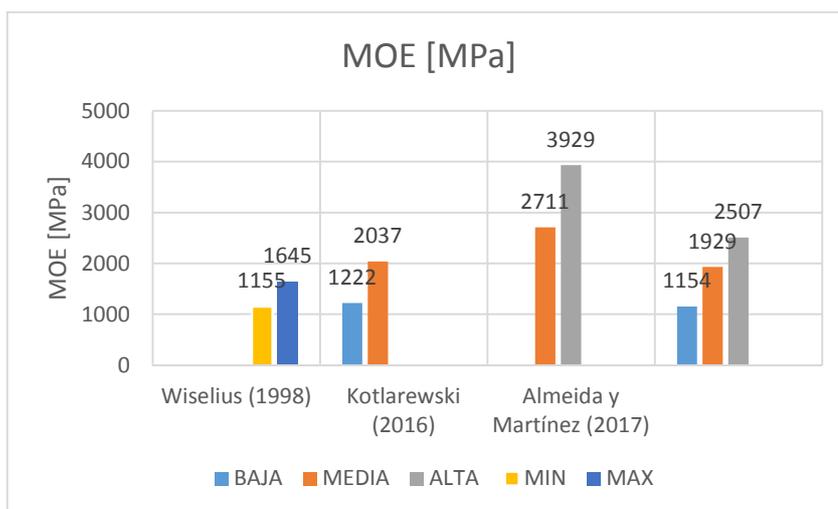


Figura 45: MOE según distintos autores

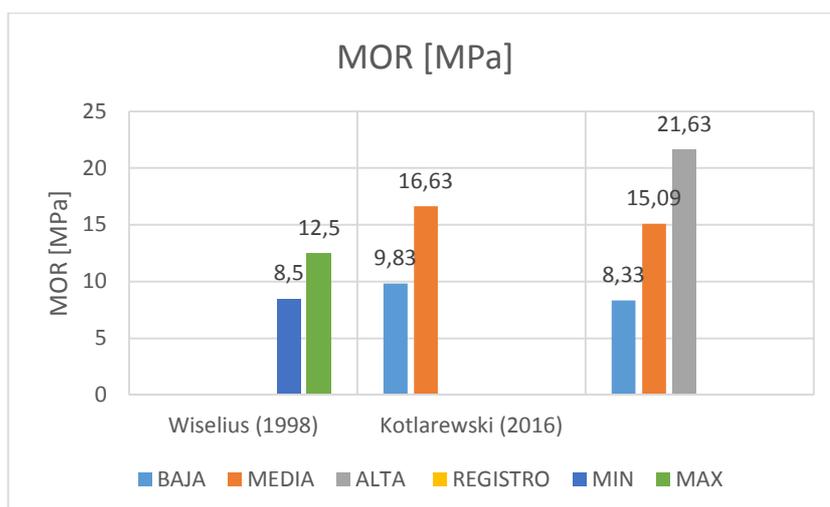


Figura 46: MOR según distintos autores

4.1.1. Análisis de varianza

Para las pruebas estadísticas de ANOVA se suelen utilizar algunos valores para el nivel de significancia α como son: 0,1, 0,05 y 0,01, aunque el más adecuado es 0,05 (Incart, Fuentelsaz, & Pulpón, 2006). Algunos trabajos investigativos de carácter mecánico como el denominado “Esfuerzos cortante y de tensión paralelos a la fibra en madera tropical de crecimiento rápido” elaborado por González y otros (2004) y “Mechanical properties of kenaf / polypropylene: composite” realizado por Loh y otros (2016) utilizan $\alpha=0,05$, además se debe considerar que niveles de significancia más pequeños se

suele utilizar cuando se miden parámetros donde la precisión es un factor fundamental tal como son: medir espesores de pintura o de discos compactos, entre otros . Es por esta razón que en este trabajo se consideró un $\alpha=0,05$ para realizar las pruebas de ANOVA.

En las Tablas 7 y 8 y las Figuras 47 y 48 se describen los intervalos de confianza calculados para MOE y MOR a partir de la prueba ANOVA con un nivel de confianza del 95% ($1 - \alpha$), por lo que podemos decir que el 95% de las veces que se repita este experimento bajo las mismas condiciones, obtendrá como resultado valores promedio dentro de estos rangos.

Tabla 7:
Resumen e intervalos de confianza de 95% para MOE

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
BAJA	20	1154,2	180,6	(1043,5; 1264,9)
MEDIA	23	1929,9	280,7	(1826,7; 2033,1)
ALTA	7	2507	287	(2320; 2694)
Desv.Est. agrupada = 246,09				

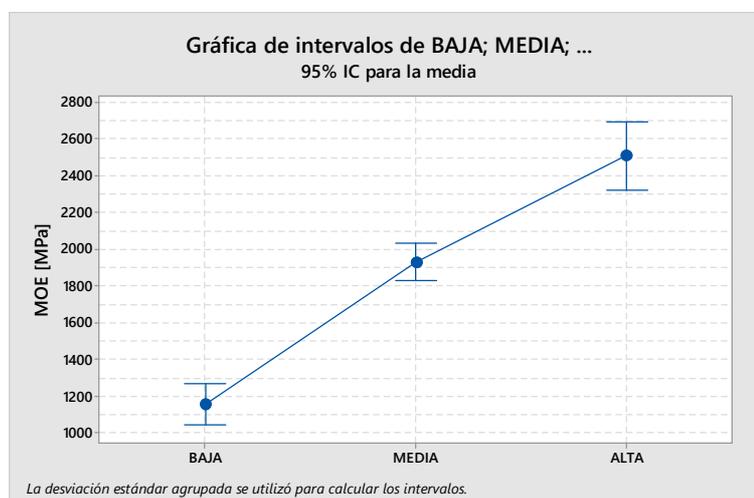


Figura 47: Intervalos de confianza al 95% para MOE

Tabla 8:
Resumen e intervalos de confianza de 95% para MOR

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
BAJA	20	8,33	1,12	(7,23; 9,43)
MEDIA	23	15,09	3,07	(14,06; 16,11)
ALTA	7	21,63	2,87	(19,77; 23,49)
Desv.Est. agrupada = 2,44				

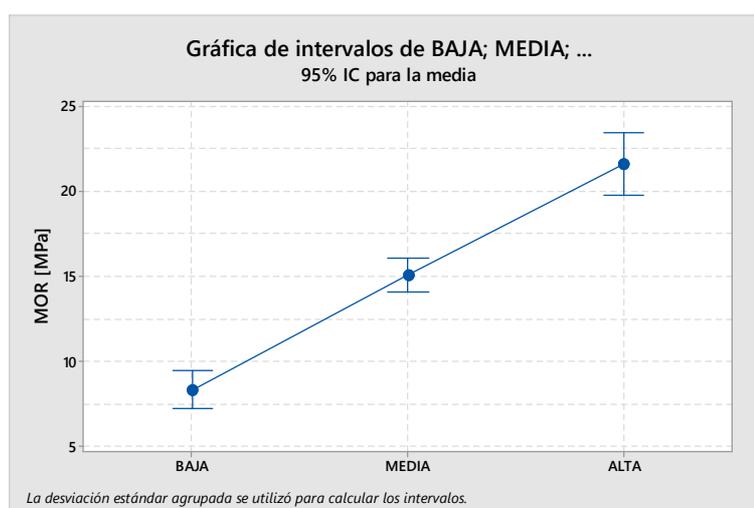


Figura 48: Intervalos de confianza al 95% para MOR

Tabla 9:
Análisis de varianza para MOE con $\alpha = 0,05$

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	11735053	2	5867526,43	96,887	2,12E-17	3,195056
Dentro de los grupos	2846331	47	60560,234			
Total	14581384	49				

Tabla 10:
Análisis de varianza para MOR con $\alpha = 0,05$

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1053,819	2	526,909	88,339	1,2E-16	3,195
Dentro de los grupos	280,339	47	5,964			
Total	1334,157	49				

En el análisis de varianza realizado en la Tabla 9 y 10 se evidencia que los resultados son estadísticamente significativos a un nivel $P < 0,05$ lo que quiere decir que hay una diferencia muy marcada entre las propiedades de MOE y MOR entre cada una de las clases de densidad analizadas.

4.2. Compresión paralela a la fibra

De un total de 50 probetas, 21 fueron categorizadas en la clase de baja densidad, 21 en la media y 8 en la alta. El promedio se obtuvo un de CH para esta prueba fue de 11,4%, mostrando una distribución normal (Figura 49).

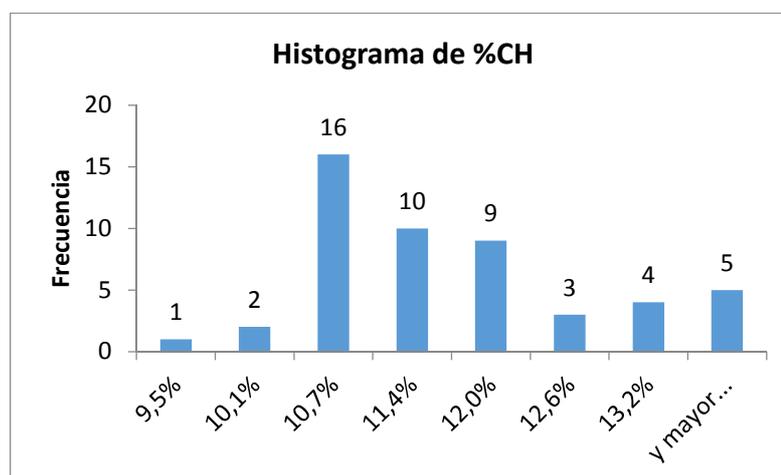


Figura 49: Histograma de frecuencias de %CH en compresión paralela a la fibra

En la Figura 50 se observa que la relación resistencia a la compresión paralela a la fibra vs densidad tiene una tendencia lineal directamente proporcional, con un valor de $R^2 = 0,9063$ lo cual es un indicador de que existe

una fuerte correlación entre los datos obtenidos y el modelo matemático ajustado por mínimos cuadrados. La resistencia a la compresión paralela a la fibra aumentó en un factor promedio de 43 y 124% en las clases de densidad media y alta con respecto a la clase baja.

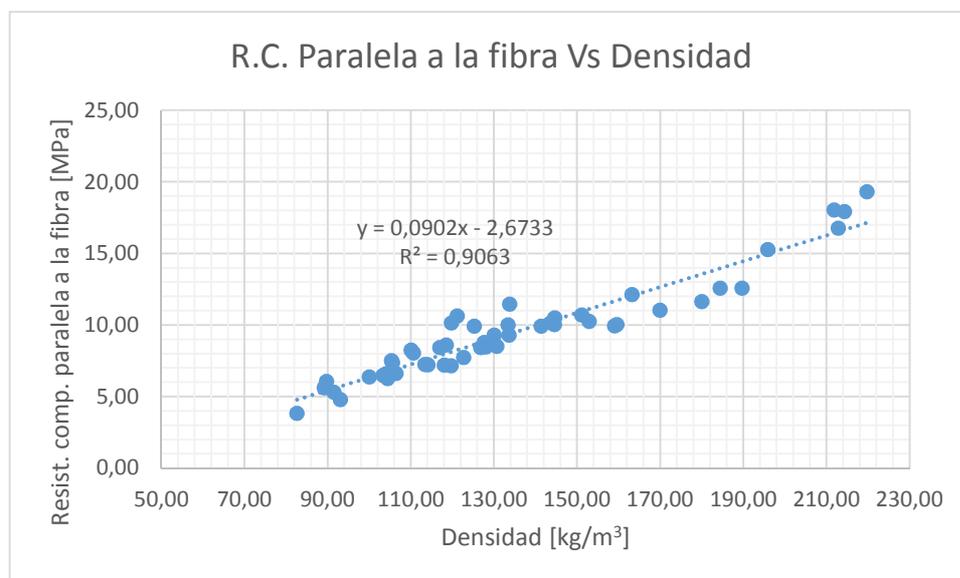


Figura 50: Resistencia a la compresión paralela a la fibra vs Densidad

Los valores promedio de resistencia máxima a la compresión paralela a la fibra para la clase de densidad baja fue de 6,92 MPa, en la clase de densidad media se encontró un valor de 9,88 MPa, mientras que en la clase de densidad alta el valor fue 15,52 MPa. Los datos estadísticos obtenidos en esta prueba una vez segregada la muestra se resume en la Tabla 11 que se muestra a continuación:

Tabla 11:
Resultados de resistencia a la compresión paralela a la fibra para las distintas clases de densidad

Resistencia a la compresión paralela [Mpa]			
CLASE	BAJA	MEDIA	ALTA
Media	6,92	9,88	15,52
Mediana	7,17	10,02	16,03
Desviación estándar	1,41	1,08	2,94
Varianza de la muestra	1,99	1,17	8,65
Rango	6,32	4,40	7,68
Mínimo	3,84	7,74	11,65
Máximo	10,16	12,15	19,32
Suma	145,30	207,50	124,19
Cuenta	21	21	8

El valor registrado por Eddowes (2005) quien utilizó madera procedente de Islas Salomón se encuentra en el centro del rango de los valores encontrados en el presente estudio entre la clase baja y alta. El presente estudio además presenta valores ligeramente superiores a los de Kotlarewski (2016) en 7 y 4% en las clases media y alta respectivamente. Se debe tomar en consideración que el estudio presentado por Kotlarewski (2016) no posee datos informativos acerca de esta propiedad en la clase baja, a diferencia del presente estudio que tiene una información más completa. Los datos antes mencionados se resumen en la Figura 51:

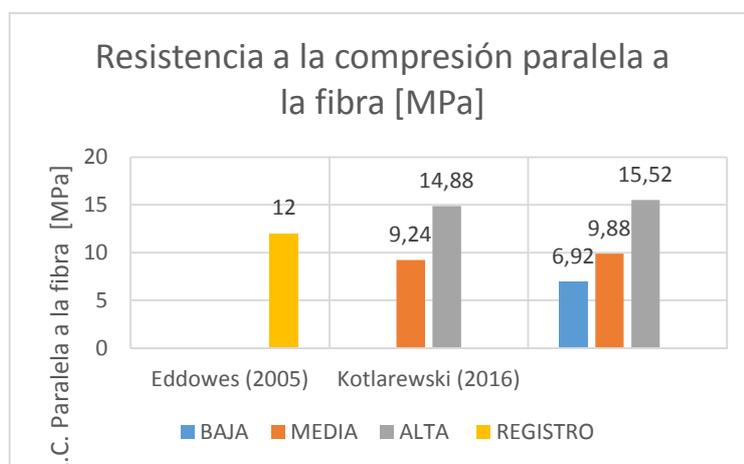


Figura 51: Resistencia a la compresión paralela a la fibra según distintos autores

4.2.1. Análisis de varianza

En la Tabla 12 y la Figura 52 se describen los intervalos de confianza calculados para la resistencia a la compresión paralela a la fibra a partir de la prueba de ANOVA con una confianza del 95%.

Tabla 12:
Resumen e intervalos de confianza de 95% para R.C. Paralela

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
BAJA	21	6,92	1,41	(6,21; 7,63)
MEDIA	21	9,88	1,08	(9,17; 10,59)
ALTA	8	15,52	2,94	(14,37; 16,68)
Desv.Est. agrupada = 1,62				

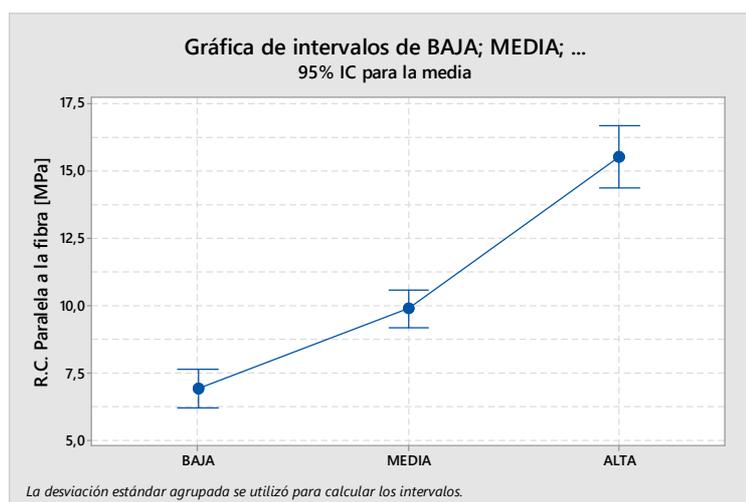


Figura 52: Intervalos de confianza al 95% para R.C. Paralela a la fibra

Tabla 13:
Análisis de varianza para resistencia a la compresión paralela a la fibra con $\alpha = 0,05$

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	433,136	2	216,568	82,344	4,369E-16	3,195
Dentro de los grupos	123,610	47	2,630			
Total	556,746	49				

En el análisis de varianza realizado en la Tabla 13 se evidencia que los resultados son estadísticamente significativos a un nivel $P < 0,05$ lo que quiere decir que hay una diferencia muy marcada entre la resistencia a la compresión paralela a la fibra entre cada una de las clases.

4.3. Compresión perpendicular a la fibra

De un total de 50 probetas, 21 fueron categorizadas en la clase de baja densidad, 16 en la media y 13 en la alta. El promedio de CH de las probetas para esta prueba fue de 11,5%, mostrando una distribución normal (Figura 53).

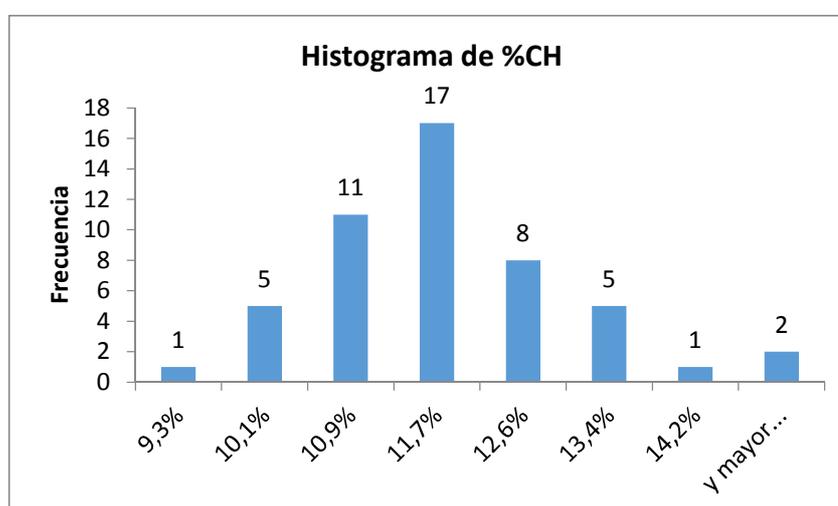


Figura 53: Histograma de frecuencias de %CH en compresión perpendicular a la fibra

En la Figura 54 se observa que la relación resistencia a la compresión perpendicular a la fibra vs densidad tiene una tendencia lineal directamente proporcional, con un valor de $R^2 = 0,8599$ lo cual es un indicador de que existe una fuerte correlación entre los datos obtenidos y el modelo matemático ajustado por mínimos cuadrados. La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra aumentó en un factor promedio de 69 y 114% en las clases de densidad media y alta con respecto a la clase baja.

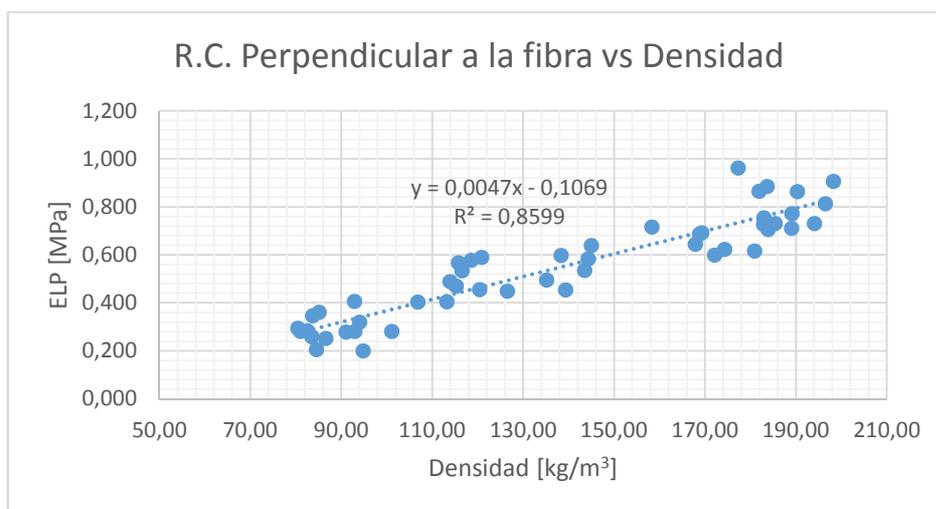


Figura 54: Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra vs Densidad

En la Figura 55 se muestran seis diagramas representativos de fuerza vs desplazamiento donde es apreciable que conforme la densidad incrementa la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en límite proporcional y en 2,5mm de compresión es mayor. El diagrama de color naranja y plomo pertenecen a la probetas P1 y P9 (densidad baja) cuyas densidades son 84,53 y 115,24 kg/m³ respectivamente, el amarillo y azul pertenecen a P40 y P15 (densidad media) cuyas densidades son 168,79 y 172,09 kg/m³ respectivamente, mientras que el verde y celeste pertenecen a P10 y P24 (densidad alta) cuyas densidades son 183,86 y 189,10 kg/m³.

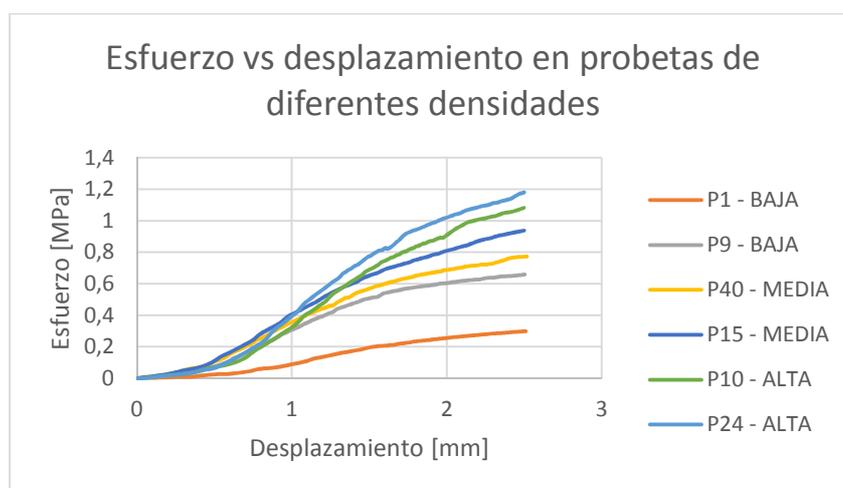


Figura 55: R.C. Perpendicular a la fibra en probetas de distintas densidades

Los valores promedio de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra (esfuerzo en el límite proporcional) para la clase de densidad baja fue de 0,36 MPa, en la clase de densidad media se encontró un valor de 0,61 MPa, mientras que en la clase de densidad alta el valor fue 0,77 MPa. Para este ensayo con fines comparativos al estudio de Kotlarewski (2016) se calculó la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5 mm de compresión, que en promedio para la clase de densidad baja fue de 0,52 MPa, en la clase media fue 0,89 MPa, mientras que en la clase de densidad alta fue 1,13 MPa. Los datos estadísticos obtenidos en esta prueba una vez segregada la muestra se resumen en la Tabla 14 y 15 mostradas a continuación:

Tabla 14:
Resultados de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra para distintas clases de densidad

<i>Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra [Mpa]</i>			
<i>CLASE</i>	<i>BAJA</i>	<i>MEDIA</i>	<i>ALTA</i>
Media	0,36	0,61	0,77
Mediana	0,32	0,60	0,75
Desviación estándar	0,11	0,13	0,09
Varianza de la muestra	0,01	0,02	0,01
Rango	0,38	0,51	0,29
Mínimo	0,20	0,45	0,62
Máximo	0,58	0,96	0,91
Suma	7,49	9,72	10,07
Cuenta	21	16	13

Tabla 15:

Resultados de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5 mm de compresión para las distintas clases de densidad

Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5 mm de compresión [Mpa]			
CLASE	BAJA	MEDIA	ALTA
Media	0,52	0,89	1,13
Mediana	0,46	0,90	1,13
Desviación estándar	0,16	0,15	0,10
Varianza de la muestra	0,03	0,02	0,01
Rango	0,49	0,51	0,40
Mínimo	0,30	0,67	0,96
Máximo	0,79	1,18	1,36
Suma	10,84	14,29	14,74
Cuenta	21	16	13

Kotlarewski (2016) presenta valores ligeramente superiores a los de este estudio en 23 y 28% en las clase baja y media respectivamente. Cabe recalcar que el estudio presentado por Kotlarewski (2016) no posee datos informativos acerca de esta propiedad en la clase alta, a diferencia del presente estudio que tiene una información más completa. Los datos antes mencionados se resumen en la Figura 56:

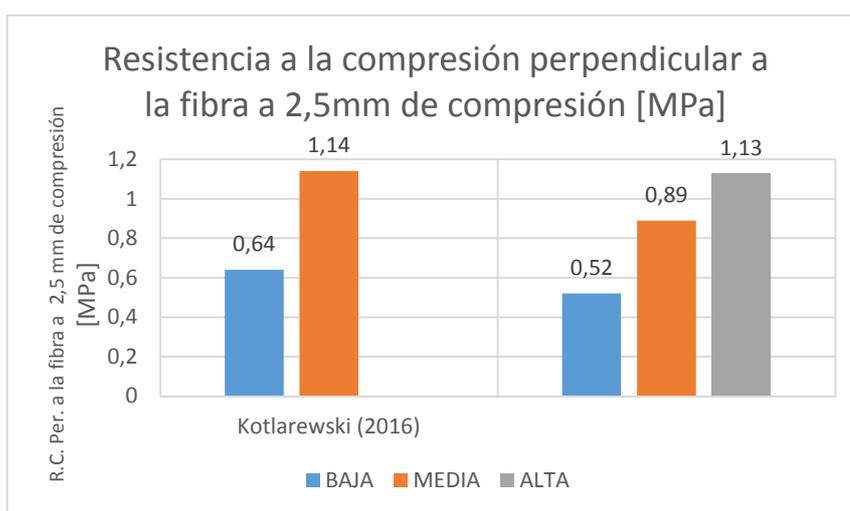


Figura 56: Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a 2,5mm de compresión según distintos autores

4.3.1. Análisis de varianza

En la Tabla 16 y la Figura 57 se describen los intervalos de confianza calculados para la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra a partir de la prueba de ANOVA con una confianza del 95%

Tabla 16:
Resumen e intervalos de confianza de 95% para R.C. Perpendicular a la fibra

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
BAJA	21	0,36	0,12	(0,31; 0,41)
MEDIA	16	0,61	0,13	(0,55; 0,66)
ALTA	13	0,77	0,09	(0,71; 0,84)
Desv.Est. agrupada = 0,11				

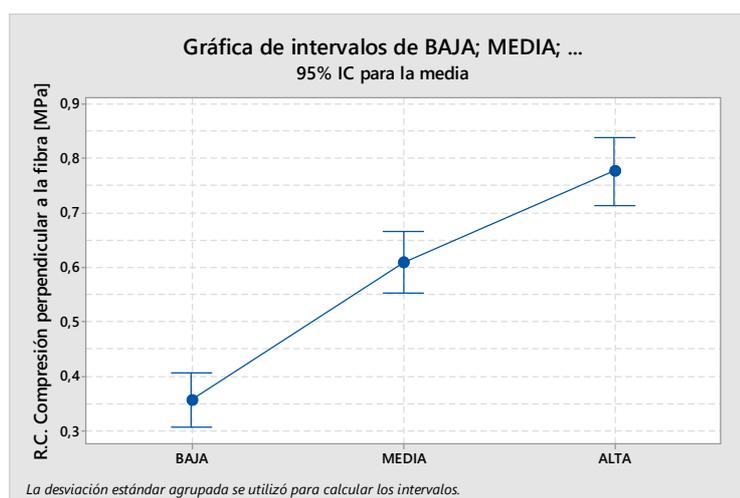


Figura 57: Intervalos de confianza al 95% para R.C. Perpendicular a la fibra

Tabla 17:
Análisis de varianza para resistencia a la compresión perpendicular a la fibra con $\alpha = 0,05$

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,494	2	0,747	58,9	1,57E-13	3,195
Dentro de los grupos	0,596	47	0,013			
Total	2,090	49				

En el análisis de varianza realizado en la Tabla 17 se evidencia que los resultados son estadísticamente significativos a un nivel $P < 0,05$ lo que quiere decir que hay una diferencia muy marcada entre la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra entre cada una de las clases.

4.4. Cizalla paralela a la fibra

En esta prueba se ensayaron un total de 50 probetas, de las cuales 17 fueron categorizadas en la clase de baja densidad, 25 en la media y 8 en la alta. El CH promedio en esta prueba fue de 12,2%, mostrando una distribución normal (Figura 58).

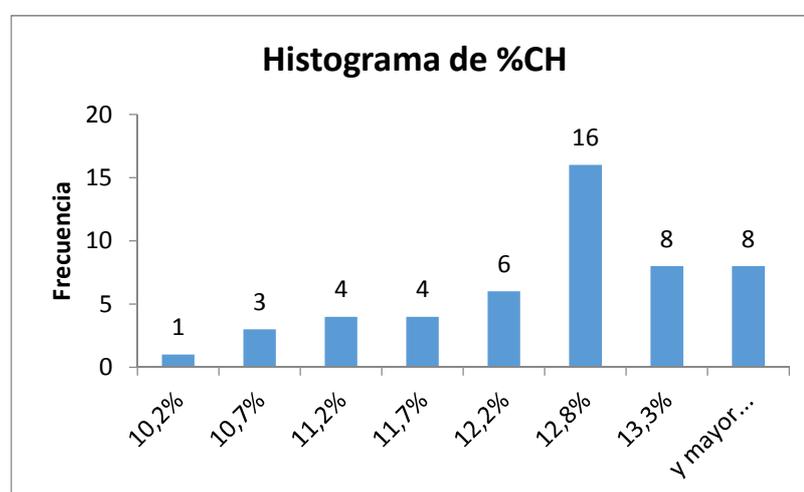


Figura 58: Histograma de frecuencias de %CH en cizalla paralela a la fibra

En la Figura 59 se observa que la relación resistencia a la compresión perpendicular a la fibra vs densidad tiene una tendencia no lineal directamente proporcional, con un valor de $R^2 = 0,8523$ lo cual es un indicador de que existe una fuerte correlación entre los datos obtenidos y el modelo matemático ajustado por mínimos cuadrados. La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra aumentó en un factor promedio de 39 y 139% en las clases de densidad media y alta con respecto a la clase baja.

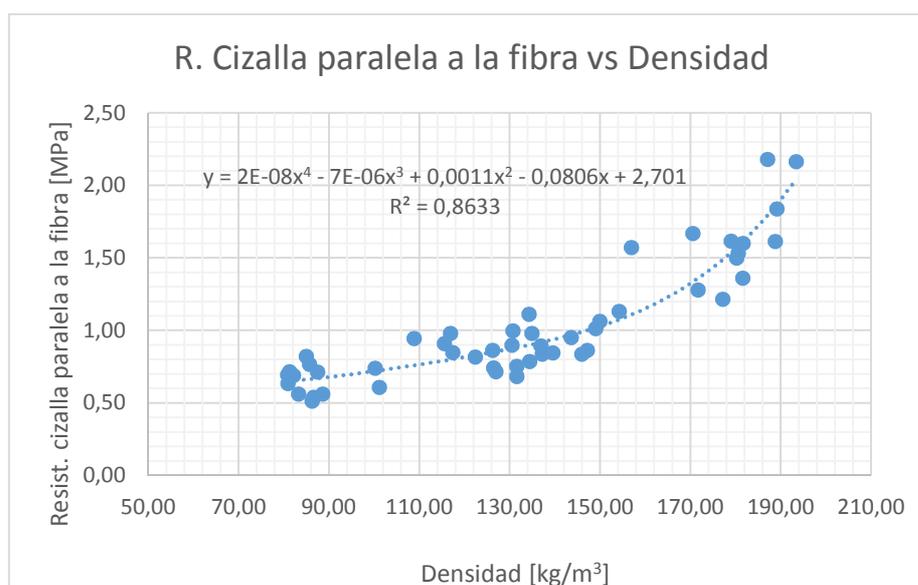


Figura 59: Resistencia a la cizalla paralela a la fibra vs Densidad

Los valores promedio de resistencia máxima a la cizalla paralela a la fibra para la clase de densidad baja fueron de 0,72 MPa, en la clase de densidad media se encontró un valor de 1,00 MPa, mientras que en la clase de densidad alta el valor fue 1,72 MPa. Los datos estadísticos obtenidos en esta prueba una vez segregada la muestra se resumen en la Tabla 18 mostrada a continuación:

Tabla 18:
Resultados de resistencia a la cizalla paralela a la fibra para las distintas clases de densidad

Resistencia a la cizalla paralela a la fibra [MPa]			
CLASE	BAJA	MEDIA	ALTA
Media	0,72	1,00	1,72
Mediana	0,71	0,90	1,61
Desviación estándar	0,14	0,28	0,31
Varianza de la muestra	0,02	0,08	0,09
Rango	0,47	0,98	0,82
Mínimo	0,51	0,68	1,36
Máximo	0,98	1,67	2,18
Suma	12,22	25,12	13,78
Cuenta	17	25	8

El valor promedio de resistencia a la cizalla paralela a la fibra que se presenta en este estudio en la clase alta es el único que supera al valor

registrado por Tsoumis (1991). Mientras que Kotlarewski (2016) presenta valores superiores a los de este estudio en 116 y 90% en las clases baja y media respectivamente. Debe considerarse que el estudio presentado por Kotlarewski (2016) no posee datos informativos acerca de esta propiedad en la clase alta, a diferencia del presente estudio que tiene una información más completa. Los datos antes mencionados se resumen en la Figura 60:

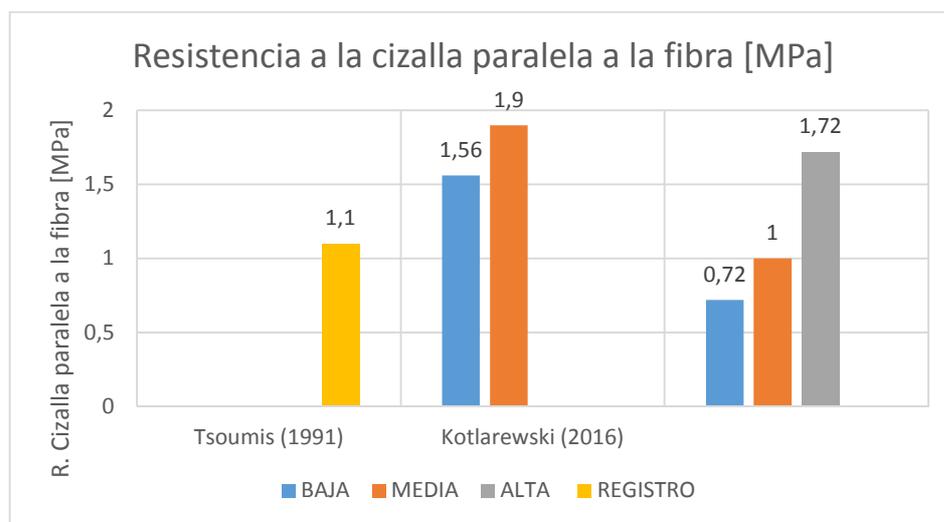


Figura 60: Resistencia a la cizalla paralela a la fibra según distintos autores

4.4.1. Análisis de varianza

En la Tabla 19 y la Figura 61 se describen los intervalos de confianza calculados para la resistencia a la cizalla paralela a la fibra a partir de la prueba de ANOVA con una confianza del 95%.

Tabla 19:
Resumen e intervalos de confianza de 95% para R. Cizalla paralela a la fibra

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
BAJA	17	0,72	0,14	(0,59; 0,84)
MEDIA	25	1,00	0,28	(0,91; 1,10)
ALTA	8	1,72	0,31	(1,55; 1,89)
Desv.Est. agrupada = 0,25				

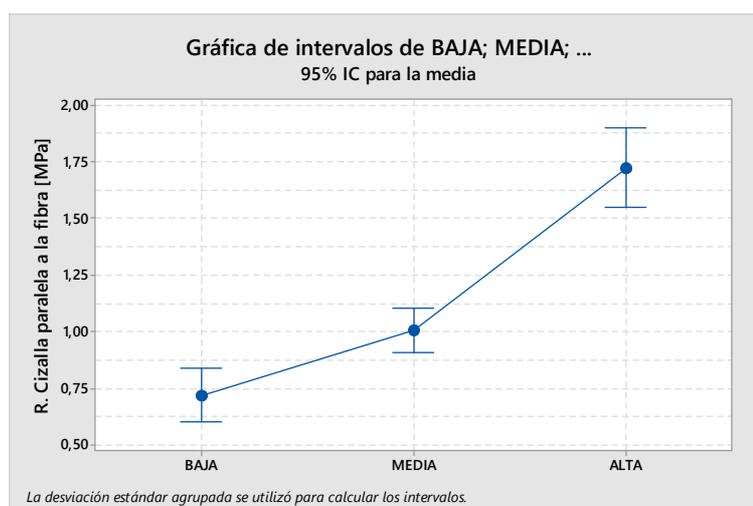


Figura 61: Intervalos de confianza al 95% para R. Cizalla paralela a la fibra

Tabla 20:

Análisis de varianza para resistencia a la cizalla paralela a la fibra con $\alpha = 0,05$

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5,489	2	2,745	45,620	9,76E-12	3,195
Dentro de los grupos	2,828	47	0,060			
Total	8,317	49				

En el análisis de varianza realizado en la Tabla 20 se evidencia que los resultados son estadísticamente significativos a un nivel $P < 0,05$ lo que quiere decir que hay una diferencia muy marcada entre la resistencia a la cizalla paralela a la fibra entre cada una de las clases.

5. Resumen de resultados

Los valores mostrados en la Tabla 21 muestran los valores promedio obtenidos en este estudio, la desviación estándar entre paréntesis y el número de especímenes ensayados entre corchetes.

Tabla 21:
Resumen de resultados

Clase de densidad	BAJA		MEDIA		ALTA	
MOE [MPa]	1154,2 (180,64)	[20]	1929,89 (280,68)	[23]	2507,25 (286,69)	[7]
MOR [MPa]	8,33 (1,12)	[20]	15,09 (3,07)	[23]	21,63 (2,87)	[7]
Res. Comp. Paralela a la fibra [MPa]	6,92 (1,41)	[21]	9,88 (1,08)	[21]	15,52 (2,94)	[8]
Res. Comp. Perpendicular a la fibra [MPa]	0,36 (0,11)	[21]	0,61 (0,13)	[16]	0,77 (0,09)	[13]
Res. Cizalla paralela a la fibra [MPa]	0,72 (0,14)	[17]	1 (0,28)	[25]	1,72 (0,31)	[8]

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Para madera de balsa cuya densidad varía en el rango de 80 a 220 kg/m³, se determinó que:

- Los valores de MOE se encuentran en un rango de 938,3 a 2910,7 MPa mientras que los valores de MOR varían de 6,6 a 26,3 MPa, la resistencia a la compresión paralela a la fibra se encuentra en el rango de 3,8 a 19,3 MPa, la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra varía en el rango de 0,2 a 0,96 MPa, mientras la resistencia a la cizalla paralela a la fibra se encuentra en el rango de 0,5 a 2,2 MPa.
- Se comprobó estadísticamente mediante el ANOVA calculado para todas las pruebas mecánicas ejecutadas que existe una diferencia significativa entre las propiedades de mecánicas de cada una de las clases de densidad de balsa analizadas en este estudio experimental. Aquello lo podemos evidenciar debido a que el valor de P es muy bajo en relación al nivel de significancia α utilizado en las pruebas estadísticas.
- Al hacer un análisis comparativo entre cada una de las clases de densidad y las propiedades mecánicas medidas en este trabajo se determinó que el MOE, el MOR y la resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra varían de manera lineal proporcional con respecto a la densidad de la madera de balsa, en tanto que la resistencia a la cizalla tiene un patrón similar excepto porque tiene un comportamiento no lineal. El MOE se incrementó en un porcentaje promedio de 67 y 117%, el MOR en un porcentaje de 81 y 160%, la resistencia a la compresión paralela y perpendicular en un porcentaje de 43 y 124% y de 69 y 114% respectivamente, mientras que la resistencia a la cizalla en un porcentaje de 39 y 139%, en las clases media y alta respectivamente en relación a la clase baja.

- Se determinó que el MOE es un parámetro cuyo valor también puede ser útil para predecir el valor de MOR en caso de que no se lleve la probeta hasta la rotura o se utilice algún método de medición alternativo, ya que tienen una relación lineal directamente proporcional con un $R^2 = 0,9445$.
- Existe variabilidad entre los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación en comparación a los trabajos de Kotlarewski (2016), Almeida y Martínez (2017) y ello a la heterogeneidad de la madera lo cual es debido a las condiciones climáticas (lluvia, viento, entre otras), topografía y suelo del lugar de procedencia de la madera, ya que ello influye en el desarrollo del árbol y por ende sus características físicas y mecánicas.

6.2. Recomendaciones

- Para estudios posteriores similares al presentado en este trabajo es recomendable utilizar procedimientos que establecen normas internacionales tales como la ASTM D143, de tal forma de que los resultados obtenidos sean confiables.
- Es necesario verificar que los árboles muestreados estén totalmente libre de defectos tales como: nudos, perforaciones por polilla u otro defecto. Además de que tengan una buena rectitud y buen estado fitosanitario.
- Es importante realizar un buen procedimiento en la preparación de las muestras de madera, empezando por la etapa de selección y secado, hasta la etapa de la realización de los ensayos mecánicos.
- Es recomendable el uso de emulsión de parafina que ayuda a reducir el agrietamiento de la madera de balsa ocasionado por el gradiente de deshidratación de la madera al momento de ser cortada en estado verde.

- Para futuros estudios se recomienda realizar análisis similares en otras regiones del Ecuador tales como Guayas, Santo Domingo, etc. para tener una muestra más representativa de la madera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F., & Martínez, M. (2017). *Caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador*. Sangolquí.
- ASTM. (2014). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. Pennsylvania.
- BALSA PNG. (s.f.). *PNG BALSA natures tough alternative*. Obtenido de <http://pngbalsa.com/products-detail.php?Flexible-End-Grain-Balsa-Panel-Sheet-2>
- Bergander, A., & Salmén, L. (2002). Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *J Mater Sci* 37, 151-156.
- Bonet, X., Coello, J., & Andrade, H. (2009). *Balsa, Earth, Sun and Water. General aspects about balsa wood as core material for sandwich construction*. Balseurop Ecuato Española, SL.
- Borrega, M., & Gibson, L. (2015). Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*.
- Borrega, M., Ahvenainen, P., Serimaa, R., & Gibson, L. (2015). Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Wood Science Technology*, 403-420.
- Da Silva, A., & Kyriakides, S. (2007). Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*, 8685-8717.
- Easterling, K., Harrysson, R., Gibson, L., & Ashby, M. (1982). On the mechanics of Balsa and Other Woods. *Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*.
- Euronews. (23 de Julio de 2016). *Corporación Euronews*. Obtenido de <http://www.euronews.com/bienvenido.html>
- Fletcher, M. I. (1951). Balsa - Production and Utilization. *Economic Botany*, 107-125.

- Francis, J. (1991). *Ochroma pyramidale Cav.* New Orleans.
- Gibson, L., & Ashby, M. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (Segunda ed.). Cambridge.
- Glass, M., & Zelinka, S. (2010). *Wood Handbook: wood as an Engineering Material*. Madison.
- González, B., Cervantes, X., Torres, E., Sánchez, C., & Simba, L. (2010). Caracterización del cultivo de balsa (*Ochroma pyramidale*) en la provincia de Los Ríos - Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7-11.
- Gracia, C. (2011). La madera: estructura, función, formación y mantenimiento. En C. Gracia, *Ecología Forestal: Estructura, Funcionamiento y Producción de las masas forestales* (págs. 221-259). Barcelona.
- Incart, M., Fuentelsaz, C., & Pulpón, A. (2006). *Elaboración y presentación de un proyecto de investigación y una tesina*. Barcelona: UBe.
- Kotlarewski, N., Belleville, B., Gusamo, B., & Ozarska, B. (2016). Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. *European Journal of wood and wood products*, 83-89.
- Krestchmann, D. (2010). *Wood Handbook: wood as an Engineering Material*. Madison.
- Longwood, F. (1971). *Present and Potencial: Commercial Timbers of The Caribbean*. Washington, D.C.
- Meruane, V., del Fierro, V., & Ortiz-Bernardin, A. (2014). A Maximum Entropy Approach to Assess Debonding in Honeycomb Plates. *Open Access*.
- Midgley, S., Blyth, M., Howcroft, N., Midgley, D., & Brown, A. (2010). *Balsa: biology, production and economics in Papua New Guinea*. Canberra: ACIAR.
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Aprovechamiento de recursos forestales en el Ecuador y procesos de infracciones de decomisos*. Quito.

- Newaz, G., Mayeed, M., & Rasul, A. (2016). Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis. *Journal of Materials Design and Applications*, 206-218.
- Osei-Antwi, M., de Castro, J., Vassilopoulos, A., & Keller, T. (2013). Shear mechanical characterization of balsa wood as core material of composite sandwich panels. *Construction and Building Materials*, 231-238.
- PROEQUADOR. (2013). Boletín de Análisis de Mercados Internacionales. Ecuador.
- Shishkina, O., Lomov, S., Verpoest, I., & Gorbatikh, L. (2014). Structure–property relations for balsa wood as a function of density: modelling approach. *Archive of Applied Mechanics*, 789-805.
- Wiedenhoeft, A. (2010). *Wood Handbook: wood as an Engineering Material*. Madison.