

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**“EVALUACIÓN DE TABLEROS MDF PRODUCIDOS CON RESIDUOS  
DE MADERA DE BOLAINA BLANCA (*Guazuma crinita* Mart.)  
PROVENIENTE DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE  
INGENIERO FORESTAL**

**JOSÉ ALBERTO CIPRA RODRIGUEZ**

**LIMA – PERÚ**

**2020**

---

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**“EVALUACIÓN DE TABLEROS MDF PRODUCIDOS CON RESIDUOS  
DE MADERA DE BOLAINA BLANCA (*Guazuma crinita* Mart.)  
PROVENIENTE DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL  
JOSÉ ALBERTO CIPRA RODRIGUEZ**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

---

*Mg. Sc. Miguel Ángel Meléndez Cárdenas  
Presidente*

---

*Mg. Sc. Aldo Joao Cárdenas Oscanoa  
Miembro*

---

*Mg. Sc. Rolando Antonio Montenegro Muro  
Miembro*

---

*PhD. Héctor Enrique Gonzales Mora  
Asesor*

## *DEDICATORIA*

*A mi familia, Inés, José, Marco y Maricielo por los abrazos, los besos, las risas, las lágrimas y por su amor incondicional y constante.*

*A mi mamá Albina, a mi mamá Herminia y a mi tía Nelly por ser mis ejemplos de fortaleza y amor.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas:*

*Al Vicerrectorado de Investigación de la UNALM por el financiamiento mediante la subvención de tesis de pregrado según Resolución N°0597-2012-CU-UNALM 2013.*

*A mi asesor Ph D. Héctor Enrique Gonzáles Mora, por la paciencia y disposición a apoyarme en cada etapa de mi investigación, así como sus consejos desde el inicio del proyecto hasta el día de la sustentación.*

*A los miembros de jurado Mg. Sc. Miguel Meléndez, Mg. Sc. Aldo Cárdenas, y Mg. Sc. Rolando Montenegro por las correcciones y aportes a mi tesis.*

*Al profesor Mg. Sc. Moises Acevedo por las facilidades para ejecutar los ensayos en el laboratorio y por los aportes a mi investigación.*

*Al profesor Mg. Sc. Julio Canchucaja por sus conversaciones y consejos que me han ayudado mucho en mi última etapa en la universidad.*

*A la Mg. Sc. Deysi Guzmán y al Mg. Sc. César López por la valiosa ayuda en los procedimientos dentro de los laboratorios.*

*A la Mg. Sc. Maricel Móstiga por todas sus enseñanzas y consejos a lo largo de mi vida universitaria y por su invaluable amistad.*

*Al Sr. Enrique Cabrera, al Sr. Vicente Cuba, y a Sr. Marco Panduro por su apoyo a lo largo de la investigación.*

*A Bach. Adrian Tapia por su apoyo en Pucallpa.*

*A Shirley Diaz, Gemali Huayta, Gabriela Casimiro, Jhonaly Marchand, Keny Castro, Erick Mariño y a mis amigos del Círculo de Investigación de Plantaciones Forestales (CIPLAN FORESTAL) Deysi Mendo, Shaloom Salas, Gimena Lázaro, Óscar Parco, Yordi Príncipe y María Cuno por su gentil disposición a ayudarme en diferentes etapas de la investigación.*

*A Jhon, Paola, Clemente y Alexis por los momentos de amistad que siempre atesoraré.*

# ÍNDICE GENERAL

Página

DEDICATORIA.....	ivv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Descripción de la especie bolaina blanca .....	3
2.1.1. Taxonomía .....	3
2.1.2. Descripción botánica.....	3
2.1.3. Distribución geográfica.....	4
2.1.4. Anatomía de la madera .....	4
2.1.5. Propiedades físicas y mecánicas de la madera.....	6
2.1.6. Análisis químico de la madera .....	8
2.2. Plantaciones forestales de la especie bolaina blanca .....	8
2.3. Descripción de la materia prima .....	9
2.3.1. Residuos de madera .....	9
2.4. Insumos para la elaboración de tableros MDF .....	13
2.4.1. Pulpa celulósica .....	13
2.4.2. Resinas sintéticas .....	16
2.5. Tableros MDF.....	19
2.5.1. Fabricación de tableros MDF.....	20
2.5.2. Industria de tableros MDF .....	22

2.6. Propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF .....	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	29
3.1. Lugar de ejecución.....	29
3.2. Materiales y equipos .....	29
3.2.1. Materiales.....	29
3.2.2. Equipos .....	30
3.2.3. Insumos .....	31
3.3. Métodos y procedimientos.....	32
3.3.1. Flujograma .....	32
3.3.2. Astillas de madera de bolaina blanca.....	34
3.3.3. Producción de pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP).....	39
3.3.4. Caracterización química.....	45
3.3.5. Elaboración de tableros MDF .....	46
3.3.6. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	49
3.3.7. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF.....	49
3.3.8. Diseño experimental .....	52
3.3.9. Análisis estadístico.....	52
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1. Caracterización de las astillas de madera .....	54
4.1.1. Limpieza de las astillas de madera.....	54
4.1.2. Evaluación de las astillas de madera.....	54
4.1.3. Clasificación de las astillas de madera.....	56
4.2. Caracterización de las pulpas celulósicas .....	57
4.3. Caracterización morfológica de las fibras clasificadas.....	60
4.3.1. Clasificación de fibras.....	60
4.3.2. Parámetros morfológicos de las fibras.....	63
4.4. Caracterización química de astillas y pulpas .....	66
4.5. Propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF .....	69
4.5.1. Densidad .....	71
4.5.2. Contenido de humedad (CH) .....	74

4.5.3. Hinchamiento del espesor de tablero a las 2 y 24 horas de inmersión en agua .....	75
4.5.4. Módulo de ruptura (MOR).....	78
4.5.5. Módulo de elasticidad (MOE) .....	81
4.5.6. Tracción perpendicular a las caras del tablero (TP).....	82
V. CONCLUSIONES .....	84
VI. RECOMENDACIONES .....	85
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	86
VIII. ANEXOS.....	104

## Índice de tablas

Página

<b>Tabla 1:</b> Características microscópicas de madera de bolaina blanca proveniente de plantaciones forestales.....	5
<b>Tabla 2:</b> Propiedades físicas de la madera de bolaina blanca proveniente de bosque natural y plantaciones forestales.....	6
<b>Tabla 3:</b> Propiedades mecánicas de la madera de bolaina blanca proveniente de bosque natural y plantaciones forestales.....	7
<b>Tabla 4:</b> Análisis químico de la madera de bolaina blanca proveniente de una plantación de cuatro años.....	8
<b>Tabla 5:</b> Requerimientos de propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF según la norma europea EN 622-5, MASISA, SONAE ARAUCO y ARAUCO .....	28
<b>Tabla 6:</b> Condiciones de los pretratamientos de astillas de madera de bolaina blanca.....	40
<b>Tabla 7:</b> Cantidad y dimensiones de las probetas de los tableros MDF.....	50
<b>Tabla 8:</b> Pureza de astillas y fracción de corteza de los residuos de madera de bolaina blanca en tres etapas .....	54
<b>Tabla 9:</b> Características de las astillas de madera de bolaina blanca .....	56
<b>Tabla 10:</b> Clasificación granulométrica, espesor medio y relación cantidad/peso de las astillas de madera clasificadas de bolaina blanca.....	56
<b>Tabla 11:</b> Rendimiento, Solubilidad en NaOH al uno por ciento y drenabilidad de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP).....	59
<b>Tabla 12:</b> Clasificación de fibras por el método de <i>Bauer McNett</i> de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP) .....	60
<b>Tabla 13:</b> Mediciones de las fibras de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP), evaluadas en el equipo <i>Morfi compact</i> .....	63
<b>Tabla 14:</b> Caracterización química de astillas de madera y pulpas RMP y CMP de bolaina blanca .....	66
<b>Tabla 15:</b> Propiedades físicas y mecánicas de los cuatros tipos de tableros MDF .....	70

## *Índice de figuras*

	Página
<b>Figura 1:</b> Proceso de fabricación de tableros MDF .....	21
<b>Figura 2:</b> Producción mundial de tableros de madera 2012-2016.....	22
<b>Figura 3:</b> Producción mundial de tableros de fibras 2012-2016 .....	23
<b>Figura 4:</b> Exportación e importación de tableros de fibra de Perú en el periodo 2000-2017 .	24
<b>Figura 5:</b> Exportación de tableros de madera de Perú en el periodo 2000-2017 .....	25
<b>Figura 6:</b> Importación de tableros de madera de Perú en el periodo 2000-2017 .....	26
<b>Figura 7:</b> Flujograma del proceso de elaboración de los tableros MDF en laboratorio .....	32
<b>Figura 8:</b> Componentes de los procesos y análisis realizados.....	33
<b>Figura 9:</b> Ubicación de la planta industrial de transformación de madera de bolaina blanca.	34
<b>Figura 10:</b> Planta industrial de transformación de madera de bolaina blanca: A - patio de acopio de residuos de descortezado y B - sacos con residuos y detrás los tutores .....	35
<b>Figura 11:</b> Residuos de madera de bolaina blanca: A – astillas de madera y B - corteza.....	35
<b>Figura 12:</b> Clasificación granulométrica de las astillas de madera de bolaina blanca: A - tamices N° 5, 8 y 20 y B - tamizaje manual .....	37
<b>Figura 13:</b> Medición del espesor de astillas de madera de bolaina blanca.....	38
<b>Figura 14:</b> Pretratamiento de las astillas de madera de bolaina blanca durante 24 horas A - con agua potable y B - con hidróxido de sodio 6,67 g/L .....	40
<b>Figura 15:</b> Desfibrado de las astillas de madera de bolaina blanca: A – primera etapa y B – segunda etapa .....	41
<b>Figura 16:</b> Representación gráfica del extremo quebrado de una fibra cortada.....	44
<b>Figura 17:</b> Aplicación de los adhesivos en las pulpas: A - mezcladora con pulpa cubierta; B - aplicación del adhesivo con la pistola y C - mezclado de pulpa con el adhesivo .....	47
<b>Figura 18:</b> Prensado en frío: A – llenado del molde cuadrado y B – formación del MAT.....	48
<b>Figura 19:</b> Prensado en caliente: A- conjunto armado: MAT, planchas y marco de metal, B - posicionamiento en la prensa y C - prensado en caliente propiamente dicho.....	48
<b>Figura 20:</b> Tableros MDF en acondicionamiento .....	49
<b>Figura 21:</b> Clasificación granulométrica de las astillas de madera de bolaina blanca .....	57
<b>Figura 22:</b> Pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP) .....	59
<b>Figura 23:</b> Imágenes microscópicas de los componentes de las pulpas: A - CMP y B - RMP .....	61

<b>Figura 24:</b> Imágenes microscópicas de las fibras: A – fibras enteras de la CMP y B - finos y fibras cortadas de la RMP .....	62
<b>Figura 25:</b> Comparación de las dimensiones de fibra de bolaina blanca: A – longitud y B - ancho .....	64
<b>Figura 26:</b> Superficie de los cuatro tipos de tableros MDF. ....	69
<b>Figura 27:</b> Imágenes SEM de la región interna de los tableros MDF: A - espacios vacíos entre fibras en los tableros con UF y B - compactación de fibras en los tableros con EPI.....	72
<b>Figura 28:</b> Densidad de los cuatro tipos de tableros MDF.....	73
<b>Figura 29:</b> Contenido de humedad de los cuatro tipos de tableros MDF.....	74
<b>Figura 30:</b> Hinchamiento del espesor de los cuatro tipos de tableros MDF después de inmersión en agua por 2 y 24 horas.....	76
<b>Figura 31:</b> Imágenes SEM de las fibras en los tableros con RMP: A - microfibrillas y B - fragmentos de fibra.....	77
<b>Figura 32:</b> Módulo de ruptura (MOR) de los cuatro tipos de tableros MDF .....	79
<b>Figura 33:</b> Superficie de las fibras en los tableros MDF: A - visualización de la resina EPI y B - no visualización de la resina UF .....	80
<b>Figura 34:</b> Módulo de elasticidad de los cuatro tipos de tableros MDF .....	81
<b>Figura 35:</b> Tracción perpendicular de los cuatro tipos de tableros MDF.....	82

## *Índice de anexos*

Página

<b>Anexo 1.</b> Ensayo de densidad básica y contenido de humedad a las astillas de madera .....	104
<b>Anexo 2.</b> Desagregación de la pulpa.....	1055
<b>Anexo 3.</b> Ensayo de drenabilidad de las pulpas .....	106
<b>Anexo 4.</b> Ensayo de clasificación fibras de <i>bauer mcnett</i> de las pulpas.....	1077
<b>Anexo 5.</b> Mediciones de los parámetros morfológicos de las fibras de la pulpa mecánica (RMP) y químico- mecánica (CMP) por fracción .....	1088
<b>Anexo 6.</b> Ensayos químicos de astillas y pulpas.....	1099
<b>Anexo 7.</b> Fichas técnicas de resinas y catalizadores .....	111
<b>Anexo 8.</b> Microscopía electrónica de barrido (SEM) de los tableros MDF .....	114
<b>Anexo 9.</b> Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de los cuatro tipos de tableros MDF .....	115
<b>Anexo 10.</b> Número de tableros por tratamiento y la distribución de las probetas en el tablero .....	123
<b>Anexo 11.</b> Elaboración de probetas del tablero MDF.....	1255
<b>Anexo 12.</b> Ensayos de las propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF.....	1266
<b>Anexo 13.</b> Análisis estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF .....	1288
<b>Anexo 14.</b> Análisis estadístico de la composición química de las astillas y pulpas .....	1455

## *RESUMEN*

Los residuos de madera generados por la industria maderera pueden convertirse en materia prima para la elaboración de nuevos productos y dejar de ser un contaminante ambiental. Por ello, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros de fibras de densidad media (MDF) producidos con dos tipos de pulpa: mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP); y dos tipos de resina: Úrea Formaldehído (UF) y Emulsión de Polímero de Isocianato (EPI) a partir de residuos de madera de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) proveniente de una plantación forestal de árboles de edades variables entre 5 y 8 años. Para la producción de pulpa, se sometieron a las astillas de madera a un pretratamiento de remojo en agua para la obtención de RMP; y en hidróxido de sodio al cinco por ciento (NaOH/ pulpa seca (m/m)) para CMP, ambos durante 24 horas. Respecto a las resinas, la UF se empleó con el 65 por ciento de contenido de sólidos, mientras que la EPI se diluyó con agua destilada hasta obtener el 23 por ciento de contenido de sólidos. Ambas resinas se utilizaron en una dosis de 10 por ciento (sólido de resina/ pulpa seca (m/m)). Se elaboraron cuatro tipos de tableros MDF: RMP-UF; CMP-UF; RMP-EPI y CMP-EPI. Los resultados mostraron que es factible elaborar tableros MDF con residuos de madera con un alto porcentaje (95 %) de madera juvenil y bajo porcentaje (5 %) de corteza de bolaina blanca. Entre las resinas estudiadas, la EPI en los tableros MDF obtuvo mejores propiedades físicas y mecánicas que los fabricados con la UF. Tanto la RMP como la CMP tuvieron similar desempeño en los tableros MDF. Las mejores propiedades se encontraron en los tableros RMP-EPI, y CMP-EPI.

### PALABRAS CLAVE:

*Guazuma crinita*, propiedades físicas y mecánicas, tablero MDF, EPI, pulpa químico-mecánica, pulpa mecánica.

## *ABSTRACT*

The wood waste generated by the wood industry can become raw material for the manufacturing of new products and stops to be an environmental pollutant. Therefore, the present work aims to evaluate the physical and mechanical properties of medium density fiberboards (MDF) produced with two types of pulp: refiner mechanical pulp (RMP) and chemi-mechanical pulp (CMP); and two types of resin: Urea Formaldehyde (UF) and Emulsion Polymer Isocyanate (EPI) from bolaina wood waste (*Guazuma crinita* Mart.) from a forest plantation with trees of varying ages between 5 and 8 years. To manufacture pulp, wood chips were pretreated through soaking in water to obtain RMP; and in five percent sodium hydroxide (NaOH / dry pulp (w/w)) for CMP, both for 24 hours. Regarding resins, UF was used with 65 percent solids content, while EPI was diluted with distilled water to obtain 23 percent solids content. Both resin doses were 10 percent (resin solids / dry pulp (w/w)). Four types of MDF were made: RMP-UF; CMP-UF; RMP-EPI and CMP-EPI. The results showed that it is feasible to make MDF with wood wastes with a high percentage (95%) of juvenile wood and a low percentage (5%) of bolaina bark. Between the resins studied, the EPI in the MDF obtained better physical and mechanical properties than those manufactured with the UF. Both RMP and CMP had similar performance in MDF. The best properties were obtained by the RMP-EPI and CMP-EPI boards.

### KEYWORDS:

*Guazuma crinita*, physical and mechanical properties, MDF, EPI, chemi-mechanical pulp, refiner mechanical pulp.

## I. INTRODUCCIÓN

Un problema mundial en la actualidad es la disposición de los residuos que contaminan el ambiente. La industria maderera no es ajena a esta corriente, además que su disposición genera a las empresas un costo adicional. Ubicar los residuos de madera cerca a cursos de agua o en áreas urbanas es una acción comúnmente realizada, ocasionando problemas a la salud y al bienestar de la población próxima (Fagundes, 2003). Los residuos de madera generados por su transformación pueden dejar de ser un riesgo para el ambiente y convertirse en materia prima para la elaboración de otros productos (Lima y Silva, 2005). Esta idea se refuerza dado que el avance de la tecnología ha vuelto a la madera una materia prima versátil, ya que es capaz de producir diversos productos como celulosa, papel, energía, taninos, resinas, azúcares, madera aserrada, madera rolliza y tableros de madera reconstituida a base de fibras, partículas y láminas, y así generar utilidades para las empresas (Fagundes, 2003; Lima y Silva, 2005).

En la actualidad el tablero de fibra de densidad media (MDF, por sus siglas en inglés) se ha vuelto cada vez más popular. Desde el 2012 hasta el 2016, la producción mundial de estos tableros ha registrado un crecimiento promedio anual del 4 por ciento (FAO, 2018). En ese sentido, la incorporación de los residuos a la producción de tableros es una opción viable y sirve para mantener capturado al carbono en la madera por más tiempo (Fagundes, 2003).

La materia prima principal para los tableros MDF ha sido la madera de plantación. Si bien en Perú las plantaciones forestales aún no se encuentran muy desarrolladas, existe una tendencia hacia su instalación en la Amazonía peruana con base en la bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.). El aprovechamiento y producción de esta especie, en la región Ucayali, la ha convertido en la especie emblemática forestal para los programas y planes de reforestación. Ello debido a experiencias de plantaciones en las cuales los árboles de bolaina blanca han alcanzado alturas de 10 metros a los 4 años después de ser plantados, siendo en otros casos cosechados a los 6 años. Este desarrollo se atribuye a su carácter heliófito y su rápido crecimiento (Wightman *et al.*, 2006; Álvarez y Ríos, 2009). Por ello se estima que las plantaciones forestales de esta especie se incrementarán y en consecuencia también los residuos de madera, principalmente por la baja tecnología empleada en el corte (Álvarez y Ríos, 2009; Soudre, 2009). Para el año

2017, el volumen de residuos de madera a nivel nacional de bolaina blanca fue 40252,13 m<sup>3</sup> aproximadamente.

Respecto a las resinas empleadas en la fabricación de MDF, la más conocida y empleada en Perú es la úrea formaldehído (UF). Sin embargo, no se tiene investigaciones del empleo de resinas a base de isocianato, como la emulsión de polímero de isocianato (EPI), en el país. Esta resulta ser particular porque, a diferencia de la otra, es resistente al agua y está libre de formaldehído (Thoemen *et al.*, 2010). Este último, es una característica importante porque las emisiones de este compuesto son controladas.

En base a todo lo expuesto, es evidente que es necesario desarrollar y generar información sobre productos con un mayor valor agregado a partir de la madera de plantación de especies nativas y de sus residuos. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros de fibras de densidad media producidos con dos tipos de pulpa y dos tipos de resina a partir de residuos de madera de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.).

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Descripción de la especie bolaina blanca

#### 2.1.1. Taxonomía

Reynel *et al.* (2016) indica que la clasificación taxonómica de la bolaina blanca es la siguiente:

Familia: STERCULIACEAE (Clasificación APG: MALVACEAE)

Nombre científico: *Guazuma crinita* Martius

Nombres comunes: “Bolaina”, “Bolaina blanca”

Sinonimia: *Guazuma rosea* Poeppig

#### 2.1.2. Descripción botánica

El árbol de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) en el bosque natural presenta diámetros de 25-80 cm y altura total de 15-30 m, con fuste cilíndrico, la ramificación se origina en el tercer tercio y la base del fuste es recto. Su corteza externa es lisa y finamente agrietada, de color marrón claro a grisáceo. La corteza interna es fibrosa y conforma un tejido finamente reticulado, de color amarillo claro, y se oxida rápidamente a marrón. Las ramitas terminales son de sección circular de unos 3-4 mm de diámetro, usualmente con pubescencia ferrugínea hacia las partes apicales. Las hojas son simples, alternas y dísticas, de 10-18 cm de longitud, pulvinulado, las láminas ovadas, aserradas, y de nervación palmeada. Presenta inflorescencia en panículas axilares con muchas flores pequeñas, hermafroditas, con cáliz y corola presentes, de color rosada. Sus frutos son cápsulas globosas de unos 4-8 mm de diámetro con la superficie densamente cubierta de pelos largos (Reynel *et al.*, 2003).

### **2.1.3. Distribución geográfica**

Esta especie tiene una distribución muy amplia en el Neotrópico desde Centroamérica a la región Amazónica, hasta el sur de Brasil y Bolivia, mayormente hasta los 1500 msnm. La bolaina blanca abunda en la Amazonía. Se le observa en ámbitos con pluviosidad elevada y constante, pero también en zonas con estación seca marcada. Es una especie heliófita, característica de la vegetación secundaria temprana, muy abundante en la cercanía a caminos y zonas con alteración antropogénica. Suele presentarse en suelos limosos a arenosos, muchas veces de escasa fertilidad, a veces pedregosos; no tolera anegamiento, sobre todo cuando es una plántula (Reynel *et al.*, 2003).

### **2.1.4. Anatomía de la madera**

La madera de bolaina blanca, a nivel macroscópico, no muestra diferencia entre la albura y duramen. En condición seca al aire, tiene un color blanco cremoso; presenta anillos de crecimiento, diferenciado por bandas oscuras de forma regular con veteado en arcos superpuestos ligeramente definidos y jaspeados, grano recto, textura y brillo medio. Respecto a su anatomía, la madera presenta porosidad difusa, poros solitarios y múltiples radiales de 2-4, de 2-7 poros/mm<sup>2</sup>, con diámetro tangencial de poros promedio entre 167-171  $\mu\text{m}$  y longitud de vasos entre 269-499  $\mu\text{m}$ , parénquima ligeramente visible apotraqueal difuso en agregado y paratraqueal vasicéntrico, con presencia de células cristalíferas septadas, tiene radios heterogéneos tipo III, multiseriado no estratificado, con inclusiones de gomas en células procumbentes y tipo baldosas (Acevedo y Kikata, 1994).

En la Tabla 1 se presentan las características anatómicas de la madera de bolaina blanca de plantaciones forestales de edades de 3, 4, 5 y 8 años.

**Tabla 1: Características microscópicas de madera de bolaina blanca proveniente de plantaciones forestales**

Características anatómicas		Unidades	Plantaciones forestales			
			3 años (A)	4 años (B)	5 años (C)	8 años (C)
<b>Poros/vasos</b>	Longitud	µm	280	303	-	-
	Diámetro tangencial	µm	136	135	-	-
	Nº/mm <sup>2</sup>		4	6	-	-
<b>Fibras</b>	Longitud	mm	1,384	1,057	1,369	1,362
	Diámetro	µm	28,82	24,00	28,05	26,95
	Espesor de pared	µm	2,39	1,75	3,07	3,20
<b>Radios</b>	Altura	µm	960	702	-	-
	Ancho	µm	136	47	-	-
	Nº/mm		9	4	-	-

Fuente: A – Piccone (2019). B – Miguel (2013). C - Chavesta *et al.* (2020).

### 2.1.5. Propiedades físicas y mecánicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera de bolaina blanca se muestran en la Tabla 2 proveniente de un bosque natural de Tingo María (Huánuco) y de plantaciones forestales de Puerto Inca (Huánuco) de cinco y ocho años.

**Tabla 2: Propiedades físicas de la madera de bolaina blanca proveniente de bosque natural y plantaciones forestales**

Propiedades físicas	Unidades	Bosque natural (A)	Plantaciones forestales		
			5 años (B)	8 años (B)	8 años (C)
Densidad básica	kg/m <sup>3</sup>	430	360	400	443
Contracción volumétrica	%	-	7,93	8,67	8,25
Contracción tangencial	%	5,50	5,26	5,59	4,43
Contracción radial	%	3,50	2,78	3,09	3,81
Coefficiente T/R	-	1,60	-	-	1,56

Fuente: A - Aróstegui y Sato (1970). B - Chavesta *et al.* (2019). C - Tuisima *et al.* (2017).

Las propiedades mecánicas de la madera proveniente de un bosque natural de Tingo María (Huánuco) y de la madera de raleo proveniente de plantaciones forestales de cuatro, cinco y seis años de Puerto Inca (Huánuco) se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Propiedades mecánicas de la madera de bolaina blanca proveniente de bosque natural y plantaciones forestales**

Propiedades mecánicas	Unidades	Bosque natural (A)	Plantación forestal			
			4 años (B)	5 años (C)	6 años (D)	
Contenido de humedad	%	13,0	13,8	13,8	13,0	
Flexión estática	Esfuerzo al límite proporcional (ELP)	kg/cm <sup>2</sup>	318,3	333,4	305,3	163,1
	Módulo de ruptura (MOR)	kg/cm <sup>2</sup>	507,8	486,6	458,7	393,4
	Módulo de elasticidad (MOE)	t/cm <sup>2</sup>	97,8	69,2	66,2	63,3
Compresión paralela	Esfuerzo al límite proporcional (ELP)	kg/cm <sup>2</sup>	270,6	190,9	154,9	153,9
	Resistencia máxima (RM)	kg/cm <sup>2</sup>	375,7	234,9	225,2	232,3
	Módulo de elasticidad (MOE)	t/cm <sup>2</sup>	121,8	92,9	89,2	77,6
Compresión perpendicular	Esfuerzo al límite proporcional (ELP)	kg/cm <sup>2</sup>	50,5	23,6	26,1	22,4
Dureza	Lados	kg/cm <sup>2</sup>	440,1	139,3	304,2	311,5
	Extremos	kg/cm <sup>2</sup>	303,4	222,7	500,0	568,9
Cizallamiento		kg/cm <sup>2</sup>	50,6	43,9	39,9	51,9

Fuente: A - Aróstegui y Sato (1970). B - Urbina (2016). C - Robles (2017). D - Aguilar (2019).

Los usos de la madera de raleo de plantación forestal de bolaina blanca son: fabricación de cajonería liviana, artesanía, juguetería, listones para revestimiento de interiores, tutores, postes para cercos y tableros de partículas (Urbina, 2016; Sueros, 2017). También es importante mencionar que ha servido como materia prima para la fabricación de puertas sólidas, mediante la aplicación de tecnologías industriales tipo tablero de listones (blockboard) (Álvarez y Ríos, 2009).

### 2.1.6. Análisis químico de la madera

En la Tabla 4 se muestran la composición química de la madera de bolaina blanca proveniente de una plantación de cuatro años (Miguel *et al.*, 2019).

**Tabla 4: Análisis químico de la madera de bolaina blanca proveniente de una plantación de cuatro años**

<b>Análisis químico</b>	<b>Contenido (%)</b>
Holocelulosa	79,20
Celulosa	51,90
Hemicelulosa	27,40
Lignina	28,60
Extractivos en alcohol-benceno	1,80

Fuente: Miguel *et al.* (2019).

### 2.2. Plantaciones forestales de la especie bolaina blanca

Las plantaciones forestales se han incrementado en superficie rápidamente en todo el mundo. Se estima que la madera rolliza ofertada por las plantaciones forestales cubre más de un tercio de la demanda industrial mundial. En Perú, el desarrollo de las plantaciones forestales es aún incipiente a pesar de poseer la segunda mayor extensión de bosques en América Latina. Sin embargo, Perú posee condiciones favorables para la expansión de las plantaciones forestales como: buena calidad de sitio para la producción de madera con especies nativas o exóticas de rápido crecimiento, variabilidad ecológica que beneficiaría la diversificación de productos según la demanda del mercado y la tecnología desarrollada para algunas especies de rápido o mediano crecimiento (Guariguata *et al.*, 2017).

La bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) actualmente es la especie forestal nativa más demandada para el establecimiento de plantaciones forestales maderables en la región de Ucayali en Perú (Paredes *et al.*, 2010). El interés en esta especie ha aumentado en las últimas dos décadas debido a su rápido crecimiento, elevada abundancia natural, adaptabilidad a una amplia gama de suelos, poda natural, factibilidad de combinar con otros cultivos por su copa pequeña y diversidad de usos de su madera (Weber y Sotelo, 2008; Ramos y Domínguez, 2016; Ramos y Domínguez, 2017; Tuisima *et al.*, 2017). Además, tiene cortos ciclos de rotación que

duran entre 6 a 10 años para madera aserrada, aunque también se cosechan árboles más jóvenes (Weber y Sotelo, 2008; Wightman *et al.*, 2006).

La especie *G. crinita* ha sido incorporada en las plantaciones forestales y/o en los sistemas agroforestales como una alternativa para satisfacer la demanda de madera en el corto plazo (Paredes *et al.*, 2010; Ramos y Domínguez, 2017; Cornelius *et al.*, 2018). La madera de bolaina blanca ha tenido buena aceptación en el mercado local, regional y nacional, puesto que es de bajo costo, de buena trabajabilidad y se está utilizando en los trabajos de carpintería, ebanistería y construcción de casas prefabricadas en las zonas rurales (Miranda, 2018).

La producción de madera de bolaina blanca rolliza y aserrada se ha incrementado en 500 por ciento del 2003 al 2007 en el departamento de Ucayali y su demanda aumentó de 20000 a 110000 m<sup>3</sup>/año (Álvarez y Ríos, 2009). En ese sentido, Sears *et al.* (2018) estimaron que entre todos los pequeños agricultores de la misma región dedican 90000 ha a la producción de bolaina blanca, lo cual equivaldría a la oferta de 950000 m<sup>3</sup> de madera aserrada anualmente. La industria generada alrededor de la bolaina blanca ha generado múltiples beneficios a los actores involucrados de la Amazonía peruana (Putzel *et al.*, 2013).

## **2.3. Descripción de la materia prima**

### **2.3.1. Residuos de madera**

La transformación mecánica de la madera en los aserraderos peruanos presenta rendimientos de madera rolliza a madera aserrada de 60 por ciento aproximadamente (Bellido *et al.*, 2003), debido a la baja tecnología empleada en el proceso principalmente (Soudre, 2009). En Pucallpa (Ucayali), se estima como rendimiento promedio de aserrío el 52 por ciento (Guevara *et al.*, 1993). En la especie bolaina blanca, Soudre (2009) menciona que las trozas provenientes de bosque natural tienen rendimientos de 16 por ciento, mientras que las trozas procedentes de una plantación forestal rindieron 29 por ciento.

Lo antes mencionado provoca la generación de una cantidad considerable de residuos de madera (Tinti *et al.*, 2018), su acumulación en los aserraderos puede obstaculizar el desarrollo

del proceso productivo, además puede tener efectos ambientales negativos como: la generación de dióxido de carbono por la descomposición de la materia orgánica; la pirolisis de la acumulación de aserrín por la radiación solar y las altas temperaturas; sedimentación y contaminación de los ríos; y la propagación de plagas y enfermedades (Álvarez *et al.*, 2001; Nanvonamuquitxo *et al.*, 2017).

Los residuos de madera pueden dejar de ser un riesgo ambiental si se convierte en materia prima para generar un nuevo producto. Esta disposición lograría que los residuos reemplacen a las materias primas vírgenes, reduciría los gastos de tala y transporte, y eliminaría la incineración de los residuos o su traslado a vertederos (Kim y Song, 2014).

Los residuos forestales se consideran renovables, debido a que provienen de fuentes renovables como son los bosques (Akhtari *et al.*, 2014). Los residuos de aserraderos se clasifican en tres grupos: el aserrín que es generado por el proceso de mecanizado con sierras; las astillas con corteza proveniente de la descortezadora; y los bloques de madera (cantoneras, despuntes, etc.) que son los residuos más grandes (Vale y Gentil, 2008).

Los residuos provenientes de la descortezadora, que contienen madera combinada con corteza, suelen ser destinados para la fabricación de pulpa (Myers *et al.*, 1996). La corteza se considera un desperdicio importante que también causa contaminación ambiental. Además, son menos los estudios realizados sobre corteza que sobre madera (Akgül y Akça, 2020).

Existen diferentes formas para el aprovechamiento de estos residuos. La más generalizada es el uso como combustible en forma de leña, astillas o pellets (Muizniece y Blumberga, 2015; Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018). La otra opción es su empleo para producir nuevos productos con mejores propiedades y mayor valor agregado como los tableros compuestos (tablero de partículas, tablero de fibras, etc.) (López *et al.*, 2018).

Las astillas, virutas y aserrín pueden utilizarse en la producción de tableros de fibra. Se tiene experiencias del aprovechamiento de hasta el 44 por ciento de residuos de los aserraderos como materia prima para la obtención de tableros de fibras (Bellido *et al.*, 2003). En ese sentido,

Fagundes (2003), indicó que la producción de tableros es técnicamente viable y sirve para mantener capturado el carbono en la madera por más tiempo.

Es conveniente que las astillas de los residuos de madera tengan una mayor longitud a lo largo de la dirección de la fibra (las astillas están típicamente en el rango de longitud de 16-25 mm), puesto que contendrán menos fibras cortadas, lo que significaría mejores propiedades de pulpa; sin embargo, esto no puede ser tan propicia para el ingreso de reactivos a todas las fibras (Myers *et al.*, 1996).

a. Madera juvenil.

La principal característica de los árboles jóvenes o de diámetros pequeños es el alto contenido de madera juvenil (Myers *et al.*, 1996). Según Vignote y Martínez (2006), la madera juvenil se define como aquella madera formada por los primeros anillos del árbol, que si bien no difiere en aspecto al resto, posee unas características de comportamiento mecánico y físico diferentes a la madera formada.

En la comparación con la madera madura, la madera juvenil de especies latifolidas en general tiene longitud de fibra ligeramente más corta, paredes celulares más delgadas, mayor contenido de lignina y menor densidad (Myers *et al.*, 1996). Además, es más ligera, tiene menor contenido de celulosa, más hemicelulosa, mayor desviación de la fibra, y una proporción más alta de madera de compresión (Vignote y Martínez, 2006). Adicionalmente, el diámetro de vasos de la madera juvenil también es inferior respecto al de la madera madura. En consecuencia, las propiedades de la madera juvenil son inferiores con respecto a la madura (Cobas *et al.*, 2013).

Respecto a la producción de pulpa, el rendimiento se ve ligeramente afectado, pero la calidad de la pulpa o el papel de las latifoliadas no se ven suficientemente influenciadas por la edad como para tener un efecto importante (Myers *et al.*, 1996).

Estudios técnicos han demostrado que las diferencias con respecto a las propiedades de madera juvenil, son a menudo limitadas cuando se utilizan en materiales compuestos, cuando se mejora las variables de fabricación y la compactación de los constituyentes (Pecho *et al.*, 2005).

## b. Corteza.

La capa más externa del tronco de un árbol, conocida como corteza, es la piel protectora de la madera y representa aproximadamente el 9-15 por ciento del fuste, dependiendo de la especie y otras condiciones (Gupta, 2009). Usualmente se generaliza el término “corteza” a tres capas, de exterior a interior, conocidas como corteza (propriadamente dicha), floema y cambium vascular.

Esta cubierta del fuste está formada por materia muerta de aspecto resquebrajado, debido a que el árbol sigue creciendo en diámetro, mientras que la corteza no. La siguiente capa interna, se llama liber o floema, que es una capa delgada de apariencia similar a la corteza, más blanda, cuyas funciones en el árbol es la de conducción de la savia elaborada. Por último, el cambium, es la capa inapreciable a simple vista, formada por células con funciones reproductoras, formando xilema hacia dentro y floema hacia afuera. (Vignote y Martínez, 2006).

Se considera un residuo de desecho de la descortezadora que está disponible en abundancia, tiene usos limitados y causa problemas de eliminación (Gupta, 2009). En la industria de pulpa y papel, los fragmentos de corteza y otras impurezas son difíciles de eliminar ya que se dispersan en todo el material astillado. La presencia de estas partículas genera un mayor desgaste de los equipos de procesamiento, mayor consumo de reactivos químicos para fabricar pulpa, reducción de la resistencia del producto final y problemas de limpieza en el producto. Por ello, es preferible la limpieza de astillas, previo al pulpeo, para eliminar algunos de los contaminantes (Myers *et al.*, 1996), porque incluso la corteza en pequeñas cantidades causa oscurecimiento del producto. Sin embargo, la separación completa de la corteza puede conducir a pérdida de materia prima y un mayor consumo de energía (Rättö *et al.*, 1993).

Al comparar la madera con la corteza, este último tiene menor hinchamiento, menor anisotropía, transferencia de calor más bajo ligeramente y es considerablemente menos resistente en todas sus propiedades mecánicas debido a sus características anatómicas y de composición química. Además, la estructura y los elementos de la corteza también son diferentes de la madera de la misma especie (Gupta, 2009).

## **2.4. Insumos para la elaboración de tableros MDF**

### **2.4.1. Pulpa celulósica**

La pulpa celulósica es una masa de fibras vegetales separadas por el rompimiento de enlaces entre las fibras de la madera mediante acción mecánica, térmica o química por el proceso llamado pulpeo (Hall, 1974). La pulpa celulósica comúnmente usada en la industria de tablero MDF es la proveniente de madera (Thoemen *et al.*, 2010).

La madera está constituida por fibras de celulosa y hemicelulosa, las cuales están unidas por la lignina presente en la región llamada lámina media y actúa como pegamento manteniendo unidas al conjunto de fibras (Biermann, 1996; Thoemen *et al.*, 2010).

Las proporciones de los constituyentes en la madera de coníferas son 43 por ciento de celulosa, 28 de hemicelulosa y 29 de lignina. Las latifoliadas se componen de 43 por ciento de celulosa, 35 de hemicelulosa y 22 de lignina (Hall, 1974).

La celulosa es altamente hidrofílica, debido a la presencia de grupos polares (grupo hidroxilo); cuando las cadenas de celulosa se ponen en contacto con el agua, las fibras absorben moléculas de agua (se hidratan) y aumentan su volumen, mejorando simultáneamente su flexibilidad y la capacidad de enlace con otras fibras adyacentes. La absorción de agua es más eficiente en las zonas amorfas de la celulosa que en las zonas cristalinas (Biermann, 1996).

Las hemicelulosas presentan cualidades mecánicas más débiles que la celulosa, y durante el proceso de obtención de pulpa, sus propiedades son modificadas drásticamente. Además, son fácilmente solubles en gran cantidad de disolventes, pues su estructura no les confiere marcadas características hidrofílicas o hidrófobas. Debido a esto, una gran proporción de las hemicelulosas iniciales son retiradas durante el proceso de pulpeo (Biermann, 1996).

La lignina es un compuesto básicamente hidrófobo, característica frecuente en los compuestos aromáticos. Se sitúa formando una capa externa alrededor de las fibras la cual se une a la existente en las demás fibras, por medio de enlaces covalentes y de puente de hidrógeno. La

estructura química de la lignina se basa en la unión tridimensional de unidades de fenilpropano, cuyos sustituyentes varían en función de la planta considerada. Las uniones entre los monómeros deben romperse para poder separar las fibras celulósicas necesarias en la obtención de la pulpa (Biermann, 1996).

En términos generales, hay dos formas de romper los enlaces en la madera y liberar fibras: por acción mecánica y por acción química. También hay combinaciones de estos dos métodos, como los métodos químico-mecánicos, termomecánicos y semiquímicos (De Souza *et al.*, 2015).

a. Pulpa mecánica (RMP).

La pulpa mecánica o “*refiner mechanical pulp*” (RMP) se define como aquella pulpa que se produce triturando la madera contra una piedra o entre placas metálicas, para lograr la separación de las fibras. La acción de las máquinas rompe estas fibras de celulosa, por lo que la pulpa resultante es más débil que la separada químicamente (Stellman, 2001).

En los métodos mecánicos se consume una gran cantidad de agua como lubricante y refrigerante (Sandermann, 1968). Asimismo, la mayoría de los componentes químicos de la madera permanecen en la pulpa, por consiguiente, se obtiene un alto rendimiento (85-95 por ciento) (De Souza *et al.*, 2015). La madera de las especies tropicales de densidad básica baja es de interés para la elaboración de pulpa mecánica, por ejemplo Ceiba, Balsa, Cecropia, etc (Sandermann, 1968).

Las desventajas de esta técnica son la decoloración rápida y fácil del material, además del alto consumo de energía. La pulpa mecánica es un material prácticamente no deslignificado, por lo que se vuelve amarillento con el tiempo y se usa en aplicaciones temporales como papel de periódico, catálogos, revistas, papel higiénico y cartón, en otros usos (De Souza *et al.*, 2015).

c. Pulpa químico-mecánica (CMP).

La fabricación de pulpa químico-mecánica o “*chemi-mechanical pulp*” (CMP), es un método que combina acciones mecánicas y químicas, se caracteriza por un tratamiento químico previo a la desfibrilación (De Souza *et al.*, 2015). Esta metodología es utilizada para obtener pulpas de especies latifoliadas. Su rendimiento es más bajo que en la pulpa mecánica porque se elimina más cantidad de materiales no celulósicos. El pretratamiento químico puede ser con bisulfato de sodio, hidróxido de sodio u otros reactivos (Stellman, 2001).

Este proceso ha sido desarrollado para producir pulpa de alto rendimiento con cualidades deseables para muchas aplicaciones y productos habituales (Afra *et al.*, 2014). Generalmente se usa una baja concentración de reactivo entre 0,25-2,5 por ciento (De Souza *et al.*, 2015). Los rendimientos de este tipo de pulpa oscilan entre 82 y 86 por ciento bajo condiciones de temperatura y presión ambiental (Ortíz y Bueno, 1987). Por otra parte, los valores de rendimiento podrían disminuir si se aumenta la cantidad de NaOH en el pretratamiento químico (Saldívar, 2005).

El efecto del reactivo no produce la deslignificación de la madera, su efecto recae sobre los carbohidratos de bajo peso molecular y fracciones amorfas, como las hemicelulosas y las regiones amorfas de la celulosa (Saldívar, 2005). La soda produce la interacción de los iones OH<sup>-</sup> con los polisacáridos, lográndose reacciones de hidrólisis, lo cual origina el debilitamiento de los enlaces interfibrilares por la separación de los grupos acetilos ligados a la porción poliurónica de las hemicelulosas en la lámina media, ocasionando un aumento en la capacidad de hidratación de la pared celular, el hinchamiento de las fibras y el aumento de permeabilidad (De la Macorra, 2004).

Las ventajas de fabricar pulpa químico-mecánica son el menor consumo de energía, la mayor resistencia de las fibras, la menor oscuridad de la pulpa (Afra *et al.*, 2014). Mientras que las desventajas son el menor rendimiento y el mayor consumo de productos químicos (Khakifirooz *et al.*, 2013).

### 2.4.2. Resinas sintéticas

Las resinas sintéticas son necesarias para asegurar la ligación efectiva entre las fibras. Los tipos más comunes de resinas utilizadas para los tableros MDF son a base de formaldehído. Estas son las resinas úrea formaldehído, melamina úrea formaldehído y fenol formaldehído (Halvarsson, 2010). También existen las resinas a base de isocianato que son más costosas que las resinas a base de formaldehído (Maloney, 1977).

Las resinas a base de isocianato se han utilizado principalmente de dos maneras: primero, la emulsión de polímero de isocianato (EPI) generalmente utilizado para unir productos a base de madera laminada; y el segundo como 4–4'-difenilmetano diisocianato o MDI para la fabricación de tableros de partículas (Nuryawan y Alamsyah, 2018).

La mayoría de los cambios tecnológicos relacionados con el sistema de adhesivos se han realizado con base a la obligación de alcanzar emisiones de formaldehído aún más bajas, la necesidad de disminuir los costos de producción y la necesidad de productos para nuevos nichos de mercado (Mantanis *et al.*, 2017).

#### a. Úrea Formaldehído (UF).

Las resinas a base de úrea son muy conocidas, cerca de 90 por ciento de los tableros elaborados por vía seca son adheridos con estas resinas. La resina úrea formaldehído (UF) se compone de moléculas de úrea y formaldehído. Su fraguado o curado se realiza bajo condiciones ácidas. Se da mediante un aumento en la viscosidad de la resina seguido de gelificación y finalmente mediante la formación del sólido rígido común a las resinas termoendurecibles. El contenido de humedad del manto fibroso es importante ya que un nivel demasiado alto retarda el fraguado (Maloney, 1977).

Es usual emplear la resina con su contenido de sólidos de origen, pero también se puede diluir a un contenido de sólidos más bajo para mejorar las características de pulverización y la cobertura del material con la resina. La viscosidad de 30 centipoise (cP) suele ser para resinas

sin pegajosidad adecuadas para tableros de fibra, mientras que una viscosidad de hasta 200 a 300 cP se emplea para la mayoría de las aplicaciones de tableros de partículas (Maloney, 1977).

La UF como resina suele ser acompañado por un catalizador, como el sulfato de amonio o el cloruro de amonio (sales de amonio de ácidos fuertes). El catalizador sirve para proporcionar el ácido que se necesita para un fraguado rápido. Algunas especies de árboles son de madera relativamente ácidas, y en estos casos hay suficiente ácido disponible en la madera para efectuar el fraguado. Sin embargo, el catalizador en la resina acelera este proceso (Maloney, 1977).

La reacción de UF puede tener lugar entre 5,0 y 5,5 de pH. Esta reacción se detiene elevando el pH a 7,0 a 8,0 y enfriando la resina recién hecha (Maloney, 1977). Adicionalmente se emplea algo de parafina para incrementar la resistencia a la humedad (Alpár *et al.*, 2010).

Las ventajas de la UF son su costo relativamente bajo, buena resistencia en seco, y la vasta experiencia de producción con esta resina (Thoemen *et al.*, 2010). Por otro lado, una gran desventaja de esta resina es la liberación de formaldehído que no está de acuerdo con los requisitos del hogar ecológico, además, que tiene un efecto cancerígeno (Huang *et al.*, 2018; Nuryawan y Alamsyah, 2018).

#### b. Emulsión de Polímero de Isocianato (EPI).

La emulsión de polímero de isocianato (EPI) es un adhesivo bicomponente, que consiste en una base de acetato de polivinilo (PVAc) y un isocianato polimérico (diisocianato de difenilmetano - MDI). El segundo componente tiene la función de catalizar la reacción de fraguado de la resina que ocurre a través de la reacción de los grupos isocianato con los hidroxilos de la madera (Pizzi, 1983). La reacción entre el endurecedor de MDI y los grupos hidroxilo de PVAc crea una reticulación extensa entre las cadenas de polímero, de ahí el alto peso molecular (Qiao *et al.*, 2000). Las resinas EPI fraguan a temperatura ambiente tan bajas como 4.4 ° C (40 ° F), aunque naturalmente, el uso de calor o radiofrecuencia acelerará la reacción (Pagel y Luckman, 1980; Grøstad y Pedersen, 2010).

En el mercado europeo, las viscosidades típicas son 2000–8000 cP a 25 °C y el contenido de sólidos es normalmente del 50 por ciento o más. Las resinas son normalmente neutras con un pH en el rango de 6-8. La estabilidad de almacenamiento del componente resina EPI es típicamente de medio año cuando se almacena a una temperatura entre 10 y 30 ° C (Grøstad y Pedersen, 2010). El reticulante se mezcla con la emulsión base para proporcionar un adhesivo con una vida útil de hasta varias horas (Pagel y Luckman, 1980).

Después de la aplicación de la EPI sobre el sustrato, a medida que el agua se evapora en el ambiente y reacciona con los grupos isocianato, el contenido de agua en la capa adhesiva disminuye y pequeñas partículas de polímero forman gradualmente una película; mientras que los grupos -OH se reticulan con los grupos -NCO, el resultado forma el enlace de uretano (Guo *et al.*, 2018), el cual es altamente duradero (Pagel y Luckman, 1980).

Cabe resaltar que los grupos de -NCO del isocianato pueden ser tan reactivos que reaccionan con casi todas las sustancias polares en la madera (celulosa, hemicelulosa, lignina y extractos de madera) para formar enlaces covalentes. Muchas reacciones pueden tener lugar de forma simultánea y competitiva (Guo *et al.*, 2018; Qiao *et al.*, 2000). Si el agua está presente en el sustrato, la resina de isocianato reaccionaría preferentemente con el agua que con los componentes de madera. Por lo tanto, la reacción de resina de isocianato-agua se considera como una de las reacciones más importantes al unir materiales compuestos de madera con resinas de isocianato (Nuryawan y Alamsyah, 2018).

La resina EPI, y en general el isocianato, presenta fraguado rápido, en frío, resistencia al agua, líneas de cola incoloras, fácil aplicación y está libre de formaldehído lo cual cumple con los requisitos del mercado actual de adhesivos (Qiao *et al.*, 2000). Además, tiene alta resistencia de adhesión, buena resistencia al calor y buena estabilidad ambiental (Guo *et al.*, 2018). La EPI está progresivamente reemplazando a los adhesivos a base de fenol, resorcinol y formaldehído (Pagel y Luckman, 1980).

La EPI se utiliza en muchas partes del mundo para la producción de diferentes tipos de productos a base de madera, tales como: tableros de madera sólida de diferentes tipos, parquet,

marcos de ventanas, piezas de muebles, madera contrachapada, finger-joint, vigas de madera laminada y vigas en I (Grøstad y Pedersen, 2010).

Existen versiones de isocianatos que se pueden mezclar con agua para formar una emulsión que facilita considerablemente la pulverización de la resina (Thoemen *et al.*, 2010). Se puede predecir que cambiar las emulsiones o el isocianato en un adhesivo EPI afectará su rendimiento en la unión de madera (Qiao *et al.*, 2000).

## **2.5. Tableros MDF**

MDF proviene de las siglas en inglés “*Medium density fiberboard*”, también llamado tablero de fibra de densidad media, tablero de fibra por vía seca o tablero MDF.

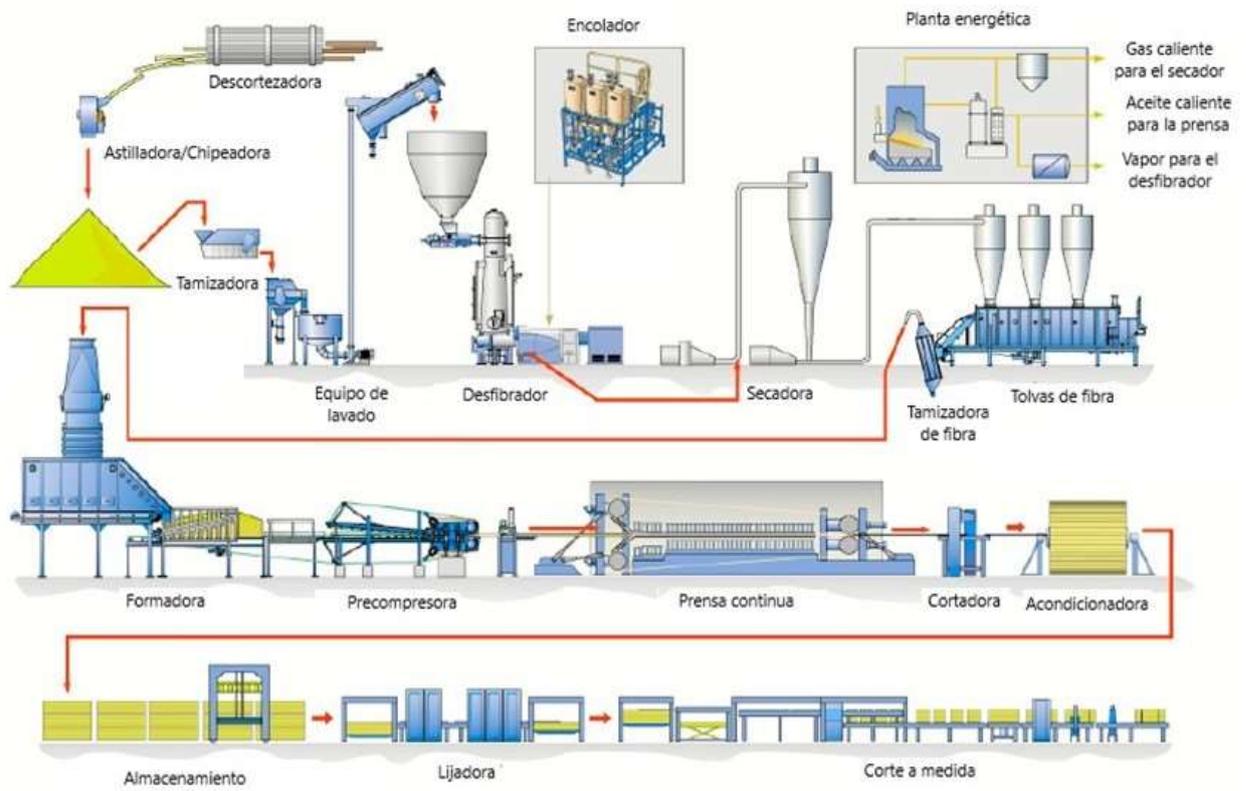
El tablero MDF es un tablero compuesto o derivado de madera que tiene un comportamiento bastante parecido a la madera en sí, tanto en lo que se refiere a propiedades físicas como mecánicas, aunque sus valores no son exactamente iguales. Además de los MDF, los tableros conocidos en la actualidad son: los tableros de fibras por vía húmeda (HDF), los tableros de partículas (MDP), los tableros contrachapados (triplay) y los tableros alistonados (SWP) (Vignote y Martínez, 2006).

Este tipo de tablero reconstituido se fabrica a partir de fibras lignocelulósicas generalmente combinadas con una resina sintética u otro aglutinante adecuado. Los valores de gravedad específica para MDF varían de 600 a 800 kg/m<sup>3</sup>. La tecnología utilizada para fabricar MDF es una combinación de la utilizada en la industria de tableros de partículas y tableros HDF (English *et al.*, 1994). El tablero de fibra es un material higroscópico como la madera u otros paneles a base de madera (Ayrilmis, 2007). Además, es frecuentemente preferido para muchas aplicaciones de muebles en lugar de tableros de partículas, madera contrachapada y madera maciza (Ye *et al.*, 2007)

Las propiedades mecánicas y físicas del tablero MDF cambian principalmente según las propiedades de la materia prima (especies de madera, resina y aditivos) y los parámetros de producción (Ayrilmis, 2008).

### **2.5.1. Fabricación de tableros MDF**

El proceso fabricación de tablero de fibra se realiza por vía seca y está diseñado principalmente para materiales a base de madera. El tablero MDF se puede producir a partir de una amplia gama de fibras lignocelulósicas, incluidas las agrofibras y las fibras recicladas. Se pueden utilizar árboles de pequeño diámetro y materiales de desecho de aserraderos. Los tableros MDF normalmente se fabrican mediante un proceso de pulpa termomecánica (TMP). Este proceso utiliza la acción combinada del calor y la energía mecánica para romper los enlaces entre las células que forman la madera (Thoemen *et al.*, 2010). El principio básico de procesar madera para productos MDF implica convertir la madera sólida a fibras individualizadas o haces de fibras, seguido de la adición del adhesivo para pegar las fibras y comprimir los materiales compuestos a base de madera durante el prensado en caliente y producir los tableros de espesores y densidades demandados (Halvarsson, 2010). En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de fabricación de tableros MDF.



**Figura 1: Proceso de fabricación de tableros MDF**

Fuente: Adaptado de Halvarsson (2010)

### 2.5.2. Industria de tableros MDF

En el año 1951 en los Estados Unidos, la fabricación de tableros de fibra mediante el proceso seco y semiseco fue inventada y desarrollada independientemente por las empresas Plywood Research CO., Cascades Plywood CO. y Weyerhaeuser (Sandermann, 1968). El factor fundamental en el desarrollo exitoso de la industria de tableros por vía seca fue la resina sintética (Maloney, 1977).

Los principales países proveedores de tableros MDF a nivel mundial son China, Turquía, Brasil, Polonia y Estados Unidos para el año 2016 (Selvatti *et al.* 2018). Las especies forestales empleadas para producir tableros MDF, fundamentalmente, son *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* (Freire *et al.* 2015; Jiang y Zhang, 2003)

Actualmente, acerca de la producción mundial de tableros de madera, la FAO (2018) señala que la producción ha ido incrementando. En el 2016, alcanzó un aumento de 4 por ciento respecto al año anterior (de 399 millones de m<sup>3</sup> a 416 millones de m<sup>3</sup>) y de 24 por ciento respecto al año 2012 como se aprecia en al Figura 2.

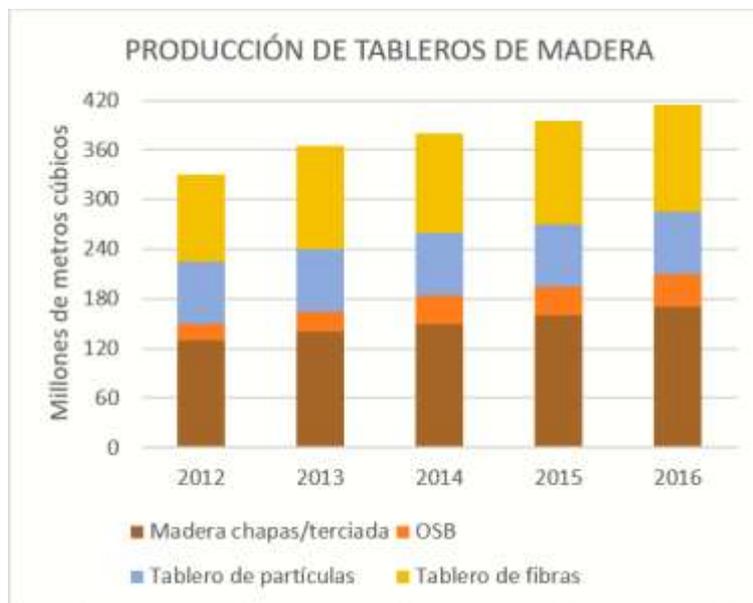


Figura 2: Producción mundial de tableros de madera 2012-2016

Fuente: FAO (2018)

El mismo autor, afirma respecto a la producción mundial de tableros de fibras, un crecimiento durante el período 2012-2016 de 13 por ciento, lo que corresponde en mayor parte a la producción de tableros MDF y HDF (83 por ciento de toda la producción de tableros de fibras en 2016) como se observa en la Figura 3.



**Figura 3: Producción mundial de tableros de fibras 2012-2016**

Fuente: FAO (2018)

Respecto a la producción nacional, es preciso mencionar que los tableros MDF se encuentran dentro de la partida arancelaria 44.11 denominada “Tableros de fibra de madera u otras materias leñosas, incluso aglomeradas con resinas o demás aglutinantes orgánicos”, ubicado en el Capítulo 44: Madera, Carbón y Manufacturas de madera, en la Sección IX: Madera, Carbon Vegetal y Manufacturas de Madera; Corcho y sus Manufacturas; Manufacturas de Espartería y Cestería.

Según los datos publicados por INRENA (2001-2008), MINAG (2009-2014) y SERFOR (2016-2019) sobre la producción nacional de productos forestales maderables y no maderables desde el año 2000 hasta el 2017, indica que la producción de tableros de fibras para exportación ha sido escasa o nula, mientras que la importación de estos productos tiene una tendencia creciente como se muestra en la Figura 4, registrando un valor CIF de US\$ 35 081 508 para el año 2017.



**Figura 4: Exportación e importación de tableros de fibra de Perú en el periodo 2000-2017**

Fuente: INRENA (2001-2008), MINAG (2009-2014) y SERFOR (2016-2019).

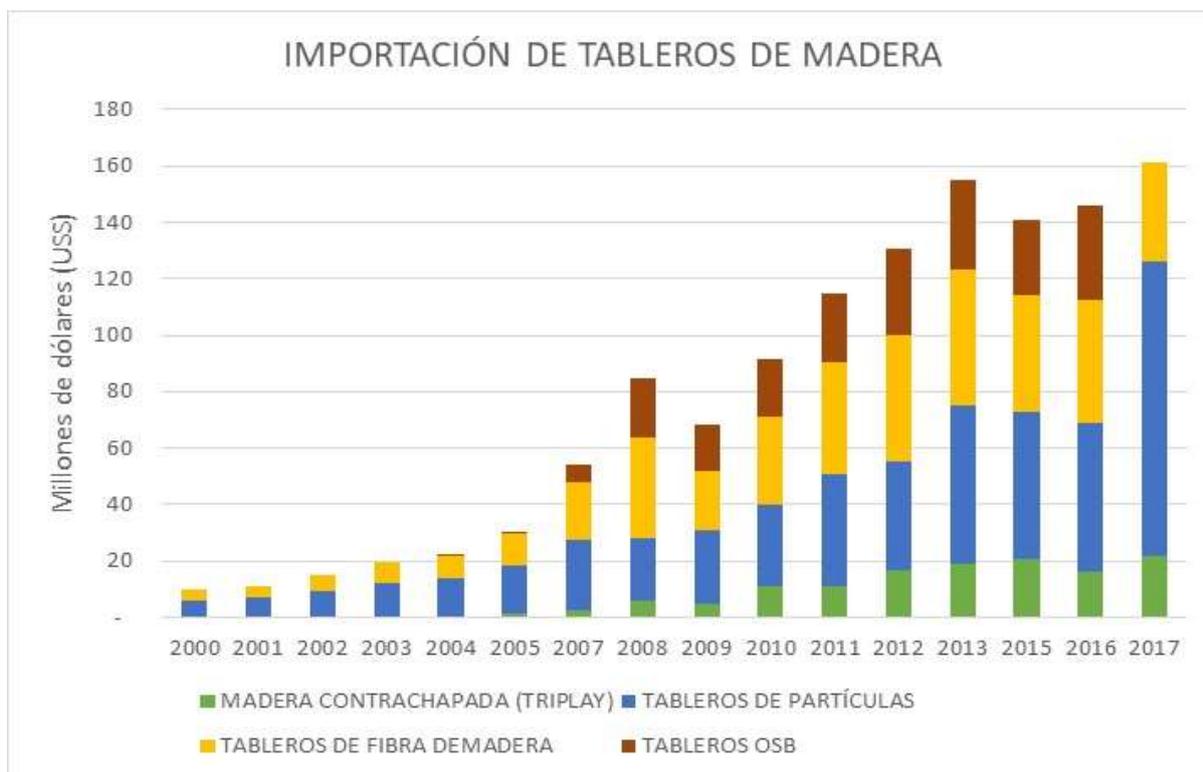
Realizando una comparación con las exportaciones e importaciones de los tableros de madera semejantes como se muestra en la Figura 5, es evidente que la madera contrachapada (triplay) es la que tiene la exportación más alta y la única en varios años. Los tableros de partículas y OSB presentan exportaciones escasas o nulas en muchos años al igual que los MDF.



**Figura 5: Exportación de tableros de madera de Perú en el periodo 2000-2017**

Fuente: INRENA (2001-2008), MINAG (2009-2014) y SERFOR (2016-2019).

En contraposición, las importaciones de los productos mencionados son superiores a las exportaciones como se presenta en la Figura 6. El tablero de fibra es el segundo producto de mayor importación en el año 2017, sólo superado por el tablero de partículas. En general, los tableros de madera tienen demandas crecientes en Perú en todos sus productos. ´



**Figura 6: Importación de tableros de madera de Perú en el periodo 2000-2017**

Fuente: INRENA (2001-2008), MINAG (2009-2014) y SERFOR (2016-2019).

En Chile, la tendencia de producción de MDF ha sido en general estable para el periodo 2012-2016. Sus exportaciones en el 2016 han alcanzado a 37 países, de los cuales destaca México, Estados Unidos, Colombia, Perú, entre otros. Las exportaciones chilenas a Perú han sido superiores a los 25 mil m<sup>3</sup> en promedio de tableros MDF (Soto, 2017).

## 2.6. Propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF

Las propiedades físicas y mecánicas del MDF dependen de las propiedades de las fibras de madera, la orientación de la fibra o la estructura del manto, el desempeño de los adhesivos, su cantidad y distribución en la superficie de la fibra, así como los parámetros tecnológicos de prensado en caliente. La longitud de la fibra y su distribución se relacionan con la densidad aparente de la fibra, lo cual afecta la construcción de la estructura interna del MDF. Todas las propiedades mecánicas podrían mejorarse aumentando la longitud de la fibra. Adicionalmente,

las características morfológicas y químicas de las fibras también son factores importantes que afectan las propiedades del tablero de MDF (Zeng *et al.*, 2018).

En la Tabla 5 se presenta los requerimientos mínimos de los tableros MDF descritos en la norma EN 622-5 (2009), así como las propiedades físicas y mecánicas de los productos ofrecidos por las empresas MASISA, SONAE ARAUCO y ARAUCO.

**Tabla 5: Requerimientos de propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF según la norma europea EN 622-5, MASISA, SONAE ARAUCO y ARAUCO**

Propiedades físicas y mecánicas	Método y ensayo	Unidades	Norma europea			Empresas			
			EN 622-5			MASISA	SONAE ARAUCO		ARAUCO
			MDF	MDF.LA	L-MDF	EcoPlac	MDF Light	MDF Fino	Trupán Estándar
Espesor	-	mm	>4-6	>4-6	>6-9	6	>6-9	>4-6	5.5
Densidad	EN 323	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	720	610	820	800
Resistencia a la tracción	EN 319	N/mm <sup>2</sup>	0,65	0,70	0,45	0,60	0,65	0,80	1,00
Resistencia a la flexión (MOR)	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	23	29	20	13	20	23	45
Módulo de elasticidad (MOE)	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	2700	3000	1700	Mín 1950	2700	2700	3600
Hinchamiento espesor 24 horas	EN 317	%	30	30	20	Máx 40	17	30	12
Humedad	EN 322	%	-	-	-	8	-	-	-

Fuente: EN 622-5. (2009), MASISA (2016), SONAE ARAUCO (2017), ARAUCO (2018).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

La elaboración de los tableros MDF se llevó a cabo en el Laboratorio de Pulpa y Papel, la caracterización química en el Laboratorio de Química Forestal, pertenecientes al Área de Transformación Química de la Madera. Los ensayos físicos y mecánicos de los tableros en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, del Área de Transformación Mecánica de la Madera. La toma de fotografías con el microscopio electrónico de barrido en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), del Instituto de Biotecnología. Los laboratorios mencionados pertenecen a la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Adicionalmente, la evaluación morfológica de las fibras de madera se realizó en el Laboratorio de Fibras de una empresa privada, en Chorrillos – Lima<sup>1</sup>.

#### **3.2. Materiales y equipos**

##### **3.2.1. Materiales**

- Sacos de plástico
- Bolsas de nylon
- Baldes de 20 L
- Bandejas de metal
- Tamiz N° 5, 8, 20, 40, 60
- Bandeja de aluminio
- Bolsas de tela
- Papel filtro N° 80
- Engrapador con grapas

---

<sup>1</sup> TECHTRADE S.A.C.

- Pincel
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL
- Papel de aluminio
- Bagueta de vidrio
- Pipeta y propipeta
- Piceta de 500 mL
- Fiola de 500 mL
- Tubos de vidrio de 1 m de largo
- Malla metálica
- Crisoles de porcelana
- Vasos de precipitado
- Anillos estabilizadores
- Bolsas ziplock
- Molde de madera de 30 cm x 30 cm con tapa
- Marco de metal de 30 cm x 30 cm x 6 mm
- Plancha de metal
- Prensa sargenta

### **3.2.2. Equipos**

- Cámara fotográfica
- Equipo de protección personal
- Estufa eléctrica Heraeus ( $100 \pm 5$  °C)
- Balanza electrónica Camry (1 g de precisión)
- Balanza electrónica Miray (0,01 g de precisión)
- Balanza electrónica AS 310.R2 - Radwag (0,1 mg de precisión)
- Vernier digital Absolute Diomatic (0,01 mm de precisión)
- Desfibrador de discos *Bauer* de 304,8 mm y 30 HP de potencia instalada
- Desfibrador de discos de 4 kW de potencia instalada
- Centrifugadora de 5L de capacidad
- Equipo *Schopper-Riegler*

- Clasificador de fibras *Bauer McNett*
- Equipo *Morfi compact* para análisis morfológico y porcentual de fibras de TECHPAP
- Molino de cuchillas 2830 RPM
- Extractor Soxhlet
- Mufla eléctrica Thermolyne 48000 Furnance
- Cocina eléctrica de 6 hornillas
- Desecador con silicagel
- Plancha calefactora Thermo Scientific
- Equipo de baño María
- Medidor de pH Milwaukee
- Bomba de Vacío, Embudo Buchner con malla N° 140 y recipiente “Kitasato”
- Pistola de aire comprimido marca Truper modelo PIPI-50 de boquilla 1.8 mm y 60 PSI de presión de trabajo
- Molino de disco manual Corona
- Mezcladora de laboratorio 5 L
- Compresora de aire
- Prensa de platos calientes Tramelsa, modelo PHV 60 TON
- Prensa universal para ensayos mecánicos Tinius Olsen y accesorios
- Microscopio electrónico de barrido Thermo Scientific, modelo Quantum 250.

### 3.2.3. Insumos

- Hidróxido de sodio<sub>(s)</sub> (NaOH)
- Alcohol etílico 96°
- Agua potable (La Molina)
- Agua destilada
- Ácido sulfúrico concentrado de 72 % (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Clorito de sodio<sub>(s)</sub> (NaClO<sub>2</sub>)
- Ácido acético concentrado (CH<sub>3</sub>COOH)
- Resina Úrea Formaldehído (UF) “Polímero 230” (Akzo Nobel)
- Sulfato de amonio<sub>(s)</sub> (Akzo Nobel)

- Resina Emulsión de Polímero de Isocianato (EPI) “EPI 1911” (Akzo Nobel)
- Catalizador de Isocianato “Hardener 1999” (Akzo Nobel)

### 3.3. Métodos y procedimientos

#### 3.3.1. Flujograma

En la Figura 7 se presenta el diagrama de flujos de la elaboración de los tableros MDF en laboratorio a partir de residuos de madera. Además, se detalla el rendimiento en diferentes etapas del proceso.

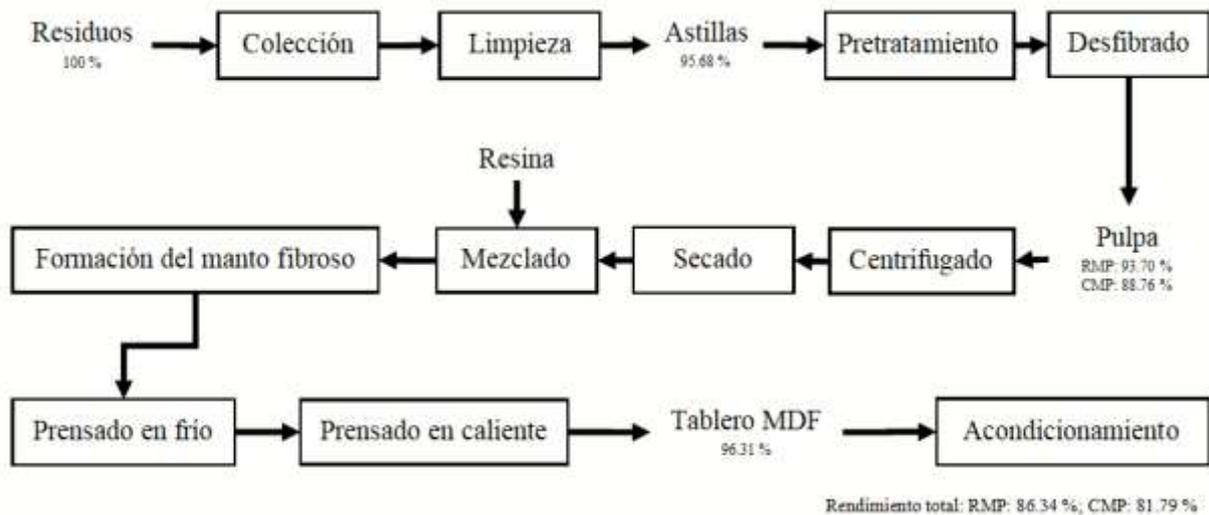


Figura 7: Flujograma del proceso de elaboración de los tableros MDF en laboratorio

En la Figura 8 se presenta los procesos realizados para elaborar los tableros MDF y los análisis realizados en laboratorio de los diferentes componentes de los procesos.

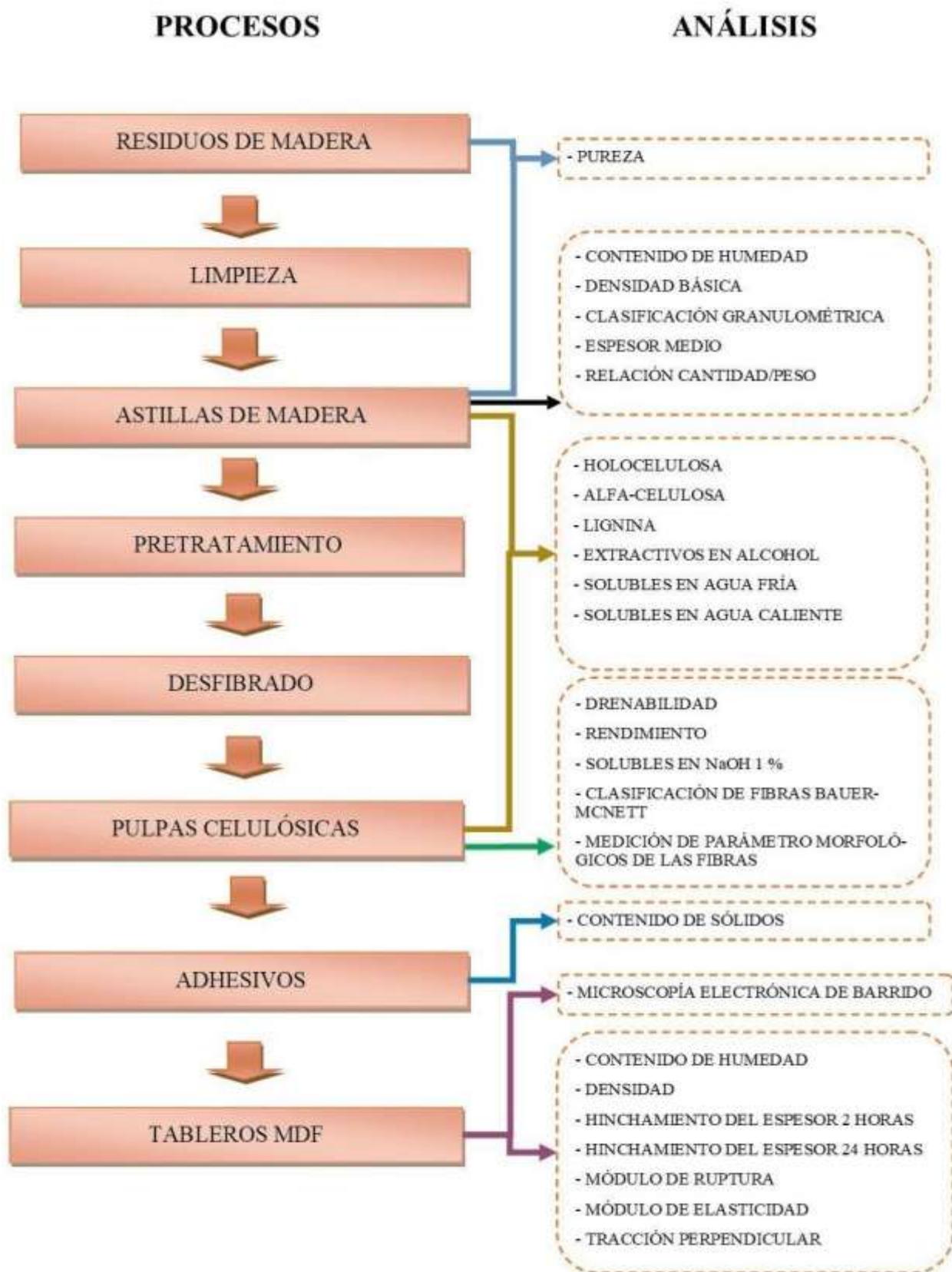


Figura 8: Componentes de los procesos y análisis realizados

### 3.3.2. Astillas de madera de bolaina blanca

#### a. Generación de residuos en la descortezadora.

Se colectó la muestra en estudio de una planta industrial de transformación de madera de bolaina blanca<sup>2</sup> ubicada en el distrito de Alexander Von Humboldt, provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali (Figura 9). La empresa comercializa postes de madera (tutores) de bolaina blanca de 5,1 a 12,7 cm de diámetro y de 2,4 a 3,0 m de longitud. Las trozas que utilizan son de árboles de diámetros pequeños o de la sección apical (superior) de árboles más gruesos; en cualquier caso, las trozas no superan los 12 cm de diámetro. Los árboles provienen de una plantación forestal de la zona de edades variables entre 5 y 8 años. En la planta industrial, las trozas ingresan a una descortezadora ECASO modelo IE DCC – 3”-8”. Los residuos lignocelulósicos producidos por esta máquina se componen de corteza y astillas de madera, las cuales se encontraron mezcladas en el patio de acopio de residuos (Figura 10).

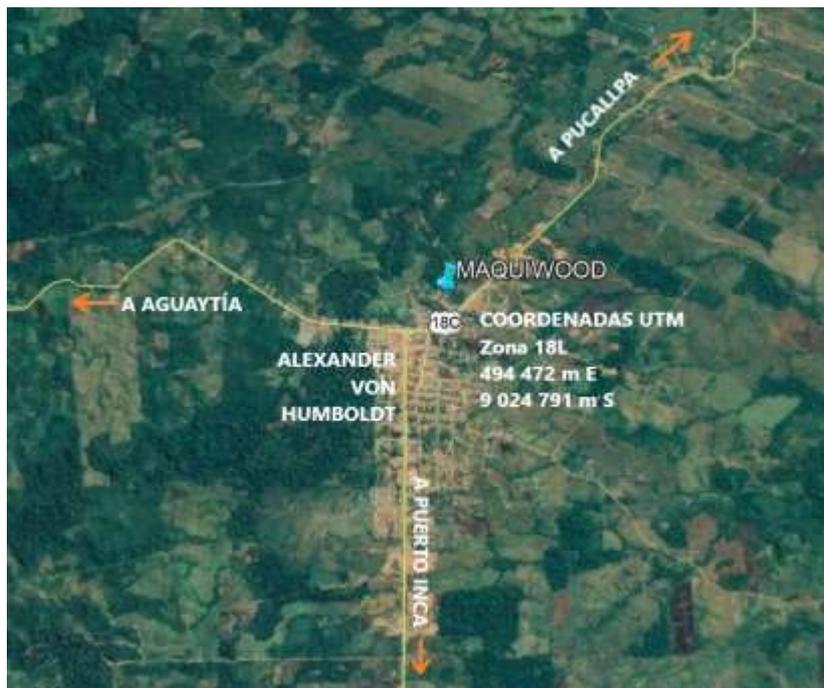


Figura 9: Ubicación de la planta industrial de transformación de madera de bolaina blanca

---

<sup>2</sup> MAQUIWOOD S.A.C.



**Figura 10: Planta industrial de transformación de madera de bolaina blanca: A - patio de acopio de residuos de descortezado y B - sacos con residuos y detrás los tutores**

b. Colección y limpieza de residuos.

Los residuos fueron colectados del patio de acopio seleccionando aquellos que no habían estado en contacto con el suelo, ni habían sido afectados por la exposición al sol. Estos residuos fueron secados al aire, bajo sombra y con remoción constante durante 21 días en los meses de verano en el distrito de Villa El Salvador (Lima); a la vez se realizó la primera limpieza del material que consistió en retirar las partículas de corteza de forma manual. Para la presente investigación, al residuo depurado se le denominó “astillas de madera”, aunque contenía escasas partículas de corteza. Posteriormente, se realizó la segunda limpieza donde el material se cernió con un tamiz de malla N° 20 (850  $\mu\text{m}$  de abertura) y se descartó las partículas que no fueron retenidas (Figura 11).



**Figura 11: Residuos de madera de bolaina blanca: A – astillas de madera y B - corteza**

c. Evaluación de las astillas de madera.

La evaluación de las astillas de madera de bolaina blanca consistió en la determinación de sus propiedades físicas (contenido de humedad y densidad básica), caracterización dimensional (clasificación granulométrica y espesor medio), relación cantidad/peso, el porcentaje de pureza de astillas y de corteza.

- Contenido de humedad (COPANT 460).

Para determinar el contenido de humedad, se promedió los resultados de 12 muestras tomadas de forma aleatoria de 50 g de astillas de madera. Inicialmente se pesó la masa húmeda de las astillas secadas al aire, luego se trasladaron las muestras en envases de aluminio y se colocaron en la estufa a  $105 \pm 3$  °C de temperatura, hasta registrar un peso constante y determinar la masa seca (Anexo 1). La fórmula empleada para calcular el contenido de humedad en base masa seca ( $CH_{bms}$  %) es la siguiente:

$$CH_{bms} \% = \frac{\text{masa húmeda} - \text{masa seca}}{\text{masa seca}} * 100$$

- Densidad básica (COPANT 461).

Para la determinación de la densidad básica también se tomó el promedio de 12 muestras aleatorias de astillas de madera de 50 g. Cada muestra fue introducida en una bolsa de nylon y sumergida en un recipiente de agua hasta la saturación. Después se removió el exceso de agua de la superficie de las astillas para proceder con la determinación del volumen saturado mediante la técnica de desplazamiento de agua, la cual consiste en la inmersión de las bolsas de nylon en un recipiente de vidrio con agua colocado encima de una balanza electrónica, donde el volumen desplazado en centímetros cúbicos se registra en la balanza en gramos. Luego, para determinar la masa seca las astillas son extraídas en su totalidad de las bolsas de nylon, colocadas en bandejas de aluminio y llevadas a la estufa a  $105 \pm 3$  °C, por el tiempo necesario hasta que las muestras tengan un peso constante. La división entre la masa seca y el volumen

saturado de las astillas de madera da como resultado la densidad básica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (Anexo 1). La fórmula se presenta a continuación:

$$DB \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = \frac{\text{masa seca}}{\text{volumen saturado}}$$

- Clasificación granulométrica de las astillas de madera (% retención).

La clasificación granulométrica se realizó antes de la segunda limpieza del material. Se colectaron 12 muestras de astillas de 140 g. Luego se montaron tres tamices N° 5 (4000  $\mu\text{m}$  de abertura), 8 (2360  $\mu\text{m}$  de abertura), y 20 (850  $\mu\text{m}$  de abertura). El tamizado se realizó mediante zarandeo manual durante 10 min por muestra. Finalmente, se determinó el peso de las cuatro fracciones de astillas de madera en una balanza electrónica y se calculó la retención (%) por tamiz (Figura 12).



**Figura 12: Clasificación granulométrica de las astillas de madera de bolaina blanca: A - tamices N° 5, 8 y 20 y B - tamizaje manual**

- Espesor medio.

Para el cálculo del espesor medio se siguió la metodología de Belini (2007). Se tomó 12 muestras compuesta por 100 astillas de madera seleccionadas en relación a los porcentajes de la clasificación granulométrica. En otras palabras, si el tamiz N° 5 retuvo el 14 por ciento de astillas entonces se colectó 14 astillas de esta fracción, y así sucesivamente con las otras fracciones. La medida del espesor fue tomada en el centro de las astillas con un vernier digital y en total se midieron 1200 astillas (Figura 13).



**Figura 13: Medición del espesor de astillas de madera de bolaina blanca**

- Relación cantidad/peso.

Para el cálculo de la relación cantidad/peso, se pesó 10 g de astillas de cada fracción según la clasificación granulométrica y se determinó la cantidad de astillas. Se tomaron 5 muestras de cada fracción.

- Pureza de astillas (Método de gravimetría).

La determinación de la pureza de astillas (P %) se realizó en tres etapas del material: (1) residuos de la máquina descortezadora, (2) astillas después de la primera limpieza, y (3) astillas después de la segunda limpieza. Se pesaron 6 muestras de 90 g de cada etapa y se determinó la pureza

mediante la separación manual de las partículas de corteza de las astillas de madera. Después, se obtuvo el peso de las astillas sin impurezas y se dividió entre el peso de la muestra inicial para dar como resultado la pureza (%). La fracción de corteza (C %) se determinó por el complemento del porcentaje de pureza. Las fórmulas se presentan a continuación:

Ecuación de pureza de astillas:

$$P \% = \frac{\text{masa de astillas de madera}}{\text{masa de astillas con corteza}} * 100$$

Ecuación de fracción de corteza:

$$C \% = 100 \% - P \%$$

### **3.3.3. Producción de pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP)**

Las astillas de madera con dos etapas de limpieza se utilizaron para la producción de dos tipos de pulpa: pulpa mecánica (RMP) y pulpa químico-mecánica (CMP).

- a. Pretratamiento de las astillas de madera (Método del Laboratorio de Pulpa y Papel).

Los pretratamientos realizados a las astillas de madera fueron con agua potable, y con Hidróxido de sodio (NaOH), las condiciones se detallan en la Tabla 6. Para el caso del segundo pretratamiento, adicionalmente, se tuvo que lavar las astillas de madera con agua corriente repetidas veces hasta retirar la solución residual (Figura 14).

**Tabla 6: Condiciones de los pretratamientos de astillas de madera de bolaina blanca**

Condiciones	Pretratamiento 1	Pretratamiento 2
Reactivo	Agua potable	Hidróxido de sodio (NaOH)
Tiempo de impregnación (h)	24	24
Temperatura (°C)	25 (ambiente)	25 (ambiente)
Presión (mmHg)	750 (ambiente)	750 (ambiente)
Concentración (g/L)	-	6,67
Relación NaOH <sub>(s)</sub> / masa seca (m/m)	-	1/20
Relación masa seca / solución (kg/L)	2/15	2/15
Tipo de pulpa	Mecánica (RMP)	Químico-Mecánica (CMP)



**Figura 14: Pretratamiento de las astillas de madera de bolaina blanca durante 24 horas A - con agua potable y B - con hidróxido de sodio 6,67 g/L**

b. Desfibrado de astillas de madera.

El proceso de desfibrado para ambas astillas pretratadas se ejecutó en dos etapas. La primera etapa se llevó a cabo en el desfibrador de discos *Bauer* de 300 mm con 0,35 mm de distancia entre discos (entrehierro). En la segunda etapa se utilizó el desfibrador de discos de 4 kW de potencia instalada, con 0,10 mm de entrehierro. El material generado por el desfibrado son los

componentes celulares de la madera (elementos vasculares, células parenquimáticas, entre otros) que fueron denominados como “fibras” para el presente estudio, entendiéndose de la existencia de las demás células (Figura 15).



**Figura 15: Desfibrado de las astillas de madera de bolaina blanca: A – primera etapa y B –segunda etapa**

c. Centrifugado y Secado de pulpa.

Después del desfibrado, las fibras fueron recogidas en bolsas de tela e ingresadas a la centrifugadora por 10 min para reducir su humedad. Luego, se realizó el secado de la pulpa en tres etapas debido a que el secado continuo provoca la formación de aglomerados de pulpa. Para la primera etapa, la pulpa fue extendida en bandejas de metal para meterlas a la estufa dejando la puerta entrecerrada a 60 °C durante 2 horas con remoción cada hora. Para la segunda etapa se empleó un molino de discos manual con entrehierro de 5 mm, donde se procesó la pulpa semi-húmeda, evitando así la formación de aglomerados. En la tercera etapa, la pulpa desagregada se regresó a la estufa en las mismas condiciones durante 2 horas más para el secado completo (Anexo 2).

d. Drenabilidad de la pulpa.

La determinación de la drenabilidad ( $^{\circ}$ SR) *Schopper-Riegler* para ambas pulpas se llevó a cabo de acuerdo a la norma SCAN M3-65 (Anexo 3).

e. Determinación del rendimiento de pulpa.

Para la determinación de rendimiento de astilla a pulpa, primero se pesó la pulpa centrifugada. Segundo, se tomaron tres muestras inferiores a un gramo de pulpa y se colocaron en la estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura para determinar el contenido de humedad. Luego, se pesaron las muestras después de 24 horas y se calculó el contenido de humedad en base masa húmeda. Finalmente, con ello se extrapoló y se calculó el rendimiento (R %) según la siguiente fórmula:

$$R \% = \frac{\text{masa seca de la pulpa}}{\text{masa seca de las astillas}} * 100$$

f. Clasificación de fibras *Bauer McNett*.

La clasificación de fibras se efectuó de acuerdo con la norma TAPPI T 233 cm-95 (1995). Se tomaron dos muestras de 7 g en base masa seca de cada tipo de pulpa. Luego se ingresaron las muestras en el clasificador de fibras *Bauer McNett* con las mallas N $^{\circ}$  30 (600  $\mu\text{m}$  de abertura), 50 (300  $\mu\text{m}$  de abertura), 100 (150  $\mu\text{m}$  de abertura) y 200 (75  $\mu\text{m}$  de abertura) por 20 min a 30 L/s de caudal. Las fracciones de pulpa se ingresaron a la estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura por 24 h para determinar el peso en base masa seca y calcular el porcentaje de las fibras retenidas en cada malla (Anexo 4).

g. Medición de parámetros morfológicos de fibra.

Los parámetros morfológicos de fibra de la RMP y CMP se midieron a partir de las fracciones obtenidas en la clasificación de fibras *Bauer McNett* con el Equipo *Morfi compact* para análisis

morfológico y porcentual de fibras de TECHPAP (Francia) (Kerekes y Schell, 1995). Los parámetros evaluados son:

- Longitud y ancho de fibra.

Los parámetros de longitud y ancho de fibra fueron esquematizados en gráficos de distribución (Anexos 5). El ancho de la fibra ( $\mu\text{m}$ ) fue representado por el promedio aritmético (Fórmula 1) de la distribución; sin embargo, para la longitud de fibra (mm) se utilizó el promedio ponderado (Fórmula 2) que dio más peso a las fibras más largas y redujo el efecto de partículas finas en los valores de longitud (Quijano-Solis *et al.*, 2009). Las ecuaciones se presentan a continuación:

Fórmula 1: Promedio aritmético del ancho de fibra ( $W_a$ )

$$W_a = \frac{\sum(W_i)}{N}$$

Fórmula 2: Promedio ponderado de la longitud de fibra ( $L_p$ )

$$L_p = \frac{\sum(L_i^2)}{\sum(L_i)}$$

Donde, “N” es el número total de fibras evaluadas; “ $W_i$ ” es el ancho de cada fibra y “ $L_i$ ” es la longitud de cada fibra

- Densidad lineal o *coarseness* (mg/m).

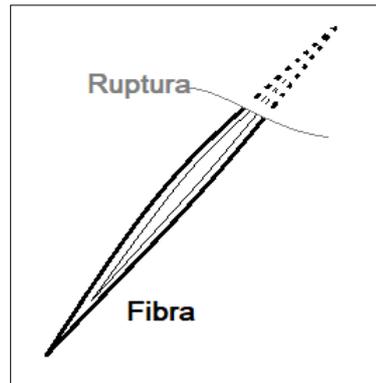
La densidad lineal de las fibras de la pulpa se expresa como el peso por unidad de longitud (mg/m), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\text{densidad lineal (mg/m)} = \frac{\text{masa de fibras}}{\text{sumatoria de longitudes de fibra}}$$

- Fibras cortadas o *broken ends* (%).

Las fibras cortadas se expresan como un porcentaje entre la cantidad de fibra que tienen el extremo roto y el número total de fibras detectadas en la pulpa (Figura 16).

$$\text{fibras cortadas (\%)} = \frac{\text{cantidad de fibras con extremos quebrados}}{\text{cantidad de fibras evaluadas}} * 100$$



**Figura 16: Representación gráfica del extremo quebrado de una fibra cortada**

- Relación cantidad/peso o *fiber population* ( $10^6/g$ ).

La relación cantidad/peso es la cantidad de fibras por unidad de peso y se expresa en millón por gramo. La fórmula se muestra a continuación:

$$\text{Relación cantidad/peso } (10^6/g) = \frac{\text{Cantidad de fibras evaluadas}}{\text{masa de las fibras}}$$

Los valores generales de RMP y CMP en todos los parámetros se obtuvieron mediante el promedio ponderado de la clasificación de fibras *Bauer McNett*.

### 3.3.4. Caracterización química

La caracterización química se realizó a las astillas de madera (AB) sin impurezas; a la pulpa mecánica (RMP); y a la pulpa químico-mecánica (CMP). Las muestras de astillas fueron molidas en un molino de cuchillas y tamizadas entre mallas de 40 y 60 mesh, mientras que las pulpas sólo fueron tamizadas. Los ensayos realizados se mencionan a continuación:

- La determinación de pH se realizó en base a la norma TAPPI T 252 om-98 (1998).
- La determinación del contenido de extractivos se realizó mediante gravimetría, previa extracción con alcohol etílico 96° en un sistema Soxhlet como se establece en la norma TAPPI T 204 cm-97 (1997).
- El contenido de lignina se determinó mediante el método Klason de acuerdo con la norma TAPPI T 222 om-98 (1998).
- Los contenidos de holocelulosa y alfa-celulosa se obtuvieron mediante el método de Jayme-Wise y la norma TAPPI T203 cm-99 (1999) respectivamente.
- El contenido de hemicelulosa fue calculado de la sustracción entre el contenido de holocelulosa y alfa-celulosa (Cruz *et al.*, 2018).
- El contenido de cenizas se determinó de acuerdo con la norma TAPPI T 211 om-93 (1993).
- Los contenidos de extractivos en agua fría y caliente se determinaron de acuerdo con la norma TAPPI T 207 cm-99 (1999).
- Sólo para el caso de las pulpas, adicionalmente, se determinó el contenido de extractivos en uno por ciento NaOH según la norma TAPPI T 212 om-02 (2002).

Todos los ensayos de caracterización química, con excepción del pH, se realizaron por triplicado (Anexo 6).

### 3.3.5. Elaboración de tableros MDF

Se fabricaron cuatro tipos de tableros MDF, con dos tipos de resina y dos tipos de pulpa. El proceso se detalla a continuación:

a. Acondicionamiento de las pulpas.

Tanto la RMP como la CMP fueron acondicionadas, lo cual consistió en secarlas a 60 °C durante 10-15 min para garantizar que el contenido de humedad sea reducido, aproximadamente entre 5-10 por ciento de contenido de humedad en base masa húmeda ( $CH_{bmh}$  %).

b. Preparación de adhesivos.

Los adhesivos utilizados para la aglutinación de las fibras fueron preparados a partir de dos resinas: (1) la resina úrea formaldehído (UF) y (2) la resina emulsión de polímero de isocianato (EPI) (Anexo 7). Ambas resinas se utilizaron en una dosis de 10 por ciento (peso sólido de resina/peso pulpa seca). La primera resina se mezcló con el catalizador sulfato de amonio en una dosis de 2,5 por ciento respecto a contenido de sólidos de la resina. La resina EPI se combinó con el catalizador de isocianato en una dosis del 15 por ciento (peso catalizador/peso resina EPI) y se adicionó agua destilada en una relación 1:1 entre el peso de resina EPI y agua. El contenido de sólidos de la UF fue de 65,39 por ciento, mientras que la EPI diluida fue de 23,01 por ciento.

c. Aplicación de adhesivos.

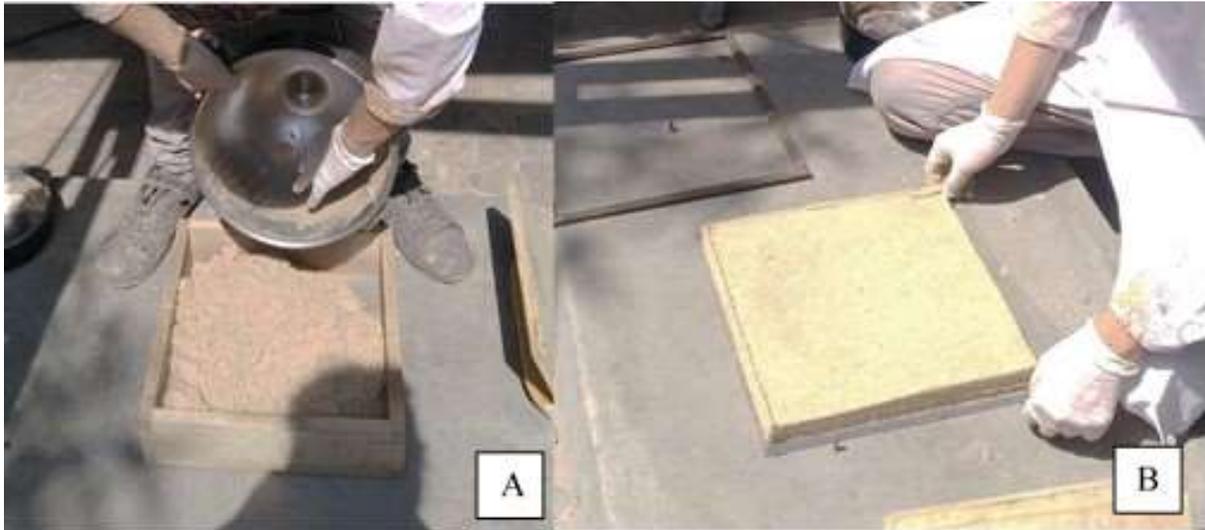
Las pulpas acondicionadas se trasvasaron a un recipiente de metal que fue colocado en la mezcladora. Luego, se aplicaron los adhesivos mediante pulverización con una pistola marca “Truper” modelo PIP-50 de boquilla 1,8 mm y 60 psi de presión de trabajo, que estuvo conectada a una compresora de aire (Figura 17).



**Figura 17: Aplicación de los adhesivos en las pulpas: A - mezcladora con pulpa cubierta; B - aplicación del adhesivo con la pistola y C - mezclado de pulpa con el adhesivo**

d. Prensado en frío.

Una vez aplicado el adhesivo correspondiente a las fibras, estas se llevaron a un molde de madera de 30 cm x 30 cm ubicado sobre una plancha cuadrada de metal. Se distribuyó el material de forma homogénea formando el manto fibroso (MAT) y con la tapa de madera se prensó de forma manual hasta reducir todo lo posible el espesor. Luego, se retiró el molde de madera, se colocó un marco de metal de 30 cm x 30 cm x 6 mm, y se ubicó una plancha de metal en la parte superior (Figura 18).



**Figura 18: Prensado en frío: A – llenado del molde cuadrado y B – formación del MAT**

e. Prensado en caliente.

El conjunto armado se llevó a la prensa de platos calientes “Tramelsa”. El ciclo de prensado caliente fue de 10 s para presión de 0 a 130 bar, 9 min y 40 s se mantuvo la presión en 130 bar y 10 s de liberación de presión, con temperatura estable de 180 °C (Figura 19).



**Figura 19: Prensado en caliente: A- conjunto armado: MAT, planchas y marco de metal, B - posicionamiento en la prensa y C - prensado en caliente propiamente dicho**

f. Acondicionamiento de los tableros MDF.

Los tableros MDF elaborados de 30 cm x 30 cm x 6 mm se dejaron enfriar al ambiente y bajo sombra durante 24 horas (Figura 20).



**Figura 20: Tableros MDF en acondicionamiento**

### **3.3.6. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

Esta evaluación se realizó para observar la estructura interna del tablero utilizando un microscopio electrónico de barrido marca Thermo Scientific, modelo Quantum 250; se prepararon cuatro muestras, uno por cada tipo de tablero MDF, con la ayuda de un bisturí se cortó el tablero hasta visualizar la zona interna. Las muestras fueron recubiertas con una solución diluída de oro, por 4 min; luego se visualizaron las imágenes en el microscopio (Anexos 8). Las fotografías tomadas son de cuatro niveles de aumento 32x, 300x, 600x y 1200x (Anexos 9).

### **3.3.7. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF**

Para los ensayos de determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF, inicialmente, se estableció el número de probetas por ensayo.

a. Preparación de probetas.

La cantidad de las probetas fue la mitad de lo sugerido por la norma EN 326-1 (1995) debido al tamaño de los tableros elaborados. Las dimensiones de las probetas para cada ensayo se indican en sus respectivas normas. La cantidad y dimensión de las probetas se presentan en la Tabla 7:

**Tabla 7: Cantidad y dimensiones de las probetas de los tableros MDF**

<b>Ensayo</b>	<b>Cantidad de probetas por tablero</b>	<b>Dimensiones de probeta (mm)</b>	<b>Norma técnica</b>
Densidad	3	50 x 50 x 6	EN 323 (1993)
Contenido de humedad	2	100 x 50 x 6	EN 322 (1993)
Hinchamiento del espesor del tablero después de 2 y 24 horas de inmersión en agua	4	50 x 50 x 6	EN 317 (1993)
Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión	3	170 x 50 x 6	EN 310 (1993)
Tracción perpendicular a la cara del tablero	4	50 x 50 x 6	EN 319 (1993)

La distribución de las probetas se realizó de forma tal que probetas del mismo ensayo se ubiquen distantes entre sí (Anexo 10). La elaboración de las probetas se logró mediante corte láser de los tableros MDF (Anexo 11).

b. Ensayos físicos y mecánicos de los tableros MDF.

Los ensayos se mencionan a continuación (Anexos 12):

- Densidad.

Para determinar la densidad del tablero se empleó la norma EN 323 (1993).

- Contenido de humedad.

Para determinar el contenido de humedad del tablero se utilizó la norma EN 322 (1993).

- Hinchamiento del espesor después de la inmersión en agua.

Para determinar el hinchamiento del espesor después de la inmersión en agua del tablero se utilizó la norma EN 317 (1993). Los tiempos de inmersión establecidos fueron a las 2 y 24 horas.

- Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión.

Los ensayos mecánicos de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión se realizaron de acuerdo con la norma EN 310 (1993). La velocidad del ensayo fue de 0,24 pulgadas por minuto (6,096 mm por minuto) y la luz fue de 150 mm.

- Resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero.

Para la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero se siguió la norma EN 319 (1993). La velocidad del ensayo fue de 0,0450 pulgadas por minuto (1,143 mm por minuto).

### 3.3.8. Diseño experimental

El diseño experimental corresponde a un arreglo factorial con dos variables independientes (factores), 2A x 2B, con 6 repeticiones. Se consideró como factor A al tipo de pulpa con dos niveles (mecánica y químico-mecánica) y como factor B al tipo de resina con dos niveles (úrea formaldehído y emulsión de polímero de isocianato). La combinación de los factores resultó en 4 tratamientos (RMP-UF; CMP-UF; RMP-EPI y CMP-EPI). En total se produjo 24 tableros de MDF de 300 mm x 300 mm x 6 mm. Las variables dependientes fueron: densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), contenido de humedad (% bms), hinchamiento del espesor después 2 horas de inmersión en agua (%), hinchamiento del espesor después 24 horas de inmersión en agua (%), módulo de ruptura ( $\text{N/mm}^2$ ), módulo de elasticidad ( $\text{N/mm}^2$ ), y tracción perpendicular a las caras del tablero ( $\text{N/mm}^2$ ).

### 3.3.9. Análisis estadístico

Se digitalizaron y ordenaron los datos para procesarlos en el programa Microsoft Excel 2013 para Windows. Además, se empleó el programa “R” versión 3.6.1 para el análisis estadístico de los resultados. Se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando el modelo estadístico de Diseño Factorial Completamente al Azar, para evaluar el efecto de los dos factores y de su interacción sobre las propiedades físicas y mecánicas del tablero MDF.

El modelo de diseño factorial utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$Y_{ijk}$ : Valor observado de la variable dependiente en estudio para la unidad experimental del bloque k sujeto al tratamiento j.

$\mu$ : media general.

$\alpha_i$  : efecto i-esimo tipo de pulpa.

$\beta_j$  : efecto la j-esimo tipo de resina.

$(\alpha\beta)_{ij}$  : efecto de la interacción del tipo de pulpa y el tipos de resina.

$\varepsilon_{ijk}$  : efecto del error aleatorio del tipo de pulpa y el tipos de resina.

Para la validación de este análisis se debió cumplir los supuestos de homocedasticidad y normalidad de errores. Luego, cuando se encontró que el efecto de la interacción era significativo, se prosiguió a emplear la prueba de Tukey para encontrar las diferencias específicas entre medias. Para las variables dependientes que no cumplieron con los supuestos y que tenían el efecto de la interacción significativo, se utilizó la prueba Kruskal-Wallis para encontrar las diferencias específicas entre medias. Mientras que, aquellas variables dependientes que no presentaron significancia en el efecto de la interacción, pero si tenían efecto significativo de alguno de los factores y cumplieron los supuestos, se empleó la prueba T-Student para comparar las medias.

Adicionalmente, se realizó un ANOVA utilizando el modelo estadístico de Diseño Completamente al Azar (DCA) para determinar si existen diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tres materiales (las astillas de madera y los dos tipos pulpas celulósicas) para la caracterización química. También se debió cumplir los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos. Posteriormente, si se encontraron diferencias significativas entre las medias, se prosiguió a emplear la prueba de Tukey para encontrar las diferencias específicas entre medias.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización de las astillas de madera

#### 4.1.1. Limpieza de las astillas de madera

En la Tabla 8 se muestra dos valores en porcentaje, el primero es la pureza de astillas que hace referencia a la porción de astillas de madera, y la segunda es la fracción de corteza. Ambos porcentajes suman el 100 por ciento del residuo de la descortezadora. Además, se presentaron tres etapas (inicial, primera limpieza y segunda limpieza) que están delimitadas por las actividades de limpieza realizadas al material. En la etapa inicial, los residuos presentaron 91,08 por ciento de pureza de astillas y 8,92 por ciento de corteza. Luego de realizar la primera limpieza, el porcentaje de pureza aumentó a 95,18 por ciento y la fracción de corteza disminuyó a 4,82 por ciento. Entonces, se decidió que a partir de esta etapa el material se llamaría “astillas de madera” a pesar de las impurezas presentes. En la segunda limpieza, también se retiró contaminantes principalmente los más finos mediante el tamizado con malla N° 20; sin embargo, no se logró un incremento sustancial de la pureza de astillas, resultando finalmente 95,19 por ciento y 4,81 por ciento de corteza.

**Tabla 8: Pureza de astillas y fracción de corteza de los residuos de madera de bolaina blanca en tres etapas**

Proporciones	Etapas		
	Inicial	Primera limpieza	Segunda limpieza
Pureza de astillas (%)	91,08	95,18	95,19
Fracción de corteza (%)	8,92	4,82	4,81

#### 4.1.2. Evaluación de las astillas de madera

Las características de las astillas de madera de bolaina blanca se presentan en la Tabla 9. El contenido de humedad promedio de las astillas previo a la producción de los tableros MDF fue 14,61 por ciento base masa seca (bms). La densidad básica promedio obtenida fue de 322,11

kg/m<sup>3</sup> y el espesor medio resultó 1,08 mm. La pureza de las astillas de madera empleadas para el presente estudio fue de 95,19 por ciento y su fracción de corteza fue 4,81 por ciento. La relación cantidad/peso fue de 2330 astillas por 10 g de material con el contenido de humedad descrito.

La baja densidad básica de las astillas de madera (322,11 kg/m<sup>3</sup>) respecto a lo indicado por Aróstegui y Sato (1970) para madera madura de un árbol de bosque natural (430 kg/m<sup>3</sup>) se explica porque las astillas provienen de árboles de bolaina blanca que aún no habían formado madera madura debido a su corta edad y pequeños diámetros, en consecuencia, el material lignocelulósico empleado provenía de madera juvenil (Myers *et al.*, 1996). En ese sentido, esta particularidad de la madera juvenil se caracteriza por presentar menor densidad respecto a la madera madura de la misma especie (Cobas *et al.*, 2013). Por otro lado, la densidad básica de las astillas de madera también es inferior a lo indicado por Chavesta *et al.* (2019) para la madera de árboles de plantación de 5 y 8 años (360 y 400 kg/m<sup>3</sup> respectivamente) y Tuisima *et al.* (2017) para madera de árboles de 8 años (443 kg/m<sup>3</sup>). Esto puede atribuirse a que esta propiedad física no depende de la edad sino del carácter genético (Zobel y Jett, 1995) y de su procedencia (Weber y Sotelo, 2008).

Respecto al espesor medio de las astillas de madera (1,08 mm), es preciso indicar que es un valor menor al rango de espesor medio de 4,30-4,40 mm de astillas de madera destinadas a la fabricación de tableros MDF indicado por Belini (2007). Esto se debe a que las astillas de madera provenientes de residuos no han sido generadas por una astilladora (chipeadora), sino por una máquina distinta que no tiene como fin producir astillas, como es la descortezadora.

La presencia de corteza en el material se debe a que este se obtuvo a partir de residuos de la etapa de descortezado de trozas. No se logró separar los fragmentos de corteza en su totalidad debido a lo difícil y costoso, aún cuando se habían realizado dos procesos de limpieza, de los cuales el segundo no incrementó sustancialmente la pureza del material lignocelulósico.

**Tabla 9: Características de las astillas de madera de bolaina blanca**

<b>Características</b>	<b>Astillas de madera de bolaina blanca</b>
Contenido de Humedad (% bms)	14,61
Densidad Básica (kg/m <sup>3</sup> )	322,11
Espesor medio (mm)	1,08
Pureza (%)	95,19
Corteza (%)	4,81
Relación cantidad/peso (g <sup>-1</sup> )	233

#### 4.1.3. Clasificación de las astillas de madera

En la Tabla 10 se presenta los resultados de las astillas de madera clasificadas según su tamaño con ayuda de los tamices de malla N° 5 (4,00 mm), 8 (2,36 mm) y 20 (0,85 mm) (Figura 21). Además, se determinó en cada fracción del tamiz la retención en porcentajes (%), el espesor medio en milímetros (mm) y la relación cantidad/peso. Los valores de retención mayores ocurren en las fracciones -5/+8 y -8/+20, es decir las astillas de madera de longitudes entre 4,00 y 0,85 mm representan 83,42 por ciento del material. El espesor medio de las fracciones +5, -5/+8 y -8/+20 son cercanos entre sí y a la media general (1,08 mm). La relación cantidad/peso muestra una tendencia creciente como era previsible, puesto que a peso constante, mientras menor sea el tamaño de la partícula mayor es la cantidad de astillas.

**Tabla 10: Clasificación granulométrica, espesor medio y relación cantidad/peso de las astillas de madera clasificadas de bolaina blanca**

<b>Fracción del tamiz</b>	<b>+5</b>	<b>-5/+8</b>	<b>-8/+20</b>	<b>-20</b>
Abertura del tamiz (mm)	> 4,00	4,00 – 2,36	2,36 – 0,85	< 0,85
Retención (%)	13,70	43,91	39,51	2,87
Espesor Medio (mm)	1,17	1,20	0,98	0,27
Relación cantidad/peso (g <sup>-1</sup> )	25	102	468	-



**Figura 21: Clasificación granulométrica de las astillas de madera de bolaina blanca**

#### **4.2. Caracterización de las pulpas celulósicas**

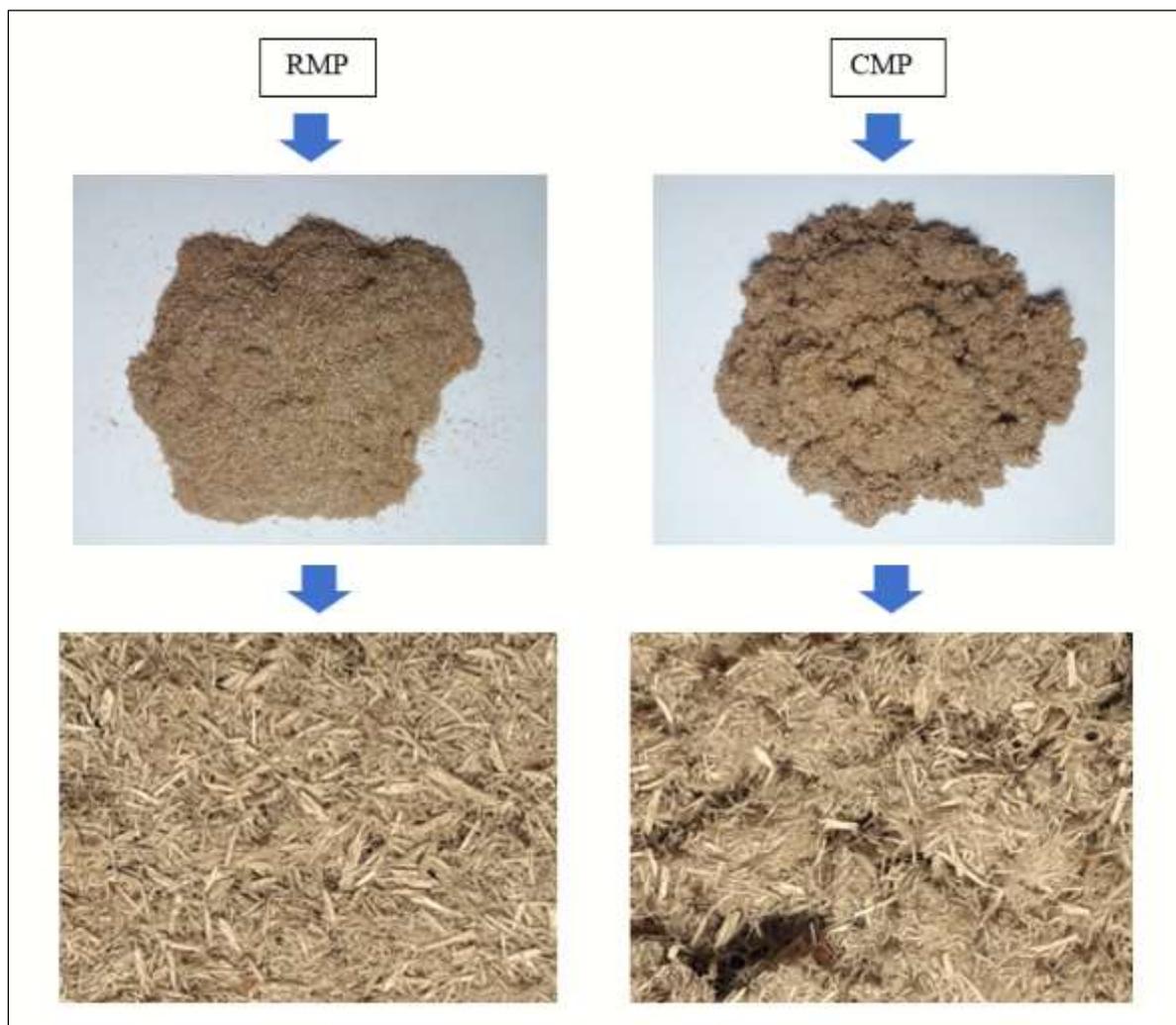
Se fabricaron dos tipos de pulpa celulósica: mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP). Ambos tipos de pulpa se muestran en la Figura 22 y sus características se presentan en la Tabla 11. En ambos procesos de pulpeo se obtuvieron altos rendimientos. El rendimiento de la RMP (93,70 %) se encuentra dentro del rango de 85-95 por ciento mencionado por De Souza *et al.* (2015). Por otro lado, el rendimiento de la CMP (88,76 %) producidas a partir de las astillas de bolaina blanca es superior al 85 por ciento como lo indican Zhang *et al.* (2018). Asimismo, Ortíz y Bueno (1987) también realizaron este tipo de pulpa con la madera de la especie *Eucalyptus globulus* Labill y obtuvieron rendimientos de pulpeo cercanos, de 82,9 y 85,7 por ciento.

Se puede afirmar que el rendimiento de la RMP es superior al de la CMP. Esto se explica porque en el primer proceso, RMP, la mayoría de los componentes de madera permanecen en la pulpa (De Souza *et al.*, 2015). Mientras en el proceso a la soda en frío de la CMP se eliminan más cantidad de materiales no fibrosos (Stellman, 2001). Ello se atribuye a que el hidróxido de sodio

reduce el rendimiento de las pulpas (Solár, 2011) aunque la mayor parte de la lignina se mantiene (Zhang *et al.*, 2018).

Los solubles en soda cáustica fueron superiores en la RMP (17,44 %), respecto a los de la CMP (14,30%). Estos resultados se explican porque el reactivo recae sobre los carbohidratos de bajo peso molecular y fracciones amorfas, como las hemicelulosas y las regiones amorfas de la celulosa (Saldívar, 2005). El hecho de que existan menos solubles en NaOH al uno por ciento en la CMP implica que muchos de ellos ya fueron eliminados con el pretratamiento. Por consiguiente, su rendimiento de pulpa se reduce. Mientras que la RMP no ha perdido solubles en NaOH por lo cual su rendimiento de pulpa es mayor.

Respecto a la drenabilidad, la RMP y la CMP obtuvieron 9,80 °SR y 9,00 °SR respectivamente. Este factor está relacionado con las condiciones superficiales de la fibra y con su hinchamiento. Estos resultados se explican porque no se realizó el refinado a las pulpas que usualmente se emplea para separar las fibrillas de la pared celular como filamentos adheridos a ella, lo cual incrementa la superficie específica de la fibra y permite obtener valores de drenabilidad *Schopper-Riegler* más elevados.



**Figura 22: Pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP)**

**Tabla 11: Rendimiento, Solubilidad en NaOH al uno por ciento y drenabilidad de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP)**

<b>Características</b>	<b>RMP</b>	<b>CMP</b>
Rendimiento de pulpeo (%)	93,70	88,76
Solubilidad en NaOH 1% (%)	17,44	14,30
Drenabilidad ( <i>Schopper-Riegler</i> )	9,80	9,00

### 4.3. Caracterización morfológica de las fibras clasificadas

#### 4.3.1. Clasificación de fibras.

Los porcentajes de fibras retenidas en el Clasificador de fibras *Bauer McNett* de la RMP y la CMP clasificadas en cinco fracciones se presentan en la Tabla 12, donde se muestra el número de malla, relacionada con la abertura y el tamaño probable de la fibra que atraviesa la malla (US Standard Mesh Chart).

El porcentaje fibras de longitudes mayores a 300  $\mu\text{m}$  (50 mesh) supera el 50 por ciento en la CMP, mientras que en la RMP son inferiores al 40 por ciento. Esta superioridad de la CMP se atribuye al efecto del pretratamiento con NaOH sobre la madera por medio de reacciones de hidrólisis en la lámina media, lo cual provoca el debilitamiento de los enlaces interfibrilares (De la Macorra, 2004), obteniendo como resultado fibras enteras y individuales en su mayoría (Figuras 23-A y 24-A).

Por otro lado, las fibras de longitudes menores a 300  $\mu\text{m}$  (50 mesh) son el 60,73 por ciento en la RMP, mientras que en la CMP son 48,44 por ciento. Esta superioridad se debe a la mayor presencia de fibras finas y de microfibrillas que se desprendieron de la superficie de la fibra en la RMP. Asimismo, una parte de los componentes finos de la pulpa se formó por la separación de las células del parénquima, los radios y los elementos vasculares. Estos resultados se deben a la separación abrupta de las fibras durante la fabricación de la RMP (Figuras 23-B y 24-B).

**Tabla 12: Clasificación de fibras por el método de *Bauer McNett* de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP)**

Fracción del tamiz	Abertura del tamiz ( $\mu\text{m}$ )	Fibras retenidas (%)	
		RMP	CMP
+30	> 600	13,33	30,01
-30/+50	600 – 300	25,95	21,55
-50/+100	300 – 150	15,52	11,25
-100/+200	150 – 75	8,21	6,18
-200	< 75	37,00	31,01

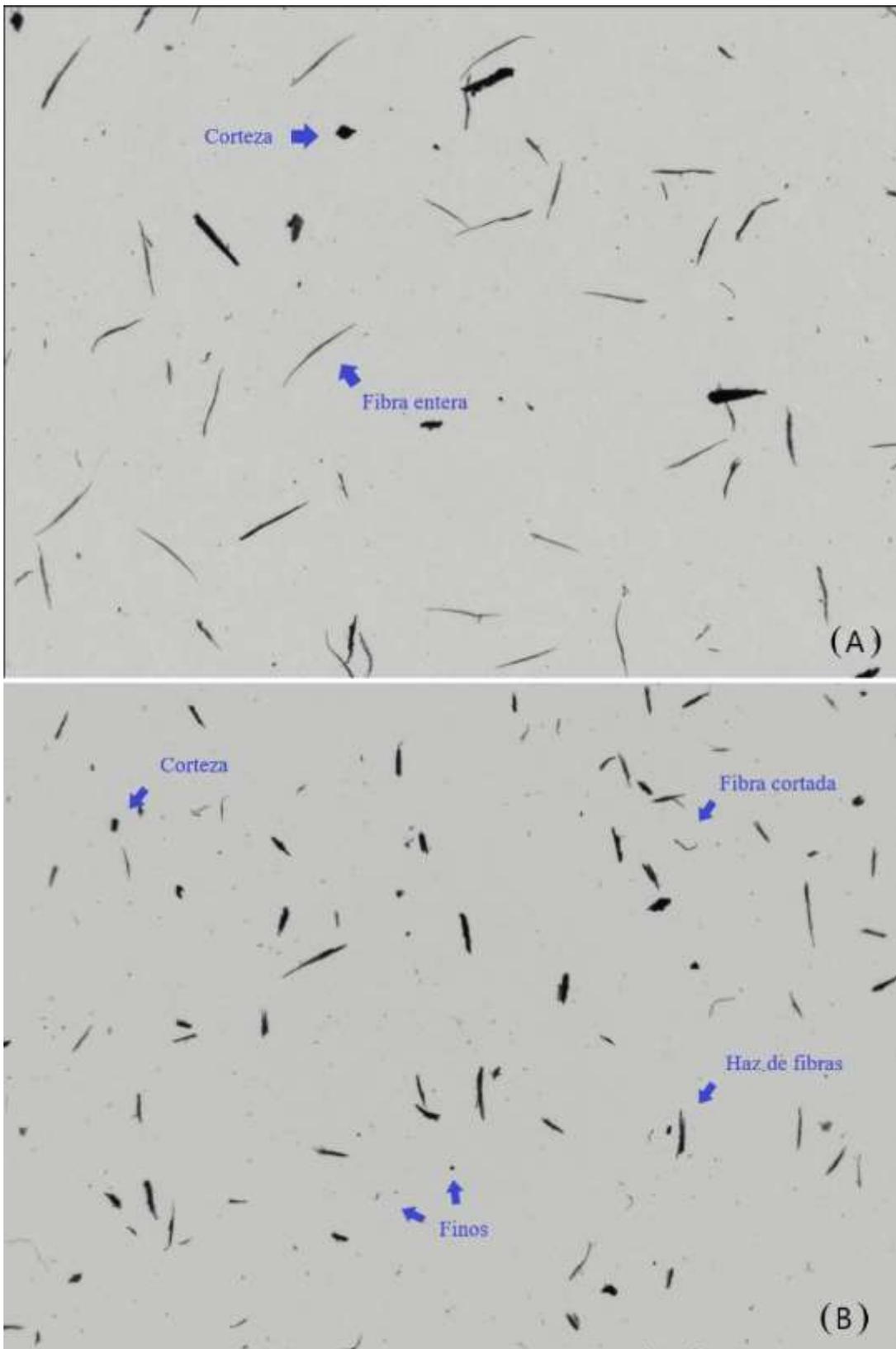


Figura 23: Imágenes microscópicas de los componentes de las pulpas: A - CMP y B - RMP

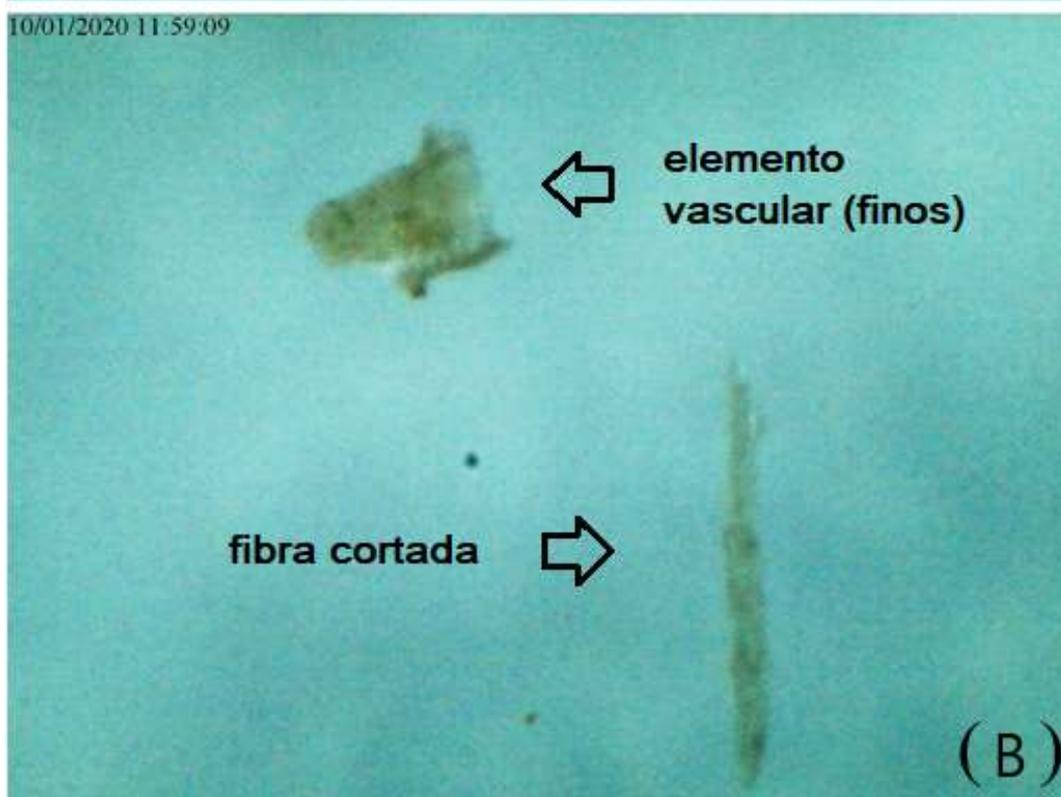


Figura 24: Imágenes microscópicas de las fibras: A – fibras enteras de la CMP y B - finos y fibras cortadas de la RMP

### 4.3.2. Parámetros morfológicos de las fibras.

Las mediciones de las fibras de ambas pulpas se realizaron de todas las fracciones retenidas en el Clasificador de fibras *Bauer McNett*, es decir, +30; -30/+50; -50/+100 y -100/+200 (Anexo 5). En la Tabla 13 se muestran los resultados promedios de los parámetros siguientes: número de fibras evaluadas, longitud de fibra, ancho de fibra, densidad lineal, fibras cortadas y relación cantidad/peso. Estos parámetros morfológicos de la fibra juegan un papel importante en la determinación de las propiedades de los materiales compuestos (Mertens *et al.*, 2017).

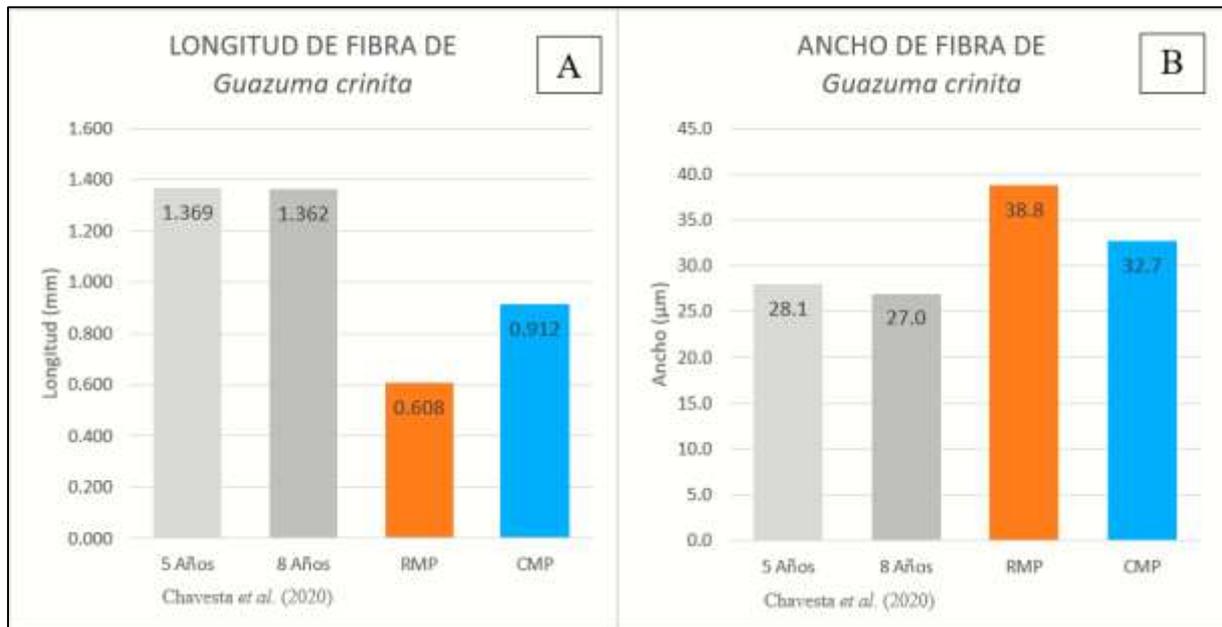
**Tabla 13: Mediciones de las fibras de la pulpa mecánica (RMP) y químico-mecánica (CMP), evaluadas en el equipo *Morfi compact***

<b>Parámetros morfológicos</b>	<b>RMP</b>	<b>CMP</b>
Longitud de fibra (mm)	0,608	0,912
Ancho de fibra ( $\mu\text{m}$ )	38,8	32,7
Densidad lineal (mg/m)	2,141	0,814
Fibras cortadas (%)	42,21	28,85
Relación cantidad/peso ( $10^6/\text{g}$ )	1,261	2,542

La CMP posee fibras (0,912 mm) más larga que la RMP (0,608 mm) en un 50,00 por ciento. Mientras que el ancho de fibra de la RMP (38,8  $\mu\text{m}$ ) es mayor en un 18,65 por ciento que en la CMP (32,7  $\mu\text{m}$ ). En otras palabras, la RMP tiene fibras más cortas y anchas, mientras que la CMP posee fibras más largas y delgadas. No obstante, estos valores de longitud de fibra son inferiores a lo registrado por Chavesta *et al.* (2020) para madera de *Guazuma crinita* de 5 y 8 años (Figura 25-A).

La longitud de fibra, según Hillman (1998), está influenciada por la especie maderable, las condiciones de crecimiento, la posición dentro del tronco y los métodos de tratamientos mecánicos. En ese sentido, el hecho de que la CMP presente una mayor longitud de fibra es porque el pretratamiento alcalino ha influenciado para obtener mayor cantidad de fibras enteras, siendo por consiguiente con una mayor longitud respecto a la RMP.

Acerca de los valores de ancho de fibra, los resultados de la CMP y RMP son superiores por lo indicado por Chavesta *et al.* (2020) (Figura 25-B).



**Figura 25: Comparación de las dimensiones de fibra de bolaina blanca: A – longitud y B - ancho**

El valor de densidad lineal de la RMP (2,141 mg/m) es más del doble (163,02 %) que la CMP (0,814 mg/m). Este parámetro está influenciado por el ancho de la fibra y el espesor de la pared celular (Perng *et al.*, 2009), así como la densidad del material celulósico que compone la fibra (Ramírez-Coretti, 1996). En ese sentido, se afirma que la RMP es una materia fibrosa más densa que la CMP.

Las fibras cortadas de la RMP (42,21 %) son cerca de la mitad de las fibras obtenidas de esta pulpa, mientras que para la CMP (28,85 %) son casi la cuarta parte (Figura 22). Al comparar ambas pulpas, las fibras cortadas de la RMP son muy superiores a las de la CMP en un 46,31 por ciento. Esta superioridad se explica por la mayor cantidad de rupturas de fibras debido a la ausencia del pretratamiento químico con hidróxido de sodio.

La relación cantidad/peso es mayor en la CMP ( $2,542 \times 10^6$ /g) que en la RMP ( $1,261 \times 10^6$ /g) en 101,59 por ciento. Para ambas pulpas, este parámetro es inferior al rango  $10,0 - 15,0 \times 10^6$ /g indicado para fibras de pulpa de madera de latifoliada por Perng *et al.* (2009). Es evidente que

existe una relación inversamente proporcional fuerte entre la relación cantidad/peso y la densidad lineal. Cabe mencionar que las fibras de la CMP presentan una ventaja al tener un mayor número de enlaces disponibles por unidad de longitud debido a su baja densidad lineal y elevada relación cantidad/peso respecto a las de la RMP (Nordström y Hermansson, 2018). Sin embargo, esto hace susceptible al colapso de las fibras de la CMP, lo cual afectaría negativamente la resistencia de las mismas y del producto final (Kerekes y Schell, 1995).

#### 4.4. Caracterización química de astillas y pulpas

En la Tabla 14 se muestran los resultados de la caracterización química de las astillas de madera (AB) de plantación forestal de bolaina blanca con edades entre 5 y 8 años y de dos tipos de pulpas (RMP y CMP).

**Tabla 14: Caracterización química de astillas de madera y pulpas RMP y CMP de bolaina blanca**

Componentes	Astillas de madera	Pulpas	
	AB	RMP	CMP
pH	6,50	7,75	8,19
Holocelulosa (%)	87,43 <sup>a</sup> (0,55)	80,78 <sup>b</sup> (0,37)	77,32 <sup>c</sup> (0,42)
Alfa-celulosa (%)	53,57 <sup>a</sup> (1,34)	53,97 <sup>a</sup> (0,66)	53,22 <sup>a</sup> (0,70)
Hemicelulosa (%)	33,86 <sup>a</sup> (3,33)	26,81 <sup>b</sup> (1,83)	24,10 <sup>c</sup> (1,60)
Lignina (%)	21,81 <sup>c</sup> (1,05)	24,87 <sup>b</sup> (1,56)	26,04 <sup>a</sup> (2,51)
Extractivos en etanol (%)	0,77 <sup>b</sup> (2,88)	1,57 <sup>a</sup> (9,31)	0,56 <sup>b</sup> (4,10)
Solubilidad en agua caliente (%)	3,51 <sup>c</sup> (9,74)	4,78 <sup>b</sup> (8,10)	7,49 <sup>a</sup> (4,11)
Solubilidad en agua fría (%)	4,34 <sup>b</sup> (9,99)	9,06 <sup>a</sup> (3,36)	4,52 <sup>b</sup> (6,66)
Cenizas (%)	0,77 <sup>c</sup> (3,39)	1,73 <sup>b</sup> (7,47)	3,81 <sup>a</sup> (3,29)

*Nota:* Los promedios dentro de una fila con letras distintas presentan una diferencia significativa en  $p < 0,05$  (prueba de Tukey). Los valores entre paréntesis son Coeficientes de Variación (CV %).

Para las astillas de madera de bolaina blanca, los contenidos de holocelulosa, alfa-celulosa y hemicelulosa fueron superiores a lo encontrado por Miguel *et al.* (2019) para madera de plantación de cuatro años, pero no el de lignina. Estos resultados demuestran que las astillas de madera provenientes del descortezado de trozas de bolaina blanca pueden ser tomadas en cuenta en la elaboración de papeles, cartones y tableros de fibra.

El contenido de extractivos en etanol de las astillas de madera de bolaina blanca resultó ser menor al uno por ciento. Mientras que los solubles en agua fría y caliente fueron 4,34 por ciento y 3,51 por ciento, respectivamente. Tanto el etanol como el agua, son solventes polares que van a extraer compuestos polares como las sales, gomas y carbohidratos. Cabe mencionar que la cantidad de extractivos afecta el rendimiento de la producción de CMP debido a que el reactivo NaOH degrada estos compuestos.

Comparando las astillas de madera de bolaina blanca con las pulpas, se puede afirmar que la transformación mecánica o químico-mecánica redujo los contenidos de holocelulosa y hemicelulosa, pero manteniendo constante la alfa-celulosa. La reducción de las hemicelulosas es consecuencia de los pretratamientos tanto con agua potable como con hidróxido de sodio (Potucek *et al.*, 2016).

Por otro lado, el contenido de lignina y cenizas han incrementado en las pulpas. También los contenidos de extractivos y de solubles en agua aumentaron. Esto se debe a que la presencia del cinco por ciento de corteza en las pulpas que contribuyó (Akgül y Akça, 2020).

En la comparación entre los dos tipos de pulpas, la RMP presenta mayor contenido de holocelulosa que la CMP. Esta superioridad se atribuye al mayor contenido de hemicelulosa que posee la RMP sobre el CMP y esto a su vez se explica por la acción del NaOH en el pretratamiento de las astillas. Además, este resultado explica el menor rendimiento de pulpa de CMP.

El hecho de que la CMP tenga menos solubles en NaOH al uno por ciento (Tabla 10) confirma el menor contenido de hemicelulosa respecto a la RMP. La degradación de la hemicelulosa disminuye la hidrofilia de la fibra debido a menos sitios de enlaces para que las moléculas de agua se unan (Grigsby *et al.*, 2012).

Respecto al contenido de alfa-celulosa, no hubo diferencias entre ambas pulpas lo que se esperaba ya que ninguno de los reactivos de los pretratamientos reacciona con este componente (Zanuttini y Marzocchi, 2003).

El contenido de lignina es superior en la CMP respecto a la RMP. La lignina posee carácter hidrófobo por lo que no fue extraída por el flujo de agua del desfibrado. Además, tampoco reacciona con la soda caústica, por lo cual no se vio afectada por el álcali (Zanuttini y Marzocchi, 2003).

Para la producción de pulpa, es deseable que los componentes no celulósicos de las paredes celulares de las fibras como la hemicelulosa, lignina, entre otros sean escasos o nulos, ya que interfieren con los enlaces entre las fibras lo cual merma la resistencia del producto final (Potucek *et al.*, 2016).

Por otro lado, la CMP tiene ventaja sobre la RMP puesto que su menor contenido de solubles en agua fría, le confiere a la pulpa mayor hidrofobicidad del tablero MDF elaborado (Grigsby *et al.*, 2012).

Ye *et al.* (2007) mencionaron que las fibras tecnológicamente valiosas para la producción de MDF son largas, de pared celular gruesa, y de alto contenido de celulosa. Estas características las cumple primero la RMP, luego la CMP. Sin embargo, se debe considerar que el tablero MDF es un compuesto, que también depende de la resina y de los enlaces formados en su interior.

#### 4.5. Propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF

Los tableros MDF elaborados, superficialmente, son similares en apariencia. En ellos se logra observar la disposición desordenadas de las fibras y la presencia de restos de corteza (Figura 26).

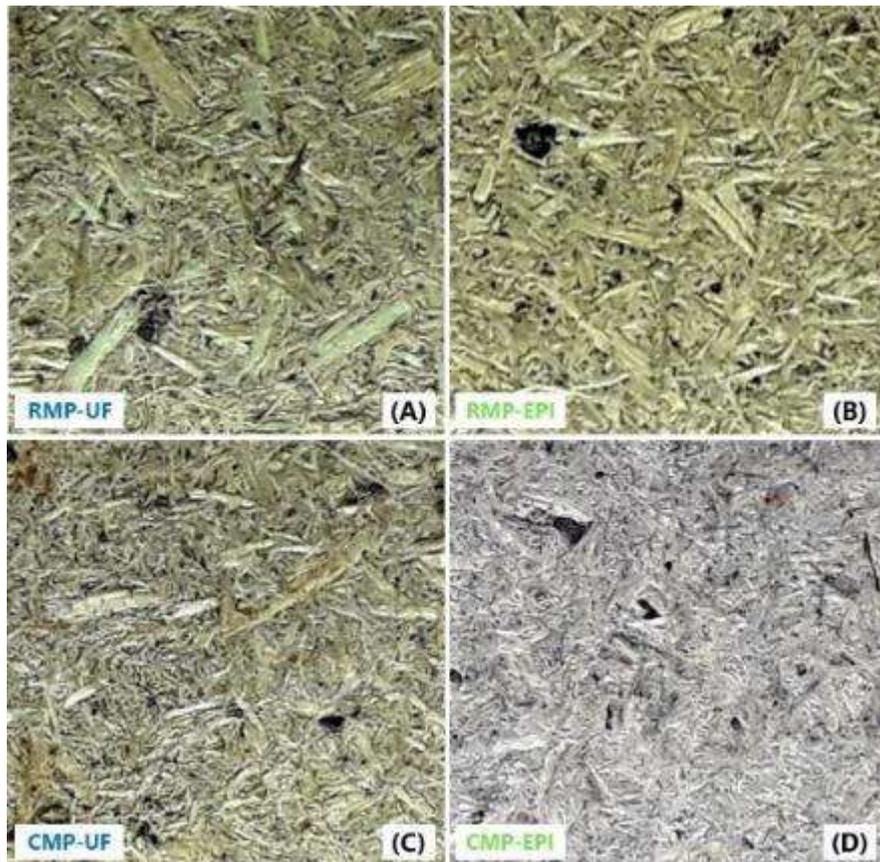


Figura 26: Superficie de los cuatro tipos de tableros MDF.

En la Tabla 15 se presenta los valores de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros MDF elaborados.

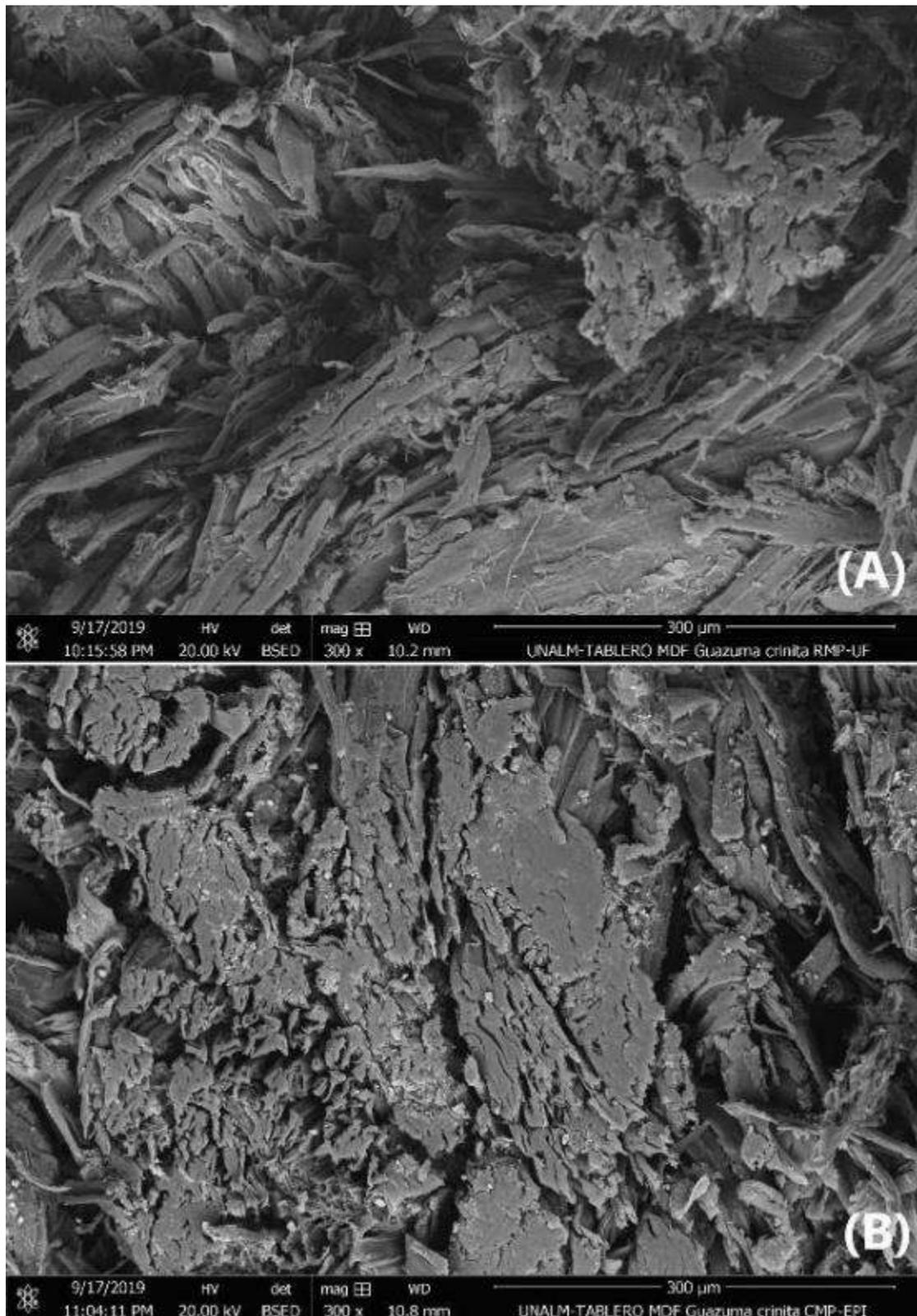
**Tabla 15: Propiedades físicas y mecánicas de los cuatros tipos de tableros MDF**

Propiedades físicas y mecánicas	Método y Ensayo	Unidades	Tipo de tablero MDF				Prueba estadística
			RMP-UF	CMP-UF	RMP-EPI	CMP-EPI	
Densidad	EN 323	kg/m <sup>3</sup>	641,70 <sup>c</sup> (10,22)	658,91 <sup>bc</sup> (7,36)	694,43 <sup>b</sup> (8,11)	788,31 <sup>a</sup> (8,20)	Tukey
Contenido de humedad (CH)	EN 322	%	8,28 (2,97)	8,05 (5,23)	7,20 (7,60)	7,25 (6,73)	T-Student (Factor tipo de resina)
Hinchamiento del espesor del tablero después de 2 horas de inmersión en agua	EN 317	%	26,61 <sup>b</sup> (11,02)	33,74 <sup>a</sup> (11,35)	16,46 <sup>d</sup> (11,39)	21,11 <sup>c</sup> (5,60)	Kruskal-Wallis
Hinchamiento del espesor del tablero después de 24 horas de inmersión en agua	EN 317	%	29,38 <sup>b</sup> (10,80)	37,81 <sup>a</sup> (10,83)	18,42 <sup>d</sup> (11,49)	23,29 <sup>c</sup> (6,03)	Kruskal-Wallis
Módulo de ruptura (MOR)	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	11,76 <sup>bc</sup> (29,92)	9,26 <sup>c</sup> (23,09)	13,79 <sup>ab</sup> (26,28)	15,12 <sup>a</sup> (21,40)	Tukey
Módulo de elasticidad (MOE)	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	1378,70 <sup>b</sup> (26,08)	1068,00 <sup>b</sup> (29,26)	1794,52 <sup>a</sup> (24,54)	1856,79 <sup>a</sup> (21,15)	Tukey
Tracción perpendicular a la cara del tablero	EN 319	N/mm <sup>2</sup>	0,46 <sup>b</sup> (50,11)	0,42 <sup>b</sup> (50,41)	0,46 <sup>b</sup> (37,25)	0,64 <sup>a</sup> (38,16)	Kruskal-Wallis

*Nota:* Los promedios dentro de una fila con letras distintas presentan diferencia significativa en  $p < 0.05$ . Los valores entre paréntesis son Coeficientes de Variación (CV %).

#### 4.5.1. Densidad

En la densidad del tablero MDF, las variables tipo de pulpa ( $p < 0,001$ ) y tipo de resina ( $p < 0,001$ ) tuvieron influencia muy altamente significativa, mientras que la interacción ( $p = 0,008$ ) fue altamente significativa. La densidad de los tableros con EPI resultó mayor respecto a los tableros con UF, esto se evidencia porque existe mayor proximidad entre las fibras en los tableros con EPI que en los tableros con UF (Figura 27). Entre los tipos de pulpa, los tableros con CMP fueron los que mostraron mayor densidad respecto a los tableros con RMP, es decir ambas resinas lograron una mejor unión entre fibras con la CMP. El tipo de tablero CMP-EPI fue el que obtuvo la mayor densidad (Figura 28).



**Figura 27: Imágenes SEM de la región interna de los tableros MDF: A - espacios vacíos entre fibras en los tableros con UF y B - compactación de fibras en los tableros con EPI**

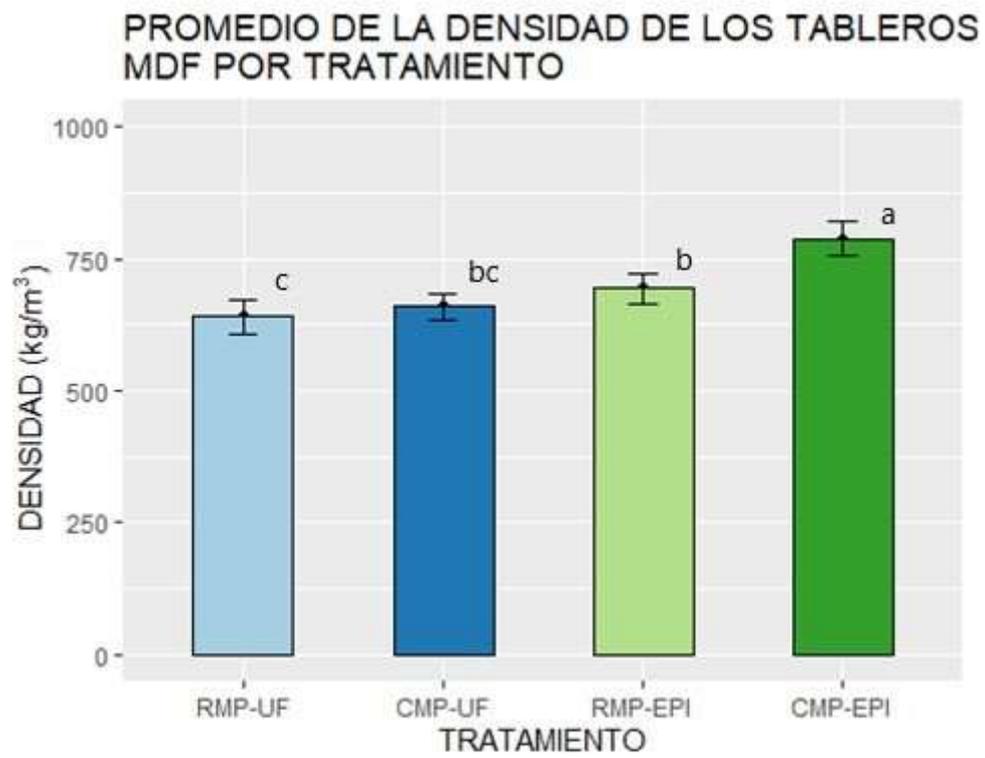


Figura 28: Densidad de los cuatro tipos de tableros MDF

#### 4.5.2. Contenido de humedad (CH)

Respecto al contenido de humedad de los tableros MDF, solamente hubo influencia muy altamente significativa por el tipo de resina ( $p < 0,001$ ). Los tableros con EPI presentaron CH menores que los tableros con UF. Esto puede atribuirse a la mayor cantidad de espacios vacíos dentro de los tableros con UF, debido a su menor densidad, que expone a las fibras a retener mayor humedad del ambiente. Por otro lado, el menor CH de los tableros con EPI se explica por una de sus principales propiedades de la resina fraguada, la hidrofobicidad (Figura 30). Esta particularidad se explica por los enlaces uretanos formados entre la resina EPI y los grupos hidroxilos de los componentes de la madera, que son no reactivos con el agua. Ello sugiere que los tableros MDF elaborados con EPI presentan mejores resultados para la fabricación de productos de mayor valor agregado.

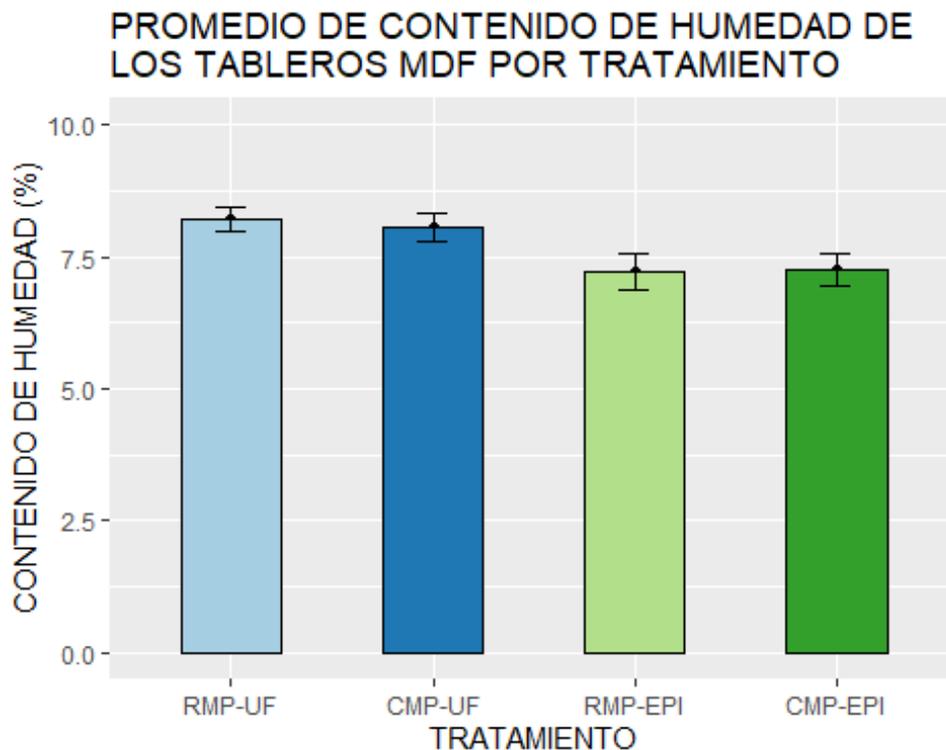


Figura 29: Contenido de humedad de los cuatro tipos de tableros MDF

### 4.5.3. Hinchamiento del espesor de tablero a las 2 y 24 horas de inmersión en agua

Los resultados en el ensayo de hinchamiento del espesor del tablero por inmersión en agua por 2 horas y 24 horas, mostraron que los factores tipo de pulpa ( $p < 0,001$  y  $p < 0,001$ , respectivamente) y tipo de resina ( $p < 0,001$  y  $p < 0,001$ , respectivamente) tuvieron influencia muy altamente significativa. Además, existió influencia significativa y altamente significativa en la interacción de los factores ( $p = 0,024$  y  $p = 0,003$ , respectivamente). Entre los tipos de pulpa, los tableros con RMP sufrieron menor hinchamiento del espesor que los tableros con CMP. Entre los tipos de resina, los tableros con EPI tuvieron menor hinchamiento del espesor que los tableros con UF. Entre los tratamientos, el tablero CMP-UF obtuvo los hinchamientos del espesor más elevados, seguido por RMP-UF, CMP-EPI y RMP-EPI, en ese orden (Figura 30). En este sentido, se comprueba que los tableros elaborados con EPI demuestran una mejor unión entre sus fibras, por consiguiente un mayor número de enlaces sostenibles entre fibras que contrarresta las fuerza de separación debido a la humedad (Halvarsson *et al.*, 2008). Además, el buen entrelazamiento de fibras reduce la porosidad del tablero, y así disminuye la capacidad de captar agua entre sus fibras (Ceccarelli y Gonzales, 2016).

Los tableros con UF sufrieron mayor hinchamiento del espesor debido al rendimiento en inmersión en agua extremadamente pobre de la resina (Grigsby *et al.*, 2012). Además, se puede atribuir este desempeño a que la resina no logró aglutinar efectivamente a las fibras porque el pH no estuvo debajo de 6, condición con la cuál se asegura el fraguado efectivo de la resina UF (Halvarsson *et al.*, 2008).

La mayor proporción de fibras cortadas y hemicelulosa de la RMP hacia suponer que sus tableros se hidratarían más que con la CMP, pero ocurrió lo contrario (Figura 31). La menor capacidad de hidratación de la RMP se puede atribuir a la lámina media adherida a la superficie la fibra, la cual está constituida mayormente por lignina de carácter hidrofóbico (Bellido *et al.*, 2003). Por otro lado, es muy probable que el pretratamiento con álcali haya provocado la mayor disponibilidad de radicales hidroxilo de la fibra de la CMP, logrando que sus enlaces capten agua con mayor facilidad (puente de hidrógeno) desencadenando el hinchamiento del espesor del tablero (Ceccarelli y Gonzales, 2016).

Otro factor que influye en el mayor hinchamiento de los tableros es la presencia de las partículas de corteza, debido a que interfieren con la adhesión entre la pulpa y la resina, generando espacios vacíos dentro del tablero (Tinti et al., 2018); a pesar de ello, la resina EPI controla mejor que la UF este efecto.

Asimismo, la mayor parte del hinchamiento del espesor en los cuatro tipos de tablero MDF se llevó a cabo en las primeras 2 horas de inmersión, puesto que en las 22 horas restantes, la expansión fue mucho menor. Esto implica que no se requiere de mucho tiempo de inmersión en agua para hinchar el espesor de los tableros MDF considerablemente.

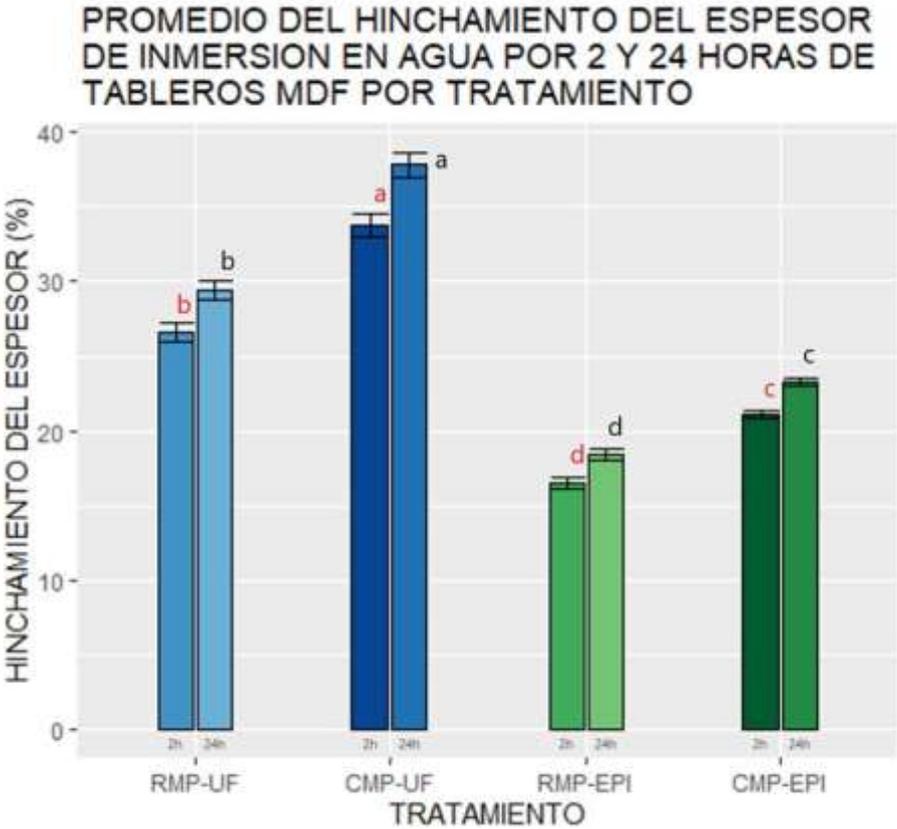


Figura 30: Hinchamiento del espesor de los cuatro tipos de tableros MDF después de inmersión en agua por 2 y 24 horas

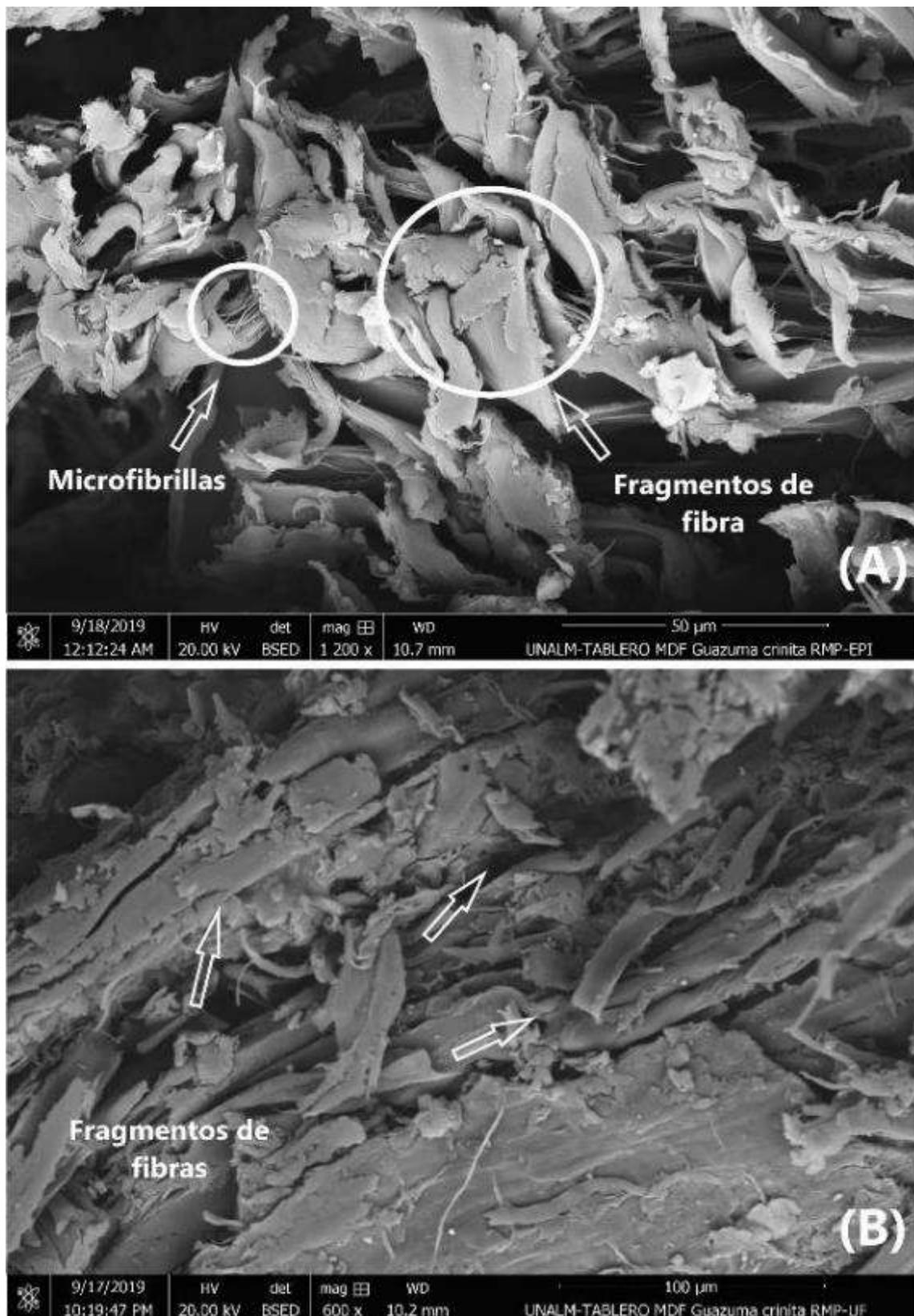


Figura 31: Imágenes SEM de las fibras en los tableros con RMP: A - microfibrillas y B - fragmentos de fibra

#### 4.5.4. Módulo de ruptura (MOR)

En el MOR del ensayo de flexión, el tipo de resina ( $p < 0,001$ ) tuvo influencia muy altamente significativa y la interacción de los dos factores ( $p = 0,013$ ) solamente influencia significativa. Los tableros con mayor MOR fueron, de mayor a menor, CMP-EPI, RMP-EPI, RMP-UF y CMP-UF (Figura 32). La mejor resistencia de los tableros CMP-EPI respecto al CMP-UF se atribuye a la resina EPI que logró formar enlaces fuertes con la CMP. Esto indica que es posible obtener buena resistencia de tableros MDF sin la necesidad de emplear un catalizador ácido como el sulfato de amonio. La no diferencia estadística en los resultados de MOR de los tableros con EPI da a entender que la influencia de la pulpa no es importante en la resistencia del tablero. Es decir, la resina EPI logra una aglomeración adecuada ya sea que la pulpa tenga 0,912 o 0,608 mm de longitud de fibra. Además, esta resina logra trabajar bien con pulpas de pH de 8, bajo condiciones de calor y presión.

Los valores de MOR de los tableros de RMP-EPI y RMP-UF no son significativamente distintos lo que implica que ambas resinas tienen igual desempeño en tableros con RMP. Por otro lado, el resultado de MOR del tablero RMP-EPI no es estadísticamente diferente al de CMP-EPI. Su buen desempeño se debe a los enlaces formados entre las fibras y la resina.

En los tableros elaborados con EPI, se observa formaciones blanquecinas de aspecto granular adheridas superficialmente a las paredes celulares de las fibras (Figura 33-A). Sin embargo, esta particularidad no se aprecia en los tableros con UF (Figura 33-B). Estas observaciones se explican porque la resina EPI no ingresó en la pared celular de las fibras y le confirió resistencia al tablero fraguando en la superficie de las fibras. Por otro lado, la resina UF si ingresó en las fibras (Qin *et al.*, 2017).

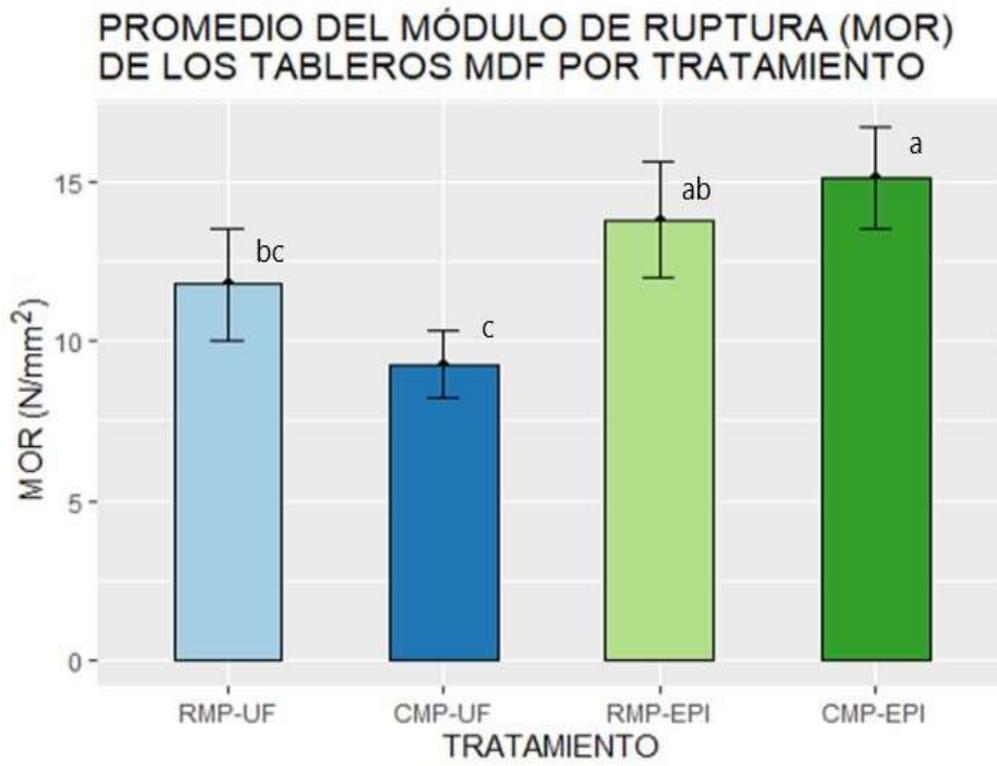


Figura 32: Módulo de ruptura (MOR) de los cuatro tipos de tableros MDF

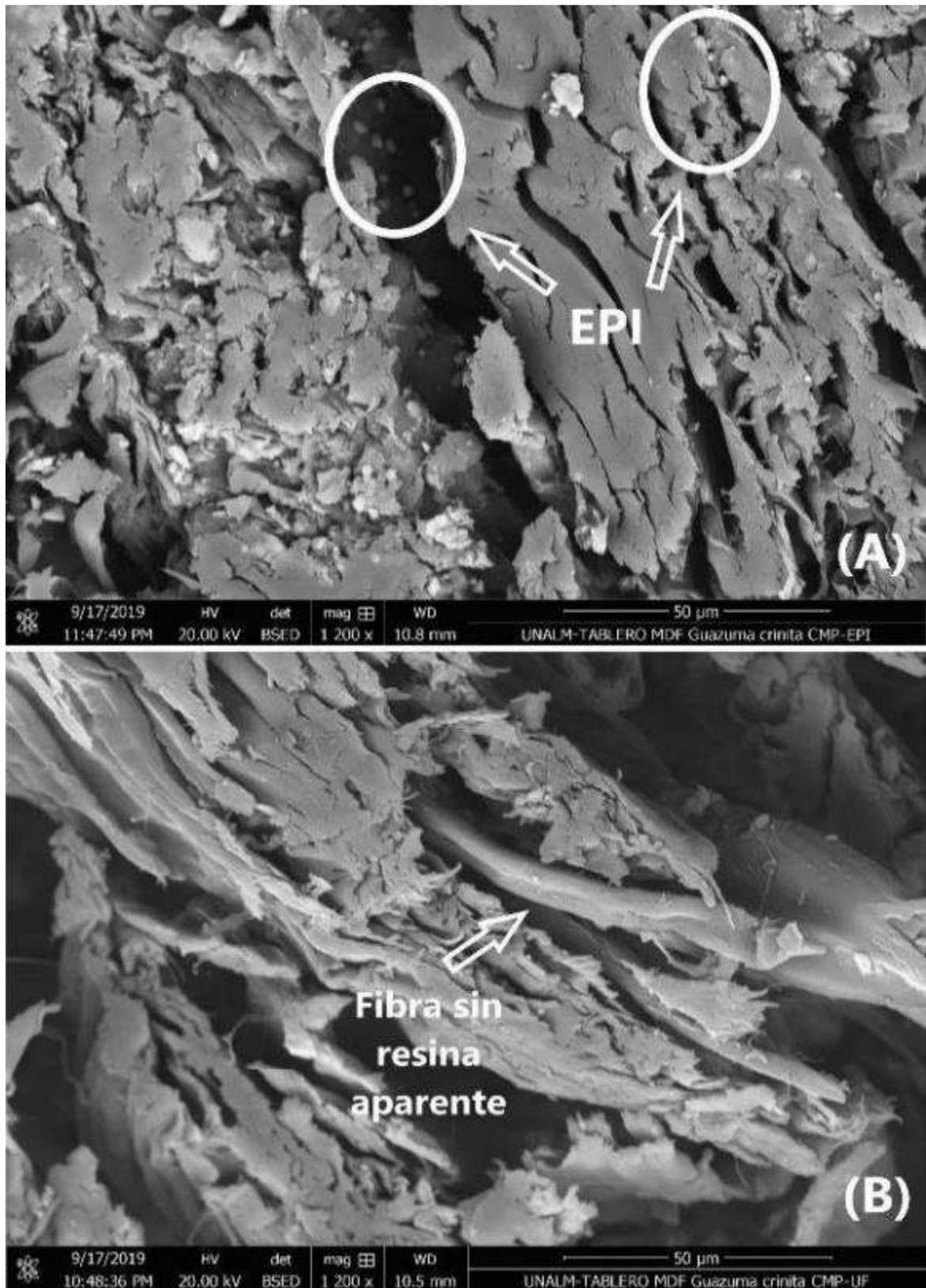


Figura 33: Superficie de las fibras en los tableros MDF: A - visualización de la resina EPI y B - no visualización de la resina UF

#### 4.5.5. Módulo de elasticidad (MOE)

Respecto al MOE, al igual que en el MOR, el tipo de resina ( $p < 0,001$ ) tuvo influencia muy altamente significativa y la interacción de los dos factores ( $p = 0,041$ ) influencia significativa. Los tableros CMP-EPI y RMP-EPI fueron superiores a los CMP-UF y RMP-UF (Figura 34). La mejor rigidez de los tableros se atribuye al mejor desempeño de la EPI sobre la UF. Lo que implica que la EPI formó mayor cantidad de enlaces sostenibles tanto con la RMP como con CMP.

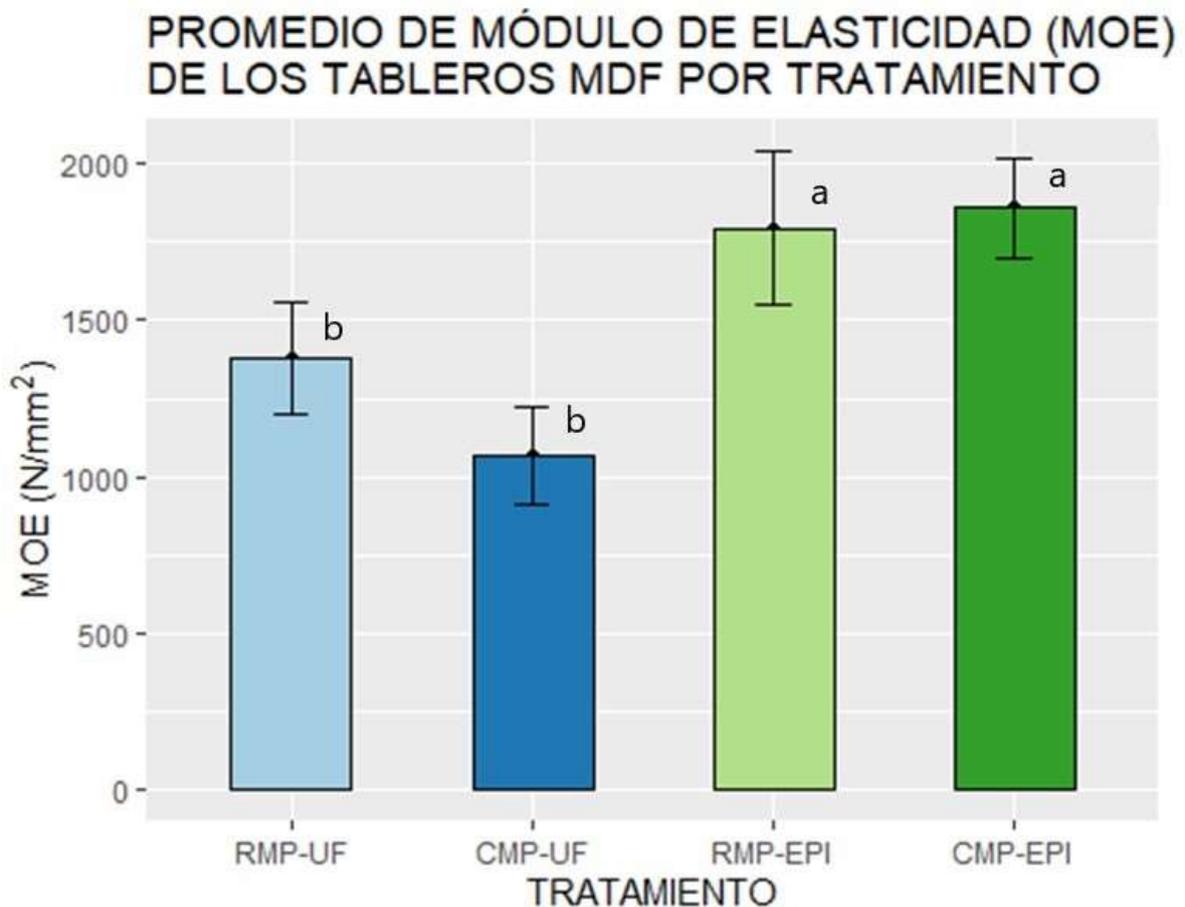


Figura 34: Módulo de elasticidad de los cuatro tipos de tableros MDF

#### 4.5.6. Tracción perpendicular a las caras del tablero (TP)

Respecto a la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero, el tipo de resina ( $p = 0,011$ ) y la interacción de los dos factores ( $p = 0,041$ ) tuvieron influencia significativa. El tratamiento CMP-EPI obtuvo los valores más elevados, mientras que los otros tres tratamientos presentaron resistencias sin diferencias significativas (Figura 35). La mejor resistencia de los tableros CMP-EPI se debe a su mayor cantidad de fibras enteras e individualizadas que permite mejorar los entrecruzamientos. A ello también aportó la disminución de la hemicelulosa y extractivos por el pretratamiento de las astillas que permitió la disponibilidad de mayores enlaces hidroxilo en las fibras para unirse con la resina EPI.

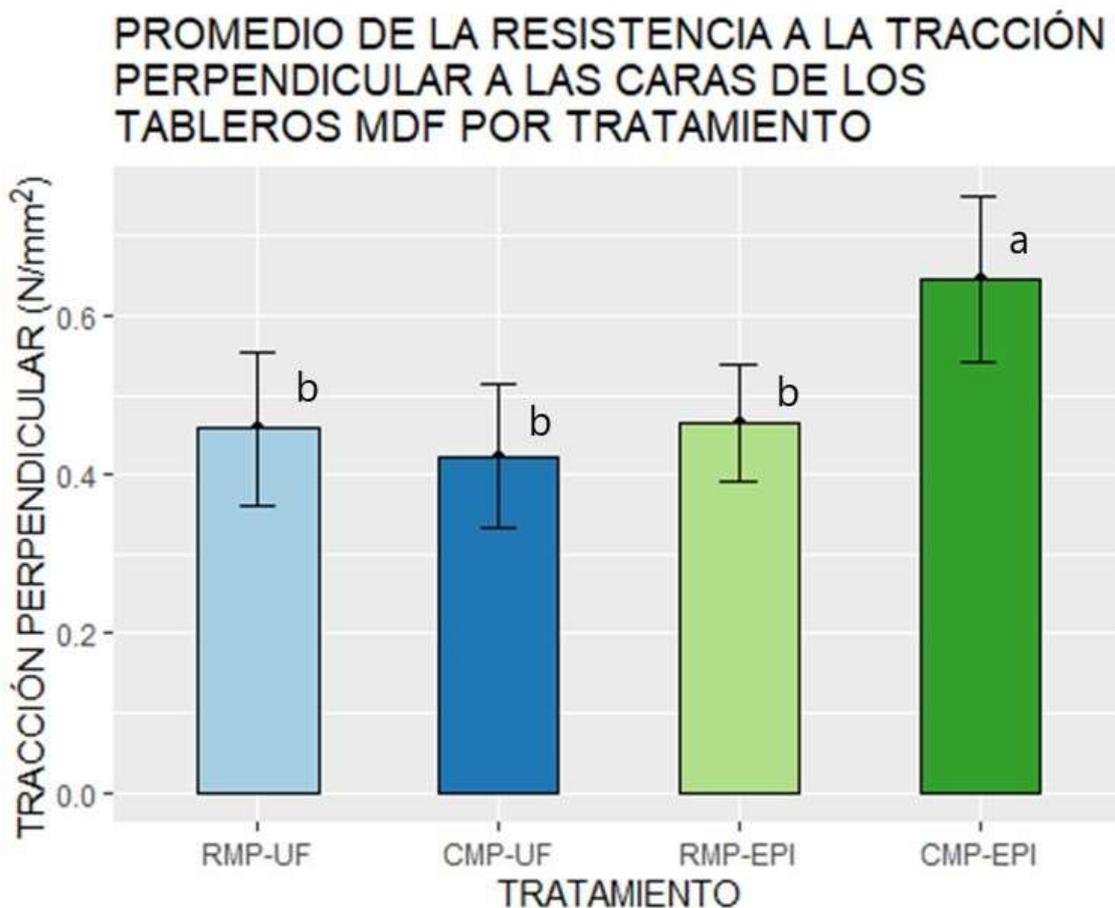


Figura 35: Tracción perpendicular de los cuatro tipos de tableros MDF

En la comparación de las propiedades físicas y mecánicas para MDF estándar expuestas en la norma EN 622-5 y los cuatro tipos de tableros, sólo superaron en los valores de la propiedad física de hinchamiento de espesor en 24 horas. Sin embargo, el tablero L-MDF de la misma norma presenta valores inferiores al estándar. Entonces el tablero con tratamiento RMP-EPI superó los valores de la mayoría de los requisitos con excepción del MOR.

De otro lado, la empresa MASISA comercializa un producto denominado EcoPlac cuyos valores son superados por el tablero CMP-EPI con excepción del MOE.

## V. CONCLUSIONES

- Los residuos de madera proveniente de una descortezadora con alto porcentaje (95%) de madera juvenil y bajo porcentaje (5%) de corteza de *Guazuma crinita* permiten elaborar tableros MDF.
- La emulsión polimérica de isocianato (EPI) en los tableros MDF obtuvo valores superiores en densidad, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y tracción perpendicular a las caras (TP), e inferiores en contenido de humedad (CH), hinchamiento del espesor a las 2 horas y 24 horas de inmersión en agua que los fabricados con la resina úrea formaldehído (UF).
- Tanto la pulpa mecánica (RMP) como la químico-mecánica (CMP) obtuvieron similares propiedades físicas y mecánicas en los tableros MDF.
- Los tableros MDF con los valores mayores en densidad, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y tracción perpendicular a las caras (TP), e menores en contenido de humedad (CH), hinchamiento del espesor a las 2 horas y 24 horas de inmersión en agua corresponden a los elaborados con pulpa mecánica y emulsión polimérica de isocianato (RMP-EPI), y pulpa químico-mecánica y emulsión polimérica de isocianato (CMP-EPI).
- El módulo de elasticidad (MOE) y la tracción perpendicular a las caras (TP) de los tableros con pulpa químico-mecánica y emulsión de polímero de isocianato (CMP-EPI) y de los tableros con pulpa mecánica y emulsión de polímero de isocianato (RMP-EPI), así como el hinchamiento del espesor a las 24 horas de este último, superaron los valores indicados en la norma EN 622-5 para el tablero de tipo L-MDF.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Realizar estudios que determinen la cantidad óptima de resina para cumplir con los estándares indicados en las normas.
- Realizar estudios que determinen la influencia de las fracciones de corteza en los tableros MDF cuando se aglomeran con EPI.
- Complementar con estudios de las propiedades mecánicas de los tableros MDF con EPI durante un periodo de intemperismo o inmersión en agua.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, M. & Kikata, Y. (1994). Atlas de maderas del Perú. Lima, Perú: Publifor.
- Afra, E.; Yousefi, H. & Lakani, S.A. (2014). Properties of chemi-mechanical pulp filled with nanofibrillated and microcrystalline cellulose. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 8: 1–6. doi: 10.1166/jbmb.2014.1462
- Aguilar, J.C. (2019). Propiedades mecánicas de madera de raleo de 6 años provenientes de plantaciones de *Guazuma crinita* en Puerto Inca-Huánuco (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4030/aguil.ar.ruiz-juan-carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Akgül, M., & Akça, M. (2020). The chemical and morphological properties of oleaster. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 22(1). Publicación anticipada en línea. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/3788>
- Akhtari, S.; Sowlati, T. & Day, K. (2014). Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33: 117–127. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.058
- Alpár, T., Fácán, T., Rác, I. & Kátoli, G. (2010). MDF/HDF production from plantation wood species. *Drvna indrustrija*, 61(3): 183-191. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/46401412\\_MDFHDF\\_production\\_from\\_plantation\\_wood\\_species](https://www.researchgate.net/publication/46401412_MDFHDF_production_from_plantation_wood_species)

Álvarez, E., Díaz, S. & Alessandrini, M. (2001). Utilización racional de los residuos forestales. Revista UNASYLVA, 52(206): 48-52. Recuperado de [http://www.fao.org/3/y1237s/y1237s10.htm#PO\\_0](http://www.fao.org/3/y1237s/y1237s10.htm#PO_0)

Álvarez, L. & Ríos, S. (2009). Evaluación económica de parcelas de regeneración natural y plantaciones de Bolaina blanca, *Guazuma crinita*, en el departamento de Ucayali. Serie: Avances económicos, (11): 1-51. Recuperado de [repositorio.iiap.org.pe/bitstream/IIAP/225/1/Alvarez\\_documentotecnico\\_2009\\_11.pdf](http://repositorio.iiap.org.pe/bitstream/IIAP/225/1/Alvarez_documentotecnico_2009_11.pdf)

Aróstegui, A. & Sato, A. (1970). Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la madera de 16 especies forestales del Perú. Revista Forestal del Perú, 4 (1-2): 13-24. Recuperado de <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1082/1032>

ARAUCO. (2018). Trupan: el especialista en MDF. Recuperado de <https://www.arauco.cl/argentina/marcas/trupan/>

Ayala-Mendivil, N. & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. Madera y Bosques, 24(Núm. esp.): e2401877. doi: 10.21829/myb.2018.2401877

Ayrilmis, N. (2007). Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. Journal of Materials Science, 42 (20): 8551-8557. doi: 10.1007/s10853-007-1782-8

Belini, U.L. (2007). Caracterização e alterações na estrutura anatômica de madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF. (Tesis de maestría, Universidade de São Paulo).

Recuperada de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05062007-133218/publico/UgoBelini.pdf>

- Bellido, M.; Egoavil, G. & Gonzales, E. (2003). Tableros de fibras de la madera de “tornillo” (*Cedrelinga cateniformis* Ducke). *Bosque*, 24(3): 39-44. Doi: 10.4067/S0717-92002003000300004
- Biermann, C.J. (1996). Handbook of pulping and papermaking. doi: 10.1016/B978-0-12-097362-0.X5000-6
- Ceccarelli, R. & Gonzales, H. (2016). Obtención de tableros de fibras (HDF) a partir de papel periódico. *Revista Forestal del Perú*, 31(1): 11-22. doi: 10.21704/rfp.v31i1.1022
- Chavesta, M.; Montenegro, R.; Tomazello-Filho, M.; Carneiro, M. & Nisgoski, S. (2019). Propiedades físicas en *Guazuma crinita* por medios convencionales y espectroscopia infrarroja cercana. *Madera. Ciencia y Tecnología*, 21(4): 521-530. doi: 10.4067/S0718-221X2019005000408
- Chavesta, M.; Tomazello-Filho, M.; Carneiro, M. & Nisgoski, S. (2020). Axial and radial evaluation of the basic density and fiber dimensions of *Guazuma crinita* Martius wood. *Floresta*, 50(2): 1143-1150. doi: 10.5380/rf.v50 i2.58356
- Cobas, A.; Area, M. & Monteoliva, S. (2013). Transición de madera juvenil a madera madura en un clon de *Populus deltoides* implantados en Buenos Aires Argentina. *Madera: Ciencia y Tecnología* 15(2): 223-234. doi: 10.4067/S0718-221X2013005000018
- Cornelius, J.P.; Pinedo-Ramírez, R.; Sotelo, C.; Ugarte-Guerra, L.J. & Weber, J.C. (2018). Efficiency of early selection in *Calycophyllum spruceanum* and *Guazuma crinita*, two fast-growing timber species of the Peruvian Amazon. *Canadian Journal of Forest Research*, 48: 1-7. doi: 10.1139/cjfr-2017-0407

- Cruz, N.; Bustos, C.; Aguayo, M. G.; Cloutier, A. & Castillo, R. (2018). Impact of the chemical composition of *Pinus radiata* wood on its physical and mechanical properties following thermo-hygro-mechanical densification. *BioResources* 13(2), 2268-2282. doi: 10.15376/biores.13.2.2268-2282
- De la Macorra, C. (2004). Tratamiento de impregnación con álcali y peróxido de hidrógeno para reducir el consumo energético en la producción de pastas mecánicas: modificaciones estructurales de la molécula de lignina (Tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid). Recuperada de <https://biblioteca.ucm.es/tesis/qui/ucm-t27373.pdf>
- De Souza, D. T.; Carvalho, L. A. & Valadares, L. F. (2015). Documentos 18: Celulose: pontos de vista. Recuperada de: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1034962/celulose-pontos-de-vista>
- EN 310. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- EN 317. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- EN 319. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- EN 322. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del contenido de humedad. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- EN 323. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).

- EN 326-1. (1995). Tableros derivados de la madera. Muestreo, despiece e inspección. Parte 1: Muestreo y despiece de probetas y expresión de resultados de ensayo. Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- EN 622-5. (2009). Tableros de fibras. Especificaciones. Parte 5: Requisitos de los tableros de fibras fabricados por proceso seco (MDF). Madrid, España: Asociación Española de Normalización (UNE).
- English, B., Youngquist, J.A. & Krzysik, A.M. (1994). Lignocellulosic Composites. En Gilbert, R.D. (Ed.). Cellulosic polymers, blends and composites (p. 115-130). Recuperado de <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1994/engli94a.pdf?referer=www.clickfind.com.au>
- Fagundes, H.A. (2003). Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul (Tesis de maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Recuperada de <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4567/000412901.pdf>
- Freire, A.; Figueirêdo, M.; Rosa, M. & Júnios, C. (2015). Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados – Uma revisão de literature. Revista Espacios, 36(10): 3. doi: [https://www.researchgate.net/publication/277889890\\_Impactos\\_ambientais\\_de\\_painéis\\_de\\_madeira\\_e\\_derivados\\_-\\_Uma\\_revisao\\_de\\_literatura](https://www.researchgate.net/publication/277889890_Impactos_ambientais_de_painéis_de_madeira_e_derivados_-_Uma_revisao_de_literatura)
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2018). Datos y cifras globales de productos forestales 2016. Recuperado de [www.fao.org/3/I7034ES/i7034es.pdf](http://www.fao.org/3/I7034ES/i7034es.pdf)
- Grigsby, W.; Thumm, A. & Carpenter, J. (2012). Fundamentals of MDF Panel Dimensional Stability: Analysis of MDF High-Density Layers. Journal of Wood Chemistry and Technology, 32: 149-162. doi: 10.1080/02773813.2011.624667

- Grøstad, K. & Pedersen, A. (2010). Emulsion Polymer Isocyanates as Wood Adhesive: A Review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(8-10): 1357-1381. Doi: 10.1163/016942410X500981
- Guariguata, M.R.; Arce, J.; Ammour, T. & Capella, J.L. (2017). Las plantaciones forestales en Perú: reflexiones, estatus actual y perspectiva a futuro. Recuperado de [http://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/OccPapers/OP-169.pdf](http://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-169.pdf)
- Guevara, L.; Reyes, P. & Bocanegra, L. (1993). Evaluación de residuos de aserrío. *Folia Amazónica*, 5(1-2): 191-201. doi: 10.24841/fa.v5i1-2.241
- Guo, J.; Hu, H.; Zhang, K.; He, Y. & Guo, X. (2018). Revealing the mechanical properties of emulsion polymer isocyanate film in humid environments. *Polymers*, 10(6): 652. doi: 10.3390/polym10060652
- Gupta, G.K. (2009). Development of Bark-based Environmental-friendly Composite Panels (Tesis de Maestría, University of Toronto). Recuperada de [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/18310/3/Gupta\\_Gireesh\\_K\\_2009\\_11\\_MScF\\_thesis.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/18310/3/Gupta_Gireesh_K_2009_11_MScF_thesis.pdf)
- Hall, F.K. (1974). Wood Pulp. *Scientific American*, 230(4): 52–62. doi: 10.1038/scientificamerican0474-52
- Halvarsson, S. (2010). Manufacture of Straw MDF and fibreboards (Tesis de doctorado, Mid Sweden University). Recuperado de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:324791/FULLTEXT02>
- Halvarsson, S.; Edlund, H. & Norgren, M. (2008). Properties of medium-density fibreboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin. *Industrial crops and products*, 28: 37-46. doi: 10.1016/j.indcrop.2008.01.005

Hillman, D. (1998). Speciality Market Pulps and Their Function in Specialty Papers. Specialty Technical Papers 98. San Francisco, EE.UU.: Intertech.

Huang, L.; Wang, H.; Guo, X.; Jiang, Z.; Xing, F. & Ekevad, M. (2018). Study on continuous cold-pressing technology of engineered wood flooring with EPI adhesive. Wood Research, 63(2): 335–342. Recuperada de <http://www.woodresearch.sk/wr/201802/14.pdf>

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2001). Perú forestal en números año 2000. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2000.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2000.pdf)

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2002). Perú forestal en números año 2001. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2001.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2001.pdf)

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2003). Perú forestal en números año 2002. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2002.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2002.pdf)

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2004). Perú forestal en números año 2003. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2003.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2003.pdf)

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2005). Perú forestal en números año 2004. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/peru.forestal.2013-.pdf>

Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2006). Perú forestal en números año 2005. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/anuario\\_peru\\_forestal\\_2005.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/anuario_peru_forestal_2005.pdf)

- Instituto Nacional de Recursos Forestales (INRENA). (2008). Perú forestal en números año 2007. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/anuario\\_peru\\_forestal\\_2007.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/anuario_peru_forestal_2007.pdf)
- Jiang, Z. & Zhang, S. (2003). China's plantation forests for sustainable wood supply and development. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/XII/0955-B4.htm>
- Kerekes, R. & Schell, C. (1995). Effects of fiber length and coarseness on pulp flocculation. *Tappi Journal*, 28(2): 133-139. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/292541618\\_Effects\\_of\\_fiber\\_length\\_and\\_coarseness\\_on\\_pulp\\_flocculation](https://www.researchgate.net/publication/292541618_Effects_of_fiber_length_and_coarseness_on_pulp_flocculation)
- Khakifirooz, A.; Ravanbakhsh, F.; Samariha, A. & Kiaei, M. (2013). Investigating the Possibility of Chemi-mechanical Pulping of Bagasse. *BioResources*, 8(1): 21-30. doi: 10.15376/biores.8.1.21-30
- Kim, M.H. & Song, H.B. (2014). Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. *Journal of Cleaner Production* 69, 199-207. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.039
- Lima, E.G. & Silva, D.A. (2005). Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas-PR. *Revista Floresta* 35(1): 105-116. Recuperado de <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2434/2036>
- López, Y.M.; Paes, J.B. & Martínez R.E. (2018). Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados. *Madera y Bosques*, 24(2): e2421495. doi: 10.21829/myb.2018.2421495
- Maloney, T.M. (1977). Modern particle & dry process fiberboard manufacturing. Recuperado de [https://www3.epa.gov/ttn/chief/old/ap42/ch10/s062/references/ref\\_01c10s062\\_sept1998.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/chief/old/ap42/ch10/s062/references/ref_01c10s062_sept1998.pdf)

- Mantanis, G.L.; Athanassiadou, E.; Barbu, M. & Wijnendaele, K. (2017). Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. *Wood material science & engineering*, 13(2): 1-13. doi: 10.1080/17480272.2017.1396622
- MASISA. (2016). Manual de recomendaciones prácticas. Recuperado de <http://intermad.com.mx/data/documents/manualmasisa19-03-12-pdf-130701135311-phpapp02.pdf>
- Miguel, C. (2013). Elaboración de tableros de partículas con bolaina (*Guazuma crinita* Martius) perteneciente a una plantación de cuatro años. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Miguel, M.; Iwakiri, S.; Trianoski, R.; Gonzales, H. & Miguel, C. (2019). Producción de tableros de partículas con Bolaina (*Guazuma crinita* Mart.) procedente de una plantación de cuatro años. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 10(2), 197-204. doi: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n3p197-204
- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2009). Perú forestal en números año 2008. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/peru-forestal-numeros-2009>
- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2010). Perú forestal en números año 2009. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/peru-forestal-numeros-2009>
- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2011). Perú forestal en números año 2010. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/peru-forestal-numeros-2010>
- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2012). Perú forestal en números año 2011. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2011.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2011.pdf)

- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2013). Perú forestal en números año 2012. Recuperado de [https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO\\_PERU\\_FORESTAL\\_2012--.pdf](https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/ANUARIO_PERU_FORESTAL_2012--.pdf)
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2014). Perú forestal en números año 2013. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/peru-forestal-numeros-ano-2013>
- Miranda, E. (2018). Efecto de tres tipos de abono orgánico líquido (biol) en la etapa de desarrollo en vivero de Bolaina blanca (*Guazuma crinita* C.Martius) en Pucallpa Perú. Revista Científica Institucional Tzhoeco, 10(3): 371-382. doi: 10.26495/rtzh1810.327529
- Muizniece, I. & Blumberga, D. (2015). Assessment of the amount of coniferous wood waste in the Baltic States. Energy Procedia, 72: 57-63. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.009
- Myers, G.C.; Arola, R.A.; Horn, R.A. & Wegner, T.H. (1996). Chemical and mechanical pulping of aspen chunkwood, mature wood, and juvenile wood. TAPPI Journal, 79(12): 161-168. Recuperada de <https://pdfs.semanticscholar.org/8505/001b1007db084a19057faec97efbdb2b0784.pdf>
- Nanvonamuquitxo, S.J.A.; Rojas, F. G. & Hofiça, N.S.A. (2017). Desperdício de madeira na concessão florestal da indústria Sotomane na província da Zambézia, Moçambique. Nativa, 5(3): 208-211. doi: 10.5935/2318-7670.v05n03a09
- Nordström, B. & Hermansson, L. (2018). Effect of softwood kraft fiber coarseness on formation and strength efficiency in twin-wire roll forming. Nordic Pulp & Paper Research Journal; 33(2): 237–245. doi: 10.1515/npprj-2018-3029

- Nuryawan, A. & Alamsyah, E.M. (2018). A Review of Isocyanate Wood Adhesive: A Case Study in Indonesia. En Özer, H. (Ed.), *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology* (p. 73-90). doi: 10.5772/intechopen.73115
- Mertens, O.; Gurr, J. & Krause, A. (2017). The utilization of thermomechanical pulp fibers in WPC: a review. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(31): 45161. doi: 10.1002/app.45161
- Ortíz, S. & Bueno, J. (1987). Pulpa mecanoquímica a la soda en frío y a la soda sulfito a partir de *Eucalyptus globulus* Labill. *Revista Forestal del Perú*, 14(1): 1-13. Recuperada de [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos\\_RFP/Vol14\\_no1\\_87\\_\(19\)/vol14\\_no1\\_art3.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol14_no1_87_(19)/vol14_no1_art3.pdf)
- Pagel, H.F. & Luckman E.R. (1980). EPI – a new structural adhesive. En Johns, W.E. & Gillespie, R.H. (Presidencia), *Proceedings of 1980 Symposium “Wood Adhesives - research, application and needs”* held at Madison, Wisconsin on 23-25 September 1980. Simposio llevado a cabo en el congreso de U.S. Forest Products Laboratory y Washington State University, Wisconsin, EE.UU.
- Paredes, O.; Soudre, M.; Chavez, J. & Guerra, W. (2010). Propagación vegetativa de Bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) mediante injerto, bajo condiciones ambientales controladas. *Folia Amazónica*, 19(1-2): 69-77. doi: 10.24841/fa.v19i1-2.346
- Pecho, R.; Ananias, R.; Ballerini, A. & Cloutier, A. (2005). Influencia de la madera juvenil de pino radiata sobre las propiedades físicas y mecánicas de tableros OSB. *Bosque*, 26(1):123-132. doi: 10.4067/S0717-92002005000100012
- Perng, Y.S.; Wang, E.; Cheng, Y.L. & Chen, Y.C. (2009). Effects of fiber morphological characteristics and refining on handsheet properties. *Taiwan Journal of Forest*

Science, 24(2): 127-39. [https://www.tfri.gov.tw/main/download.aspx?dlfn=24-2\\_05.pdf](https://www.tfri.gov.tw/main/download.aspx?dlfn=24-2_05.pdf)

Piccone, M. (2019). Caracterización anatómica de la madera de 10 clones de *Guazuma crinita* Mart. de 3 años de Huánuco-Perú (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3888/piccone-sandoval-mayra-fiorella.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pizzi, A. (1983). Wood adhesives: Chemistry and Technology. Nueva York, EE.UU.: Marcel Dekker.

Potucek, F.; Ríhová, M. & Gurung, B. (2016). Chemi-mechanical pulp from rapeseed Straw. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50 (3-4): 489-496. Recuperada de [http://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT3-4\(2016\)/p.489-496.pdf](http://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT3-4(2016)/p.489-496.pdf)

Putzel, L.; Cronkleton, P.; Larson, A.; Pinedo-Vasquez, M.; Salazar, O.; Sears, R. (2013). Peruvian smallholder production and marketing of Bolaina (*Guazuma crinita*), a fastgrowing amazonian timber species: call for a pro-livelihoods policy environment. *CIFOR briefs*, (23): 1-6. doi: 10.17528/cifor/004257

Qiao, L.; Eastal, A.; Bolt, C.; Coveny, P. & Franich, R. (2000). Thermomechanical analysis and performance tests of some EPI Wood adhesives. *Pigment & Resin Technology*, 29(4): 229-237. doi: 10.1108/03699420010339371

Qin, L.; Lin, L.; Fu, F. & Fan, M. (2017). Microstructure and quantitative micromechanical analysis of wood cell-emulsion polymer isocyanate and urea-formaldehyde interphases. *Microscopy and Microanalysis*, 23: 687-695. doi: 10.1017/S1431927617000216

Quijano-Solis, C.; Yan, N. & Zhang, S.Y. (2009). Effect of mixing conditions and initial fiber morphology on fiber dimensions after processing. *Composites Part A: Applied*

Science and Manufacturing 40(4): 351-358. doi:  
10.1016/j.compositesa.2008.12.014

Ramírez-Coretti, A. (1996). Características de cartones empleados en la industria de la construcción. *Revista Tecnología En Marcha*, 12(4): 38-45. Recuperado de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/2788](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2788)

Ramos-Huapaya, A.E. & Domínguez, G. (2016). Selección de árboles de Bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) como candidatos a árboles “plus” para ensayos de rejuvenecimiento y brotación. *Ecología Aplicada*, 15(2): 115-123. doi: 10.21704/rea.v15i2.751

Ramos-Huapaya, A.E. & Domínguez, G. (2017). Desarrollo de estacas de Bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) en cámaras de sub-irrigación. *Folia Amazónica*, 26(1): 17-28. doi: 10.24841/fa.v26i1.413

Rättö, M.; Kantelinen, A.; Bailey, M. & Viikari, L. (1993). Potential of enzymes for wood debarking. *Tappi Journal*, 76(2): 125-128. Recuperada de: [https://www.researchgate.net/publication/236409846\\_Potential\\_of\\_enzymes\\_for\\_wood\\_debarking](https://www.researchgate.net/publication/236409846_Potential_of_enzymes_for_wood_debarking)

Reynel, C.; Pennington, R.T.; Pennington, T.D.; Flores, C. & Daza, A. (2003). Árboles útiles de la amazonía peruana: un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies. Lima, Perú: ICRAF.

Reynel, C.; Pennington, T.D. & Pennington, R.T. (2016). Árboles del Perú. Lima, Perú: Imprenta Bellido

Robles, J. (2017). Propiedades mecánicas de la madera de *Guazuma crinita* proveniente de un raleo comercial de plantaciones de 5 años en Puerto Inca-Perú (Tesis de pregrado inédita). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.

- Saldívar, V. (2005). Estudio de tres variables en la obtención de pulpa celulósica, con proceso de alto rendimiento, a partir del tallo de arroz (*Oryza sativa* L.) (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/410/K50-S2-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sandermann, H.W. (1968). Las industrias químicas de la madera. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=u5MOAQAAIAAJ&pg=PA20-IA14&dq=pulpa+mecanica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwip4veR5urcAhUBjpAKHSqWCngQ6AEILjAC#v=onepage&q=pulpa%20mecanica&f=false>
- Sears, R.R.; Cronkleton, P.; Villanueva, F.P.; Miranda, M. & Pérez-Ojeda, M. (2018). Farm-forestry in the Peruvian Amazon and the feasibility of its regulation through forest policy reform. *Forest Policy and Economics*, 87: 49-58. doi: 10.1016/j.forpol.2017.11.004
- Selvatti, T; Borges, L.; Soares, H.; De Souza, Á. & Junior, L. (2019). Global production concentration of médium density fiberboard (MDF) (1995-2016). *Revista Árvore*, 42(5): e420506. doi: 10.1590/1806-90882018000500006
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2016). Perú forestal en números año 2015. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Anuario%20Peru%20Forestal%20en%20Numeros%202015.pdf>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2018). Perú forestal en números año 2016. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2018/10/Anuario-2016.pdf>

- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2019). Perú forestal en números año 2017. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/Anuario-Forestal-y-de-Fauna-Silvestre-2017.pdf>
- Solár, R.; Dibdiaková, J.; Mamoň, M.; Kačík, F.; Rázgová, Z.; Vacek, V.; Sivák, J. & Gaff, M. (2011). Alkaline and Alkaline/oxidation pre-treatments of spruce Wood (*Picea abies*) – Impact on the quality of kraft pulp. *Bioresource Technology*, 102: 1921-1927. doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.023
- SONAE ARAUCO. (2017). Productos para construcción y mobiliario. Recuperado de [https://www.sonaearauco.com/es/descargas\\_494.html](https://www.sonaearauco.com/es/descargas_494.html)
- Soto, D. (Ed.). (2017). La industria de tableros y chapas 2017. Recuperado de <http://biblioteca.infor.cl/DataFiles/32094.pdf>
- Soudre, M. (2009). Rendimiento comercial de la madera de Bolaina blanca (*Guazuma crinita*) procedente de tres sistemas de producción forestal en la región Ucayali. Recuperada de [http://repositorio.iiap.org.pe/bitstream/IIAP/213/1/Soudre\\_documentotecnico\\_2009.pdf](http://repositorio.iiap.org.pe/bitstream/IIAP/213/1/Soudre_documentotecnico_2009.pdf)
- Stellman, J.M. (2001). Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/72.pdf>
- Sueros, C. (2017). Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) de tres edades (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2776?show=full>
- TAPPI T 203 cm-99. (1999). Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.

- TAPPI T 204 cm-97. (1997). Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 207 cm-99. (1999). Water solubility of wood and pulp. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 211 om-93. (1993). Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustión at 525°C. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 212 om-02. (2002). One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 222 om-98. (1998). Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 233 cm-95. (1995). Fiber length of pulp by classification. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- TAPPI T 252 om-98. (1998). pH and electrical conductivity of hot wáter extracts of pulp, paper, and paperboard. Atlanta, EE.UU.: TAPPI Press.
- Thoemen, H.; Irle, M. & Sernek, M. (2010). Wood-based panel: an introduction for specialist. Recuperado de [www.cost.eu/module/download/53630](http://www.cost.eu/module/download/53630)
- Tinti, V.P.; Gonçalves, F.G.; Paes, J.B.; Arantes, M.D.C.; Vieira, M.C. & López, Y.M. (2018). Propiedades físicas y densitometría de rayos X en tableros de residuos de madera. *Ciência da Madeira*, 9(2): 71-81. doi: 10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p71-81
- Tuisima, L.L.; Odicio, J.E.; Weber, J.C.; Lluncor, D. & Lojka, B. (2017). Variation physical properties within stems of *Guazuma crinita*, a timber tree species in the Peruvian Amazon. *Madera y Bosques*, 23(1): 53-61. doi: 10.21829/myb.2017.2311534

- Urbina, L. (2016). Propiedades mecánicas en madera de raleo procedente de plantaciones de cuatro años de *Guazuma crinita* Martius (Bolina Blanca)-Huánuco (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2703/K50-U7-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vale, A.T. & Gentil, L.V. (2008). Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. En Oliveira, J.T.S.; Fiedler, N.C.; Nogueira, M. (Coord.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III (p. 125-158). Rio Branco, Brasil: Suprema
- Vignote, S. & Martínez, I. (2006). Tecnología de la madera. Recuperado de <https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>
- Weber, J.C. & Sotelo Montes, C. (2008). Geographic variation in tree growth and Wood density of *Guazuma crinita* Mart. in the Peruvian Amazon. *New Forests*, 36: 29-52. doi: 10.1007/s11056-007-9080-5
- Wightman, K.E.; Cornelius, J.P. y Ugarte, L.J. (2006). ¡Plantemos madera!: Manual sobre el establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones maderables para productores de la Amazonía peruana. Recuperado de [https://www.academia.edu/1977169/Plantemos\\_Madera\\_Manual\\_Sobre\\_el\\_Establecimiento\\_Manejo\\_Aprovechamiento\\_de\\_plantaciones\\_maderables\\_para\\_productores\\_de\\_la\\_Amazonia\\_peruana?auto=download](https://www.academia.edu/1977169/Plantemos_Madera_Manual_Sobre_el_Establecimiento_Manejo_Aprovechamiento_de_plantaciones_maderables_para_productores_de_la_Amazonia_peruana?auto=download)
- Ye, X.P.; Julson, J.; Kuo, M.; Womac, A. & Myres, D. (2007). Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. *Bioresource Technology*, 98 (5): 1077-1084. doi: 10.1016/j.biortech.2006.04.022.
- Zanuttini, M. & Marzocchi, V. (2003). Alkaline chemi-mechanical pulp from poplar. Relationship between chemical state, swelling and papermaking properties. *Holzforschung*, 57, 489–495. doi: 10.1515/HF.2003.073

Zeng, Q.; Lu, Q.; Zhou, Y.; Chen, N.; Rao, J. & Fan, F. (2018). Circular development of recycled natural fibers from medium density fiberboard wastes. *Journal of Cleaner Production*, 202: 456-464. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.166

Zhang, H.; Hou, Q.; Liu, W.; Yue, Z.; Jiang, X. & Ma, X. (2018). Improved diffusivity of NaOH solution in autohydrolyzed poplar sapwood chips for chemi-mechanical pulp production. *Bioresource Technology*, 259: 61-66. doi: 10.1016/j.biortech.2018.03.020

Zobel, B. & Jett, J. (1995). *Genetics of wood production*. Nueva York, EE.UU.: Springer-Verlag

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1. ENSAYO DE DENSIDAD BÁSICA Y CONTENIDO DE HUMEDAD A LAS ASTILLAS DE MADERA SECADO EN HORNO DE LAS ASTILLAS

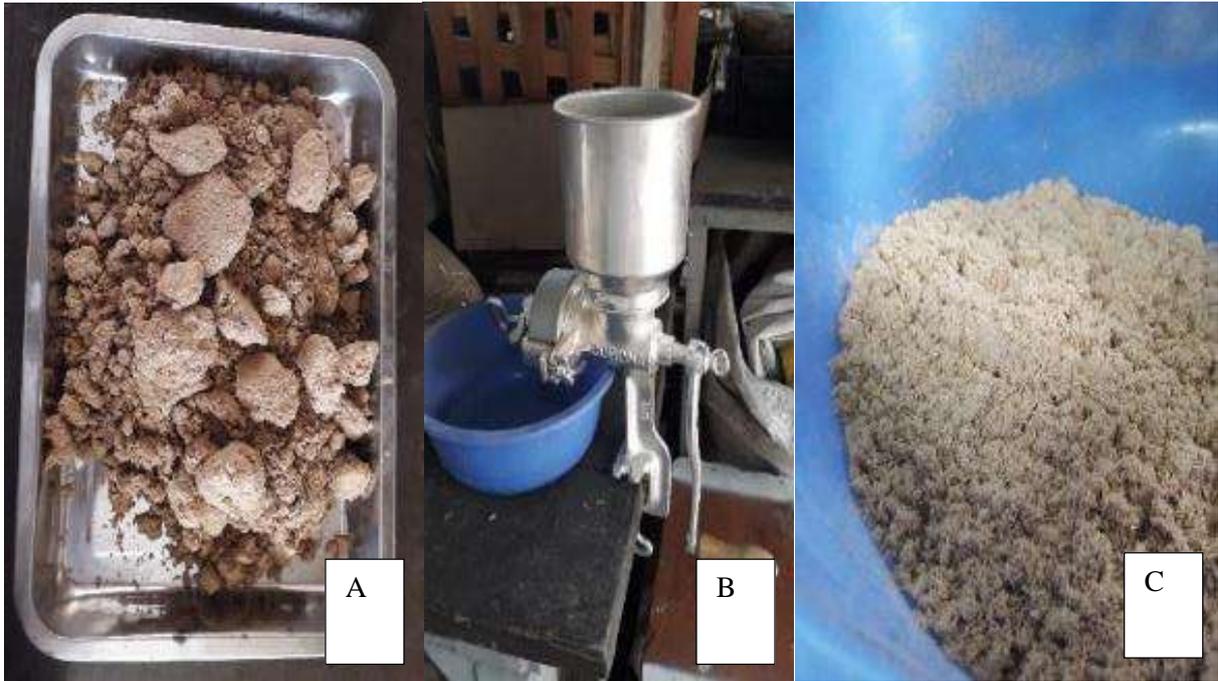


DETERMINACIÓN DE VOLUMEN DE ASTILLAS: A - BOLSAS DE NYLON CON ASTILLAS, B - RECIPIENTE CON AGUA SOBRE UNA BALANZA ELECTRÓNICA, Y C - SUMERGIDO DE ASTILLAS



## ANEXO 2. DESAGREGACIÓN DE LA PULPA

DESAGREGACIÓN DE LA PULPA: A - TERRONES DE PULPA, B - MOLINO MANUAL Y C - PULPA DESAGREGADA.



### ANEXO 3. ENSAYO DE DRENABILIDAD DE LAS PULPAS

EQUIPO *SCHOPPER-RIEGLER*



**ANEXO 4. ENSAYO DE CLASIFICACIÓN FIBRAS DE *BAUER MCNETT* DE LAS PULPAS**

CLASIFICACIÓN DE FIBRAS DE LAS PULPAS MECÁNICA (RMP) Y QUÍMICO-MECÁNICA (CMP)



**ANEXO 5. MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DE LAS FIBRAS DE LA PULPA MECÁNICA (RMP) Y QUÍMICO- MECÁNICA (CMP) POR FRACCIÓN**

Pulpa	Fracción	Longitud	Ancho	Densidad	Fibras	Relación
		de fibra (mm)	de fibra ( $\mu$ m)	Lineal (mg/m)	Cortadas (%)	Cantidad/Peso (10 <sup>6</sup> /g)
RMP	+30	0,613	38,0	2,236	42,77	0,798
	-30/+50	0,578	35,1	3,130	35,48	0,627
	-50/+100	0,730	44,9	1,242	47,35	1,202
	-100/+200	0,461	40,0	0,562	52,85	4,129
	Promedio General	<b>0,608</b>	<b>38,8</b>	<b>2,141</b>	<b>42,21</b>	<b>1,261</b>
CMP	+30	0,965	32,5	1,237	33,09	1,101
	-30/+50	0,973	34,6	0,634	25,09	2,073
	-50/+100	0,836	31,6	0,346	23,12	4,090
	-100/+200	0,577	28,7	0,240	31,77	8,359
	Promedio General	<b>0,912</b>	<b>32,7</b>	<b>0,814</b>	<b>28,85</b>	<b>2,542</b>

## ANEXO 6. ENSAYOS QUÍMICOS DE ASTILLAS Y PULPAS

PH DE ASTILLAS Y PULPAS



HOLOCELULOSA



ALFA-CELULOSA



LIGNINA



EXTRACCIÓN CON ETANOL



SOLUBILIDAD EN AGUA CALIENTE



## SOLUBILIDAD EN AGUA FRIA



## CENIZAS



## ANEXO 7. FICHAS TÉCNICAS DE RESINAS Y CATALIZADORES

### RESINA EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO Y SU CATALIZADOR

AkzoNobel Wood Coatings  
Marketing Adhesive

#### Información de Producto



#### EPI 1911 con HARDENER 1999

El sistema EPI 1911 con Hardener 1999 es usado para pegar madera a madera. La línea de cola tiene una alta resistencia al calor y a los solventes así como un excelente resistencia al desgarre por cizalla.

#### Especificaciones de los Productos

	1911		1999	
<b>Producto</b>	EPI		Hardener de Isocianato	
<b>Forma de entrega</b>	Líquido		Líquido	
<b>Color</b>	Blanco		Café claro	
<b>Viscosidad</b> (al momento de la entrega)	8,000 – 15,000 mPas (Brookfield LVT, sp4, 6rpm, 25°C)		150 – 450 mPas (Brookfield LVT, sp2, 30rpm, 25°C)	
<b>pH</b> (al momento de la entrega)	7.0 – 8.5		NA	
<b>Tiempo de vida</b>	<b>30°C</b>	<b>20°C</b>	<b>30°C</b>	<b>20°C</b>
	6 meses	9 meses	9 meses en empaque bien cerrado	1 año en empaque bien cerrado
<b>Condiciones de almacenamiento</b>	Temperatura recomendada de almacenamiento: 15°C a 20°C Solamente cortos tiempos de exposición a temperaturas por debajo de 5°C / 32°F o por encima de 30°C / 86°F El producto puede formar una capa en la superficie, si el contenedor no es cerrado adecuadamente Si el producto ha sido congelado no puede ser descongelado y usado porque hay cambios irreversibles en sus propiedades. La emulsión puede presentar separación luego de 1 o 2 meses de almacenamiento. Esta separación no afecta la calidad del pegue siempre y cuando el producto sea agitado antes de su uso. <b>La emulsión debe ser muy bien agitada antes de su uso</b>			
<b>Información sobre Formaldehído</b>	El sistema cumple con los requisitos F☆☆☆☆.			
<b>Densidad</b>	Aprox 1300 kg/m <sup>3</sup>		Aprox. 1200 kg/m <sup>3</sup>	
<b>Propiedades de la línea de cola</b>	NA			
<b>Aprobaciones</b>	Este sistema cumple con norma JAIA 008280 F☆☆☆☆.			

Versión: 2010-04-30  
 Responsable: Casco Adhesives Axis  
 Razón del cambio: Cambio nombre unidad de negocios

**Casco Adhesives**  
 Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00  
 Medellín, Colombia +57 4 351 8985  
 Quito, Ecuador +593 2 396 0000  
 Lima, Perú +511 250 9332

# RESINA ÚREA FORMALDEHIDO

Akzo Nobel Peru SAC  
Wood Coatings

## Información de Producto AkzoNobel

### Polímero 230

#### Generalidades

El polímero 230 es una resina líquida viscosa producida por condensación de la urea con Formaldehído, de aspecto blanco y opaco.

El polímero 230 posee un estado intermedio de polimerización de bajo contenido de formaldehído libre.

El Polímero 230, se cura o polimeriza por completo, por la acción de un catalizador y/o efecto del calor, lográndose un polímero rígido, cristalino y termoestable.

El polímero 230 se caracteriza por su rápido curado, alta resistencia química y mecánica, gran dureza y alto poder de adhesión.

El polímero 230 es usado en la

aglomeración de fibras de diferente naturaleza, en especial las de carácter lignocelulósico.

El polímero 230 es utilizado para la fabricación de triplex o laminados de madera de diversos espesores, enchapado de tableros aglomerados con chapilla de madera o foils de papel. En todas las aplicaciones anteriores es necesario el uso de un catalizador ácido y presión (bien sea en frío o caliente) para lograr el pegue completo de las piezas.

Si se requiere acelerar el proceso de curado se hace necesario aplicar calor al sistema.

#### Especificaciones técnicas de despacho

Parámetro	Rango	Método
Aspecto	Líquido viscoso	LAB-MA-016
Color	Bianco	LAB-MA-016
Olor	Característico	LAB-MA-016
Sólidos (%peso, 1g, 105°, 3h)	64.00 – 66.00	LAB-MA-032
Gravedad específica (25/20 °C)	1.290 – 1.310	LAB-MA-023
Viscosidad (cps, 25°C)	200 – 600	LAB-MA-017
pH (25°C)	8.3 – 8.5	LAB-MA-015
Formol Libre (%peso)	Max 0.8	LAB-MA-025
Solubilidad en agua, 25°C	Homogénea	LAB-MA-041
Tiempo de Curado (seg)	50 – 60	LAB-MA-037

#### Presentación

El polímero 230 se envía contenedores plásticos o metálicos de 250, 260, 280 kg y en IBC de 1300 kg.

Fecha: 27-10-2017  
Reemplaza: 14-07-2016  
Publicado por: Johana A. Torres Tafur  
Motivo del cambio: Actualización de formato

Akzo Nobel Peru  
Chilca - Lima, Perú  
Tel: +51 1 2509332 / +51 1 7388813  
Email: akzonobelperu@akzonobel.com

1

# CATALIZADOR DE LA ÚREA FORMALDEHÍDO

Akzo Nobel Peru SAC  
Wood Coatings

## Información de Producto **AkzoNobel**

### Catalizador CAT M6

#### Generalidades

El catalizador CAT M6 es un compuesto empleado como catalizador para las resinas urea formaldehído en diferentes aplicaciones como la industria del mueble y la madera.

El catalizador CAT M6 puede ser usado

haciendo mezclas de catalizador y resina conservando exactamente la proporción de componentes recomendado por el personal de Akzo Nobel Perú S.A.C.

Para cada aplicación debe determinarse las condiciones adecuadas de operación.

#### Especificaciones técnicas de despacho

Parámetro	Valor	Método análisis
Aspecto	Sólido granular	LAB-MA-016
Color	Bianco a amarillo ligero	LAB-MA-016
pH (25 °C) (solución al 10%)	5.0 – 6.0	LAB-MA-015

#### Presentación y Procedencia

El catalizador CAT M6 es entregado en bolsas de 25 kilos.

#### Almacenamiento

Para prevenir daño en el producto, se debe almacenar bajo techo, en espacios secos y a temperaturas de 25°C.

Nuestros ingenieros estarán complacidos de entregarle las recomendaciones sobre sistemas y niveles de dosificación.

#### Recomendaciones de Salud y Seguridad

Se recomienda consultar la hoja de seguridad, para ampliar información relacionada con el uso de equipos de protección personal, para el manejo adecuado del producto o sistema.

#### Asistencia Técnica

El Departamento Técnico de Akzo Nobel Perú S.A.C podrá asesorar en las formulaciones para algunas de las aplicaciones recomendadas, de modo que permitan un uso fácil, eficiente, económico y estable del producto.

Las informaciones que aparecen en esta ficha técnica son a nuestro entender confiables; las recomendaciones de usos o aplicaciones son la opinión de Akzo Nobel Perú SAC. El consumidor debe realizar sus ensayos para determinar el comportamiento del producto en sus propios procesos.

Akzo Nobel Perú SAC sólo da garantía en lo referente a las especificaciones del producto.

**SE RECOMIENDA LEER LA INFORMACION DE SEGURIDAD (MSDS) ANTES DE ALMACENAR, MANIPULAR O USAR ESTE PRODUCTO.**

Fecha: 27-10-2017  
Reemplaza: 14-07-2016  
Publicado por: Johana A. Torres Tafur  
Motivo del cambio: Actualización de formato

Akzo Nobel Peru  
Chilca - Lima, Perú  
Tel: +51 1 2509332 / +51 1 7388813  
Email: akzonobelperu@akzonobel.com

## ANEXO 8. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DE LOS TABLEROS MDF

CORTE DE MUESTRA DEL TABLERO  
MDF



MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE  
BARRIDO



MONTAJE DE LAS MUESTRAS



VISUALIZACION DE IMÁGENES SEM



**ANEXO 9. IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)  
DE LOS CUATRO TIPOS DE TABLEROS MDF**

IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (RMP-UF), CON AUMENTO DE 32 X.

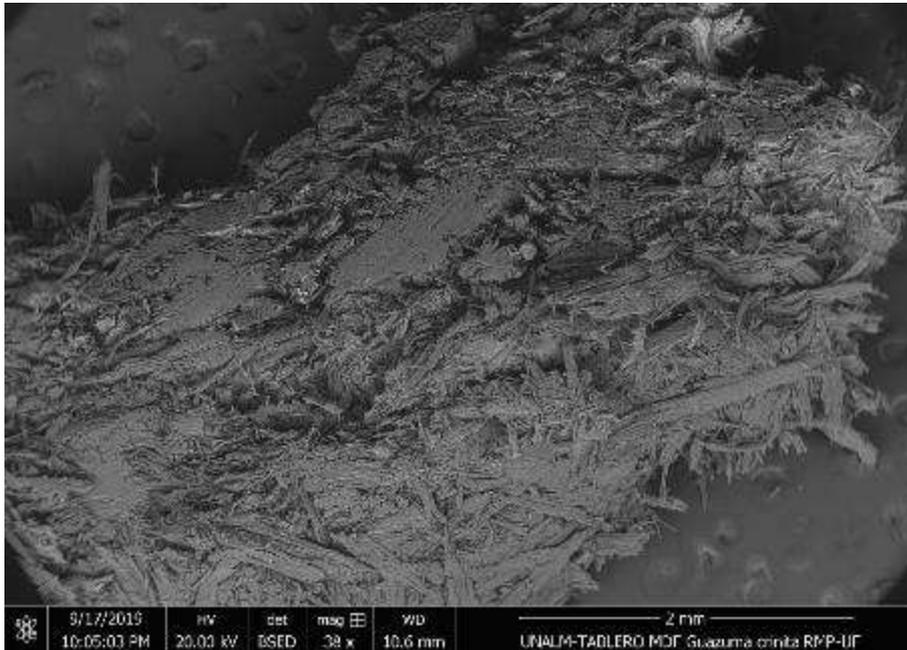


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (RMP-UF), CON AUMENTO DE 300 X.

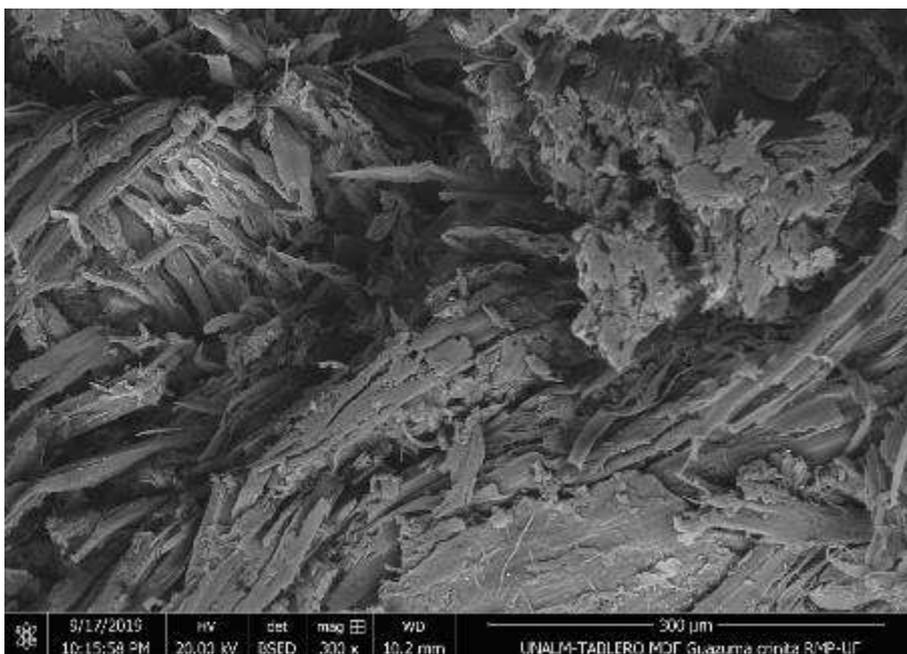


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (RMP-UF), CON AUMENTO DE 600 X.

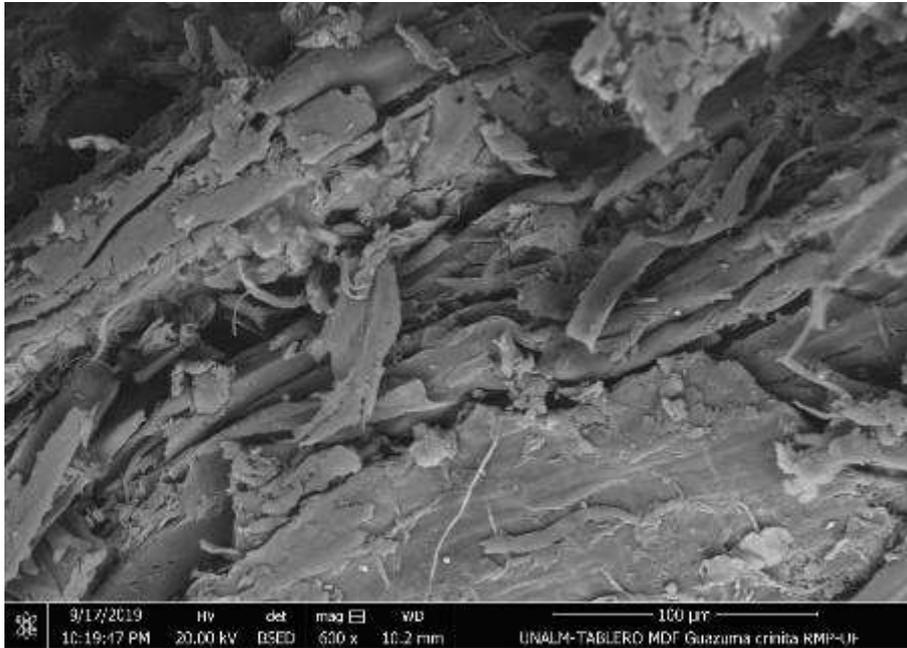


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (RMP-UF), CON AUMENTO DE 1200 X.

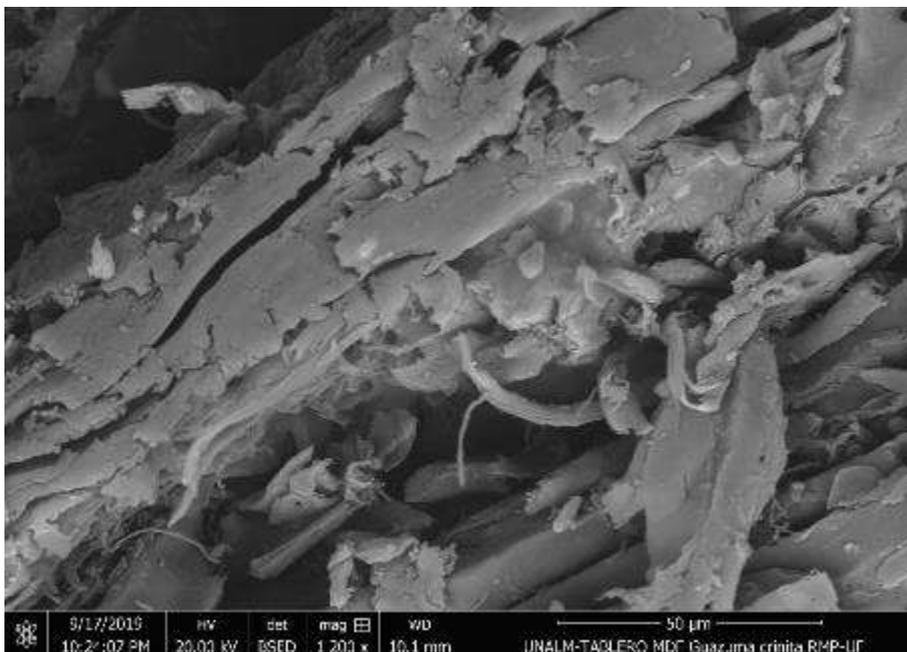


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (CMP-UF), CON AUMENTO DE 32 X.

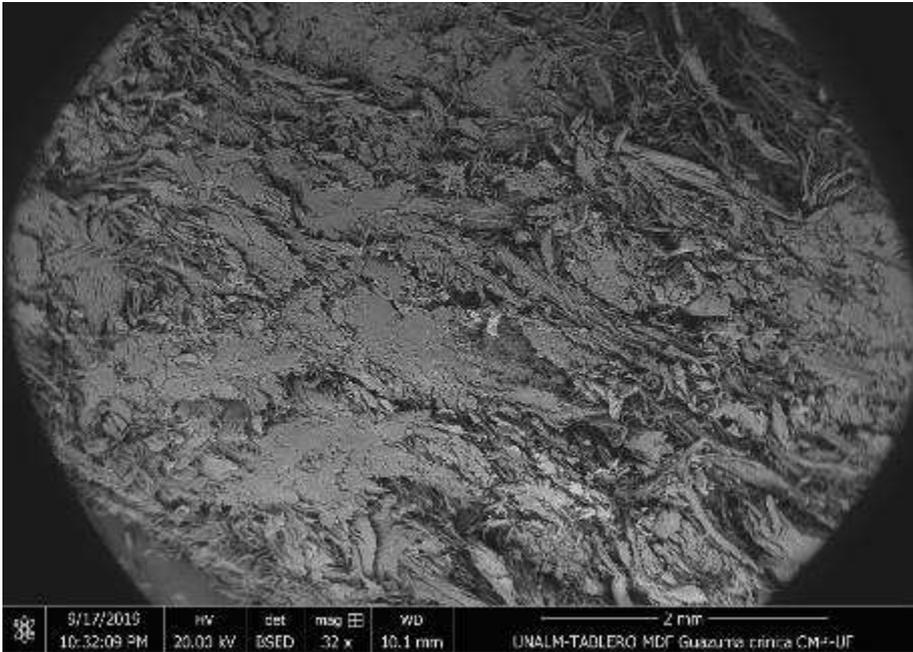


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (CMP-UF), CON AUMENTO DE 300 X.

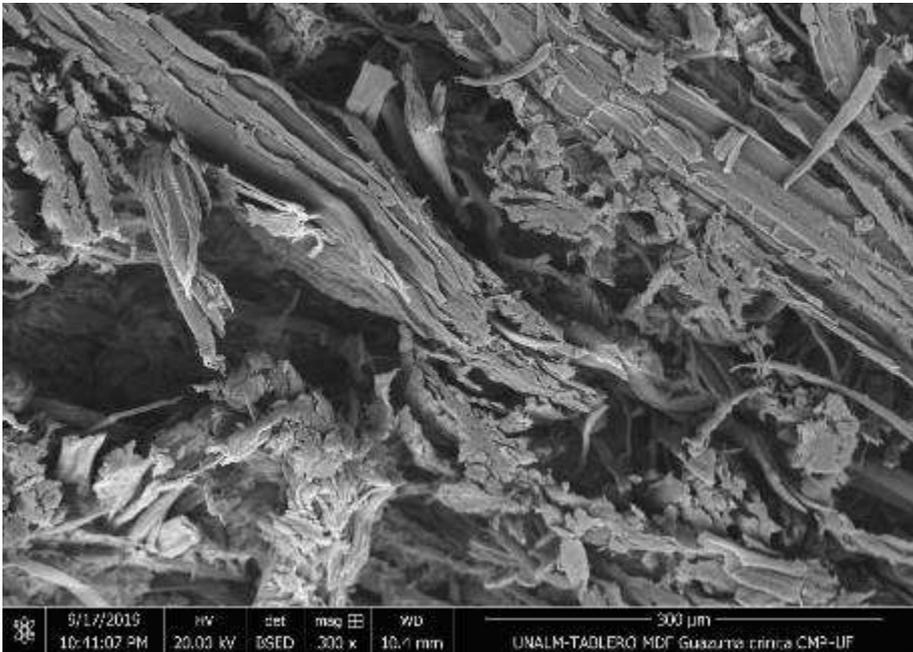


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (CMP-UF), CON AUMENTO DE 600 X.

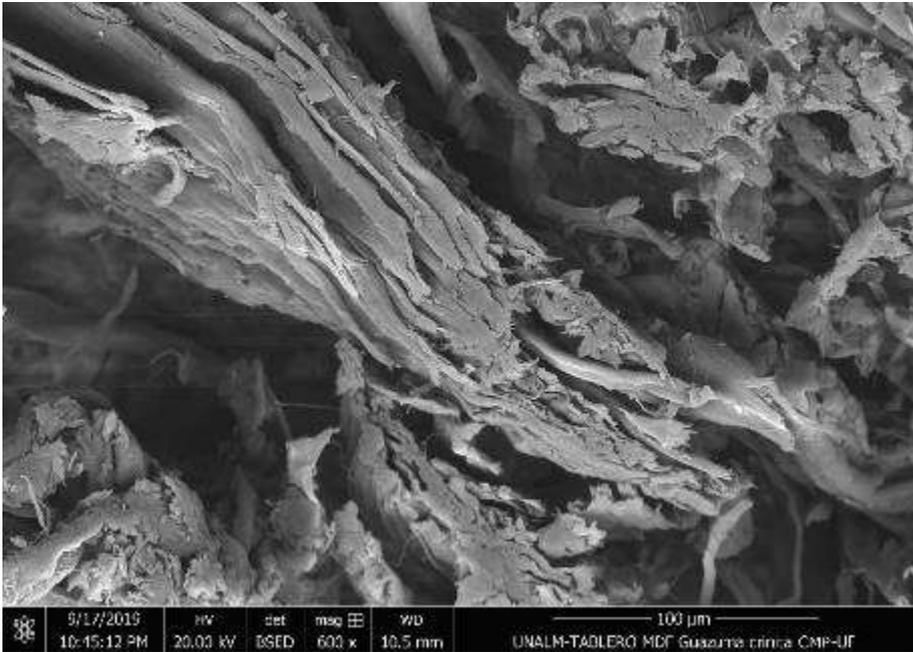


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y ÚREA FORMALDEHIDO (CMP-UF), CON AUMENTO DE 1200 X.

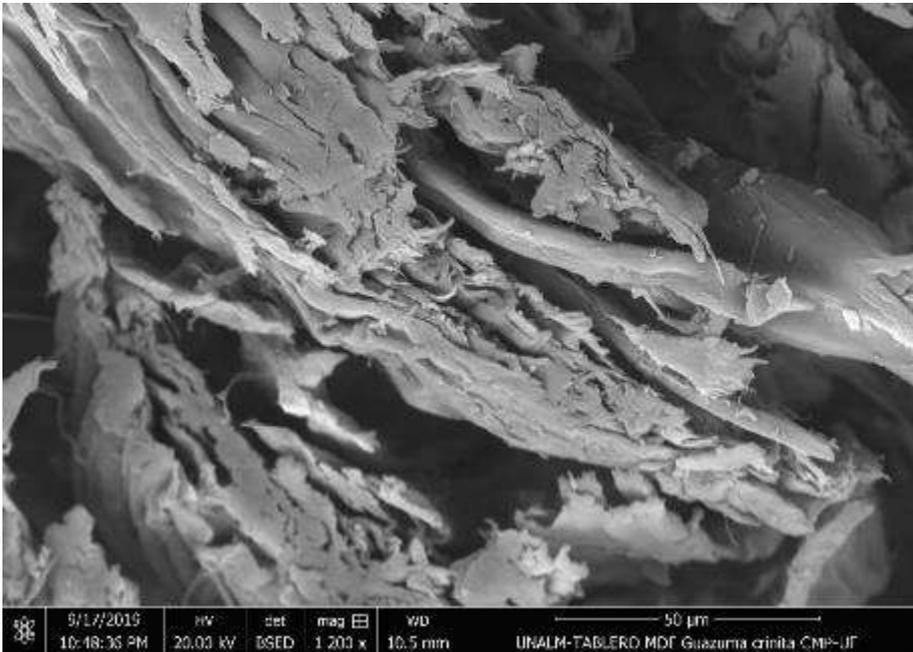


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (RMP-EPI), CON AUMENTO DE 32 X.

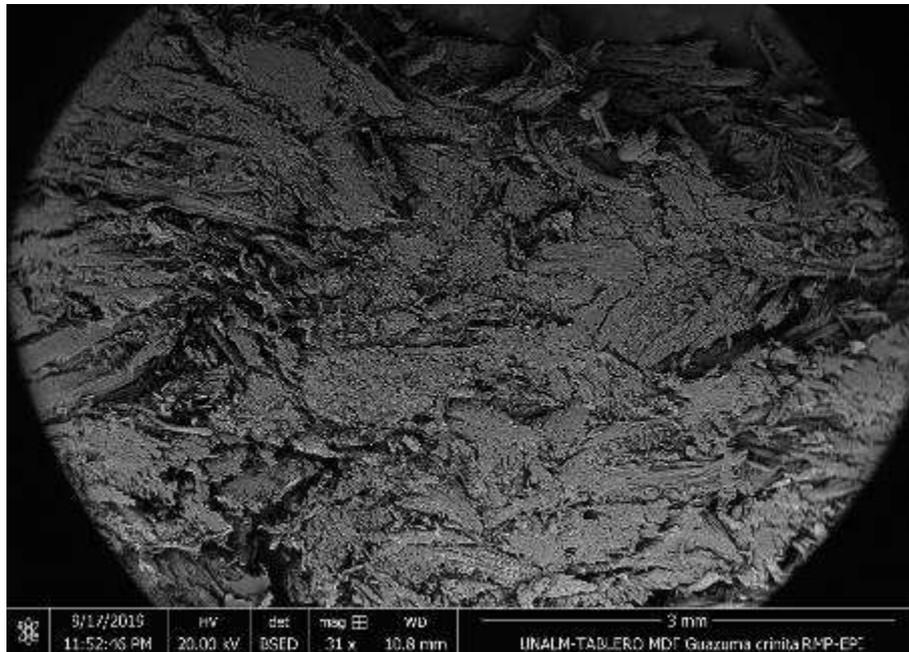


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (RMP-EPI), CON AUMENTO DE 300 X.

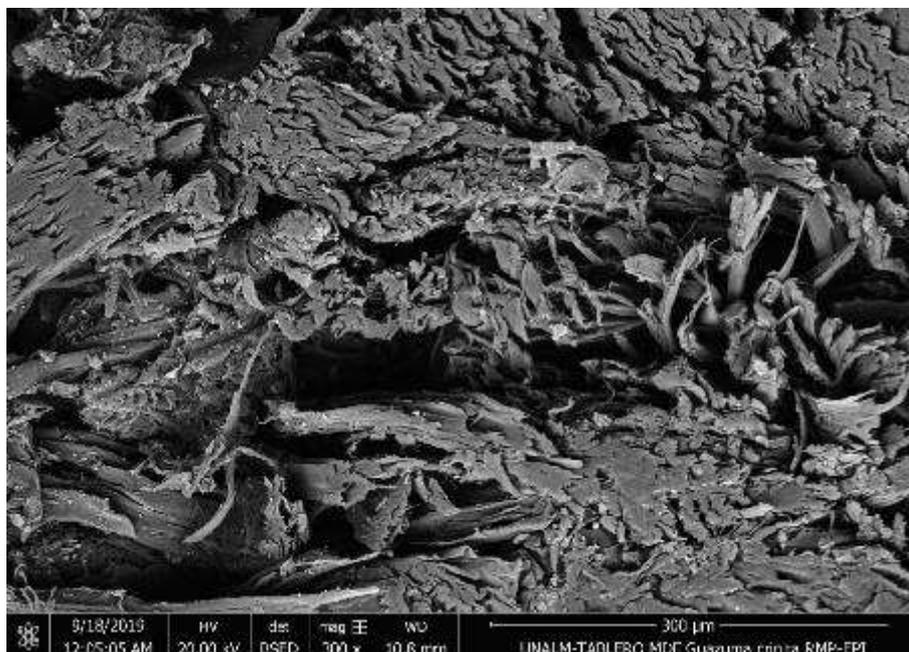


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (RMP-EPI), CON AUMENTO DE 600 X.

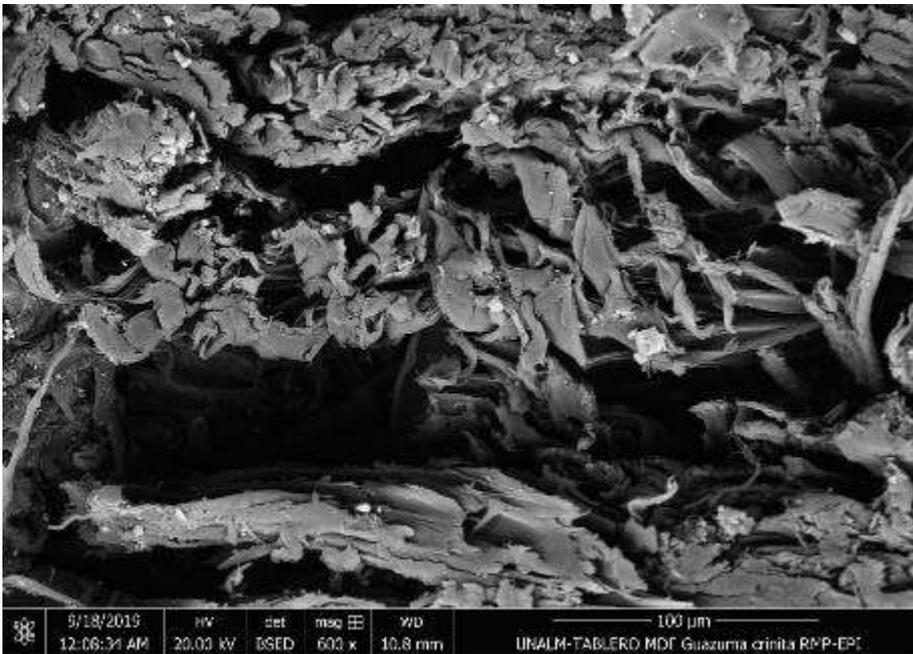


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (RMP-EPI), CON AUMENTO DE 1200 X.

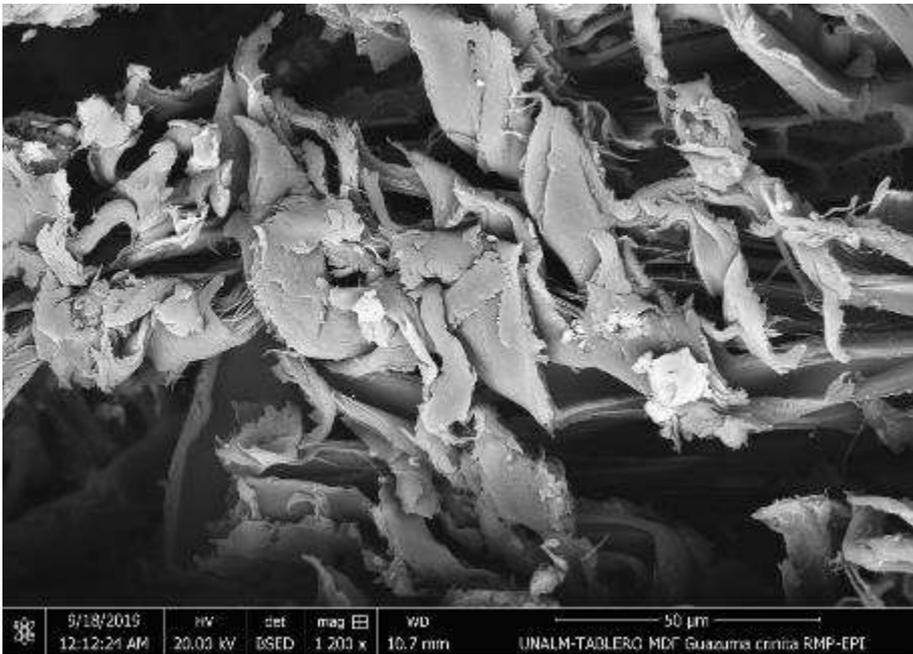


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (CMP-EPI), CON AUMENTO DE 32 X.

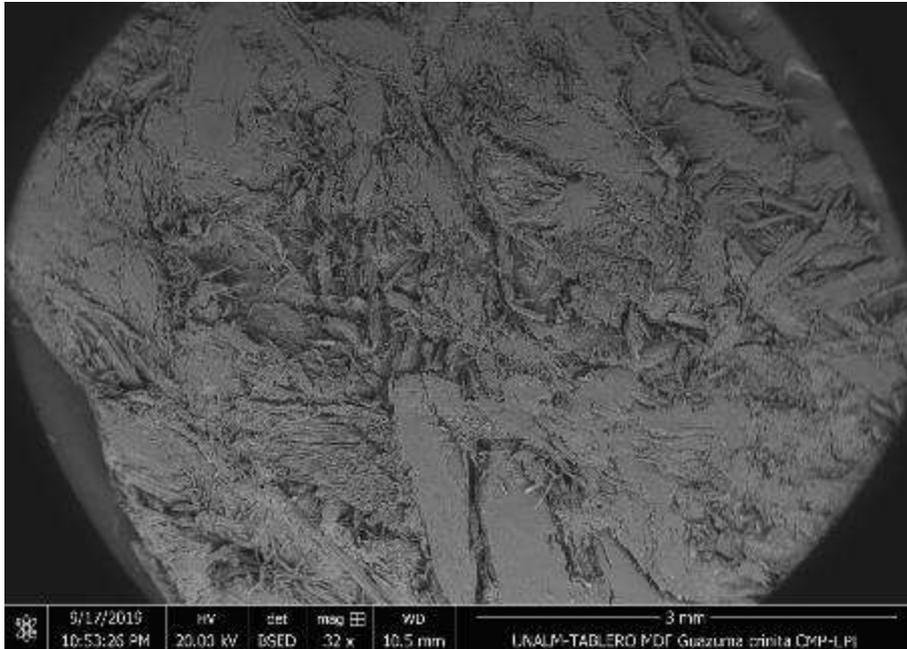


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (CMP-EPI), CON AUMENTO DE 300 X.

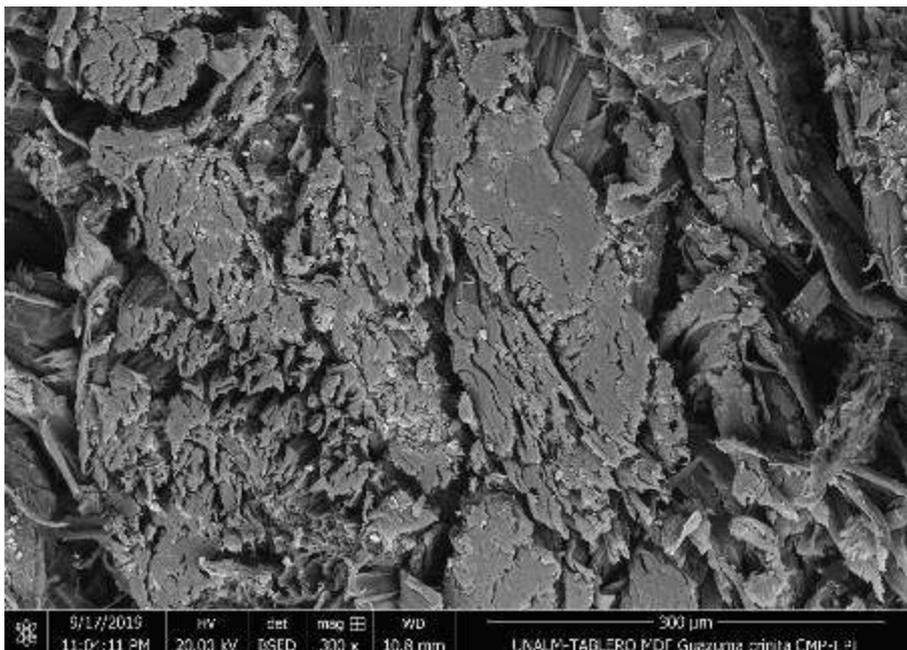


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (CMP-EPI), CON AUMENTO DE 600 X.

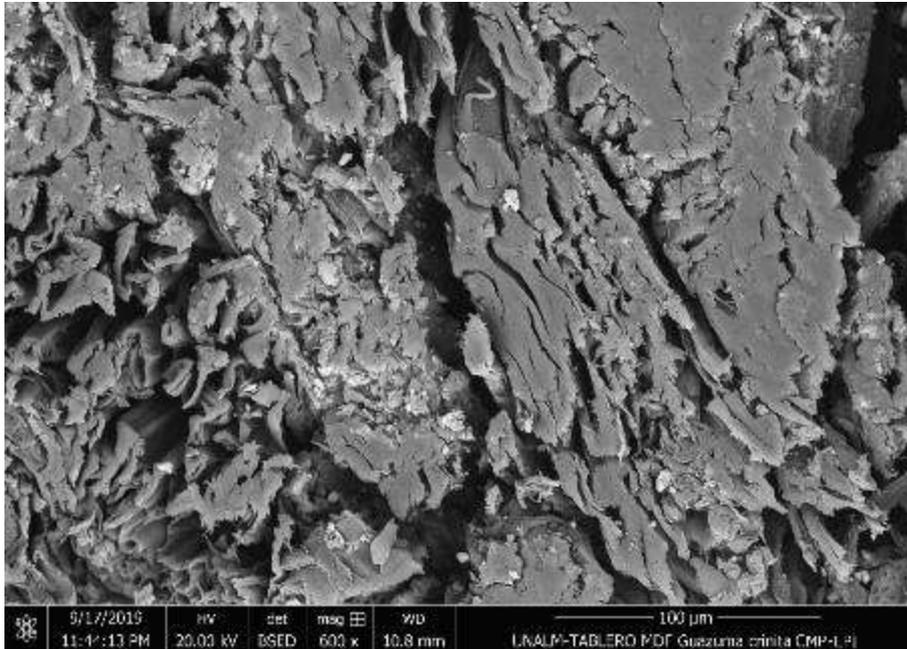
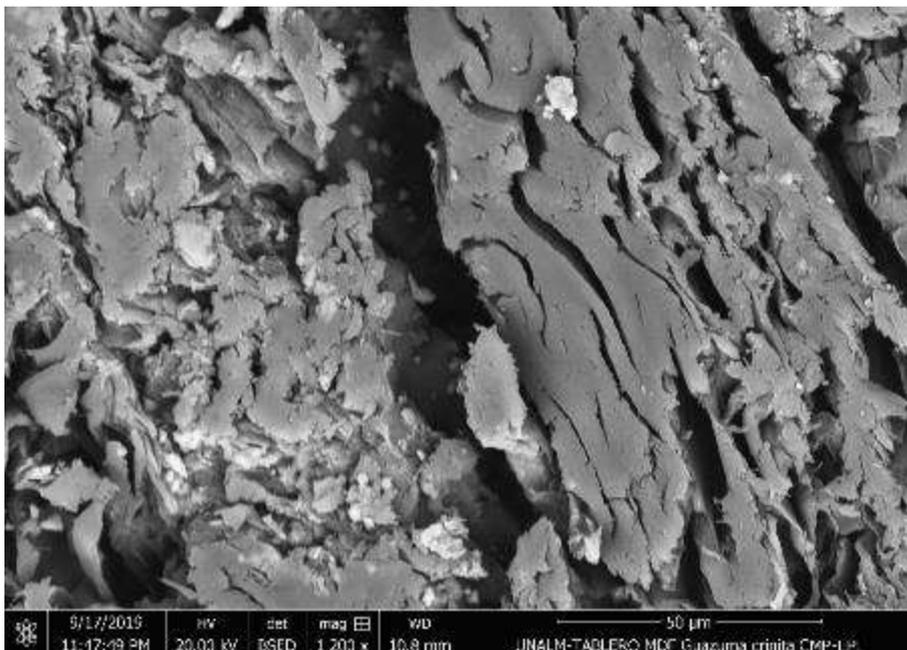
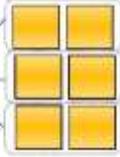
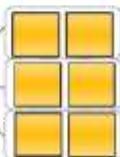
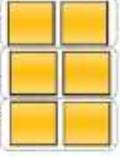
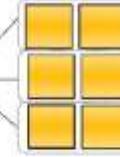


IMAGEN DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL TABLERO MDF CON PULPA QUÍMICO-MECÁNICA Y EMULSIÓN DE POLÍMERO DE ISOCIANATO (CMP-EPI), CON AUMENTO DE 1200 X.



**ANEXO 10. NÚMERO DE TABLEROS POR TRATAMIENTO Y LA  
DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS EN EL TABLERO**

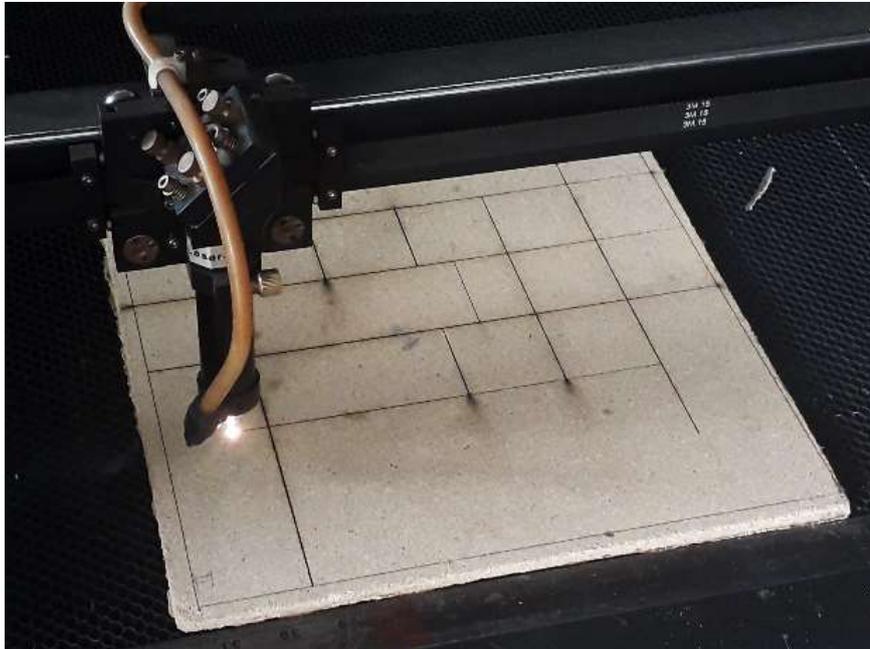
NÚMEROS DE TABLEROS MDF POR TRATAMIENTO

Tipo de pulpa	Tipo de resina	Úrea formaldehído (UF)	Emulsión de Polímero de Isocianato (EPI)
<p align="center"><b>PULPA QUÍMICO-MECÁNICA (CMP)</b></p>	<p align="center">6 tableros</p> 	<p align="center">6 tableros</p> 	
	<p align="center">6 tableros</p> 	<p align="center">6 tableros</p> 	



## ANEXO 11. ELABORACIÓN DE PROBETAS DEL TABLERO MDF

### CORTE DE TABLERO

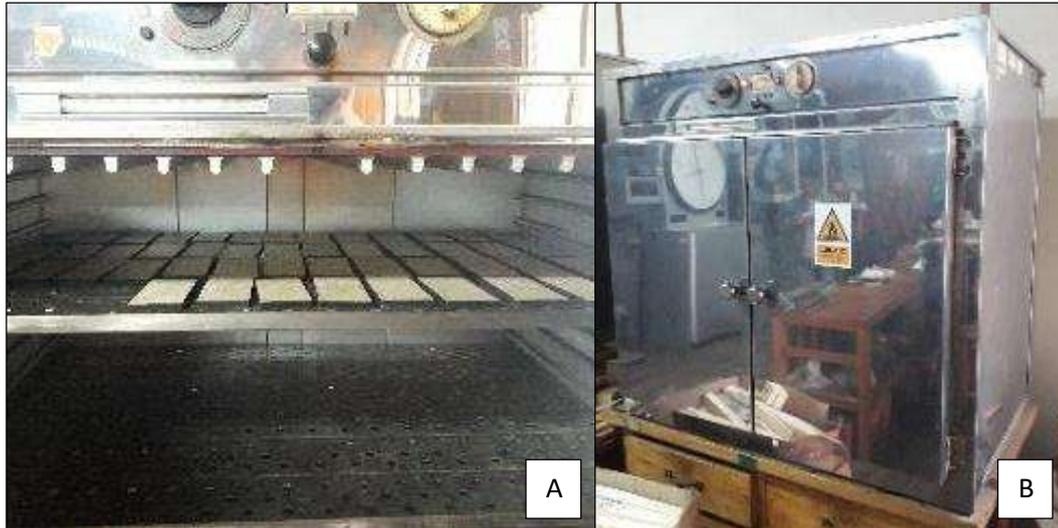


### PROBETAS DEL TABLERO



## ANEXO 12. ENSAYOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL TABLERO MDF

ENSAYO DE DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD: A – PROBETAS EN  
PROCESO DE SECADO, B – ESTUFA ELÉCTRICA PARA SECADO



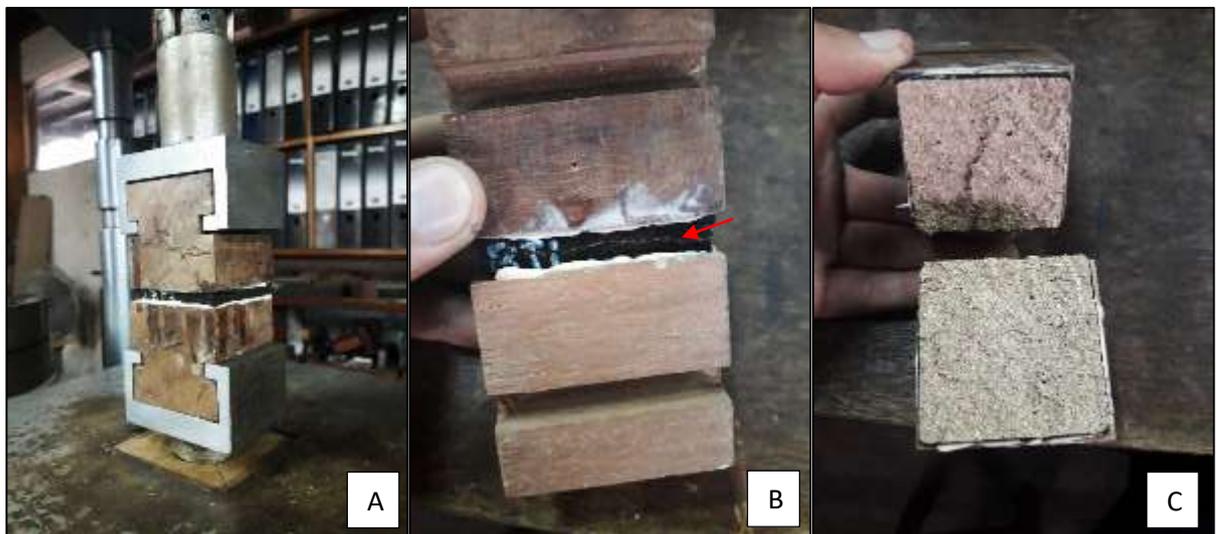
HINCHAMIENTO DEL ESPESOR DE TABLERO DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN  
AGUA



## ENSAYO DE FLEXIÓN



ENSAYO DE TRACCIÓN PERPENDICULAR A LAS CARAS DEL TABLERO: A – PROBETA EN TRACCIÓN PERPENDICULAR; B – PROBETA FRACTURADA Y C – REGIÓN INTERNA DE PROBETA FRACTURADA.



**ANEXO 13. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS TABLEROS MDF**

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DENSIDAD DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: DENSIDAD kg/m<sup>3</sup></b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	149259	149259	42,6403	9,862 e <sup>-9</sup>	***
Pulpa	1	55531	55531	15,8642	0,0001682	***
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	26458	26458	7,5585	0,0076436	**
Error	68	238028	3500			

*Códigos de significancia: '\*\*\*\*' 0,001; '\*\*\*' 0,01; '\*\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

<b>Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk</b>	
W = 0,98193	p-valor = 0,3891

- Homocedasticidad

<b>Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)</b>		
<b>Fórmula de varianza: ~ valores ajustados</b>		
Chi-cuadrado = 0,2256471	Grados de libertad = 1	p-valor = 0,63477

Prueba Tukey

Dado que existe significancia en la interacción, se realiza la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

- Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>RMP,EPI - RMP,UF</b>	52,7	19,7	68	2,673	0,0453
<b>RMP,EPI – CMP,EPI</b>	-93,9	19,7	68	-4,760	0,0001
<b>RMP,EPI – CMP,UF</b>	35,5	19,7	68	1,801	0,2818
<b>RMP,UF – CMP,EPI</b>	-146,6	19,7	68	-7,434	<0,0001
<b>RMP,UF – CMP,UF</b>	-17,2	19,7	68	-0,872	0,8191
<b>CMP,EPI – CMP,UF</b>	129,4	19,7	68	6,561	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

- Agrupamiento

---

<b>Pulpa</b>	<b>Resina</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>RMP</b>	<b>UF</b>	642	13,9	68	606	677	a
<b>CMP</b>	<b>UF</b>	659	13,9	68	623	695	ab
<b>RMP</b>	<b>EPI</b>	694	13,9	68	659	730	b
<b>CMP</b>	<b>EPI</b>	788	13,9	68	753	824	c

---

*Nivel de significancia utilizado:  $\alpha = 0,05$*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

---

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE MASA SECA %</b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	10,6815	10,6815	55,0885	2,763 e <sup>-9</sup>	***
Pulpa	1	0,1090	0,1090	0,5623	0,4573	
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	0,2208	0,2208	1,1385	0,2918	
Error	44	8,5315	0,1939			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### **Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,93488

p-valor = 0,01036

- Homocedasticidad

### **Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 4,252334

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,039196

## Prueba T-Student

Dado que no existe significancia en la interacción, ni el efecto del tipo de pulpa y cumple con los supuestos, se realiza la prueba de T-Student con un nivel de confianza de 95% para los efectos de la resina.

- Factor: Tipo de resina

---

### **Prueba T-Student (Two Sample t-test)**

---

t = -7,4464

Grados de libertad = 46

p-valor = 0,039196

---

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL HINCHAMIENTO DEL ESPESOR DESPUÉS DE 2 HORAS DE INMERSIÓN EN AGUA DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

**ANOVA: HINCHAMIENTO DEL ESPESOR DE TABLERO DESPUÉS DE 2 HORAS DE INMERSIÓN EN AGUA %**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	3113,45	3113,45	441,8251	$<2 e^{-16}$	***
Pulpa	1	830,59	830,59	117,8676	$<2 e^{-16}$	***
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	37,01	37,01	5,2525	0,0242	*
Error	92	648,30	7,05			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

**Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,94955

p-valor = 0,001025

- Homocedasticidad

**Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 21,42951

Grados de libertad = 1

p-valor =  $3,6708 e^{-6}$

## Prueba Kruskal-Wallis

Dado que no se cumple con los supuestos, se procede con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis con un nivel de confianza de 95%.

- Prueba estadística

---

<b>Prueba Kruskal-Wallis</b>		
Chi-cuadrado = 85,035	Grados de libertad = 3	p-valor = $<2,2 e^{-16}$

---

- Agrupamiento

---

<b>Tratamiento</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos</b>
CMP-UF	82,70833	a
RMP-UF	61,83333	b
CMP-EPI	36,37500	c
RMP-EPI	13,08333	d

---

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL HINCHAMIENTO DEL ESPESOR DESPUÉS DE 24 HORAS DE INMERSIÓN EN AGUA DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

**ANOVA: HINCHAMIENTO DEL ESPESOR DE TABLERO DESPUÉS DE 24 HORAS DE INMERSIÓN EN AGUA %**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	3897,6	3897,6	468,2538	$<2 e^{-16}$	***
Pulpa	1	1061,8	1061,8	127,5616	$<2 e^{-16}$	***
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	75,8	75,8	9,1031	0,0033	**
Error	92	765,8	8,3			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

**Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,97492

p-valor = 0,0623

- Homocedasticidad

**Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 19,07787

Grados de libertad = 1

p-valor =  $1,2549 e^{-5}$

## Prueba Kruskal-Wallis

Dado que no se cumple con los supuestos, se procede con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis con un nivel de confianza de 95%.

- Prueba estadística

---

<b>Prueba Kruskal-Wallis</b>		
Chi-cuadrado = 85,555	Grados de libertad = 3	p-valor = $<2,2 e^{-16}$

---

- Agrupamiento

---

<b>Tratamiento</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos</b>
CMP-UF	83,33333	a
RMP-UF	61,08333	b
CMP-EPI	36,41667	c
RMP-EPI	13,16667	d

---

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: MÓDULO DE RUPTURA N/mm<sup>2</sup></b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	279,77	279,769	27,5796	1,632 e <sup>-6</sup>	***
Pulpa	1	6,07	6,066	0,5980	0,44204	
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	66,18	66,182	6,5242	0,01289	*
Error	68	689,79	10,144			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### **Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,99098

p-valor = 0,8911

- Homocedasticidad

### **Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 1,986859

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,15867

Prueba Tukey

Dado que existe significancia en la interacción, se realiza la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

- Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>RMP,EPI - RMP,UF</b>	2,02	1,06	68	1,907	0,2346
<b>RMP,EPI – CMP,EPI</b>	-1,34	1,06	68	-1,259	0,5917
<b>RMP,EPI – CMP,UF</b>	4,52	1,06	68	4,260	0,0004
<b>RMP,UF – CMP,EPI</b>	-3,36	1,06	68	-3,167	0,0121
<b>RMP,UF – CMP,UF</b>	-2,50	1,06	68	2,353	0,0963
<b>CMP,EPI – CMP,UF</b>	5,86	1,06	68	5,520	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

- Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Resina</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>CMP</b>	<b>UF</b>	9,26	0,751	68	7,34	11,2	a
<b>RMP</b>	<b>UF</b>	11,76	0,751	68	9,84	13,7	ab
<b>RMP</b>	<b>EPI</b>	13,79	0,751	68	11,87	15,7	bc
<b>CMP</b>	<b>EPI</b>	15,12	0,751	68	13,20	17,0	c

*Nivel de significancia utilizado:  $\alpha = 0,05$*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE) DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: MÓDULO DE ELASTICIDAD N/mm<sup>2</sup></b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	6529861	6529861	45,3775	4,221 e <sup>-9</sup>	***
Pulpa	1	277715	277715	1,9299	0,16930	
<b>Interacción</b>						
(Resina-Pulpa)	1	625986	625986	4,3501	0,04076	*
Error	68	9785248	143901			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### **Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,9835

p-valor = 0,4669

- Homocedasticidad

### **Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 1,463811

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,22632

Prueba Tukey

Dado que existe significancia en la interacción, se realiza la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

- Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>RMP,EPI - RMP,UF</b>	415,8	126	68	3,288	0,0085
<b>RMP,EPI – CMP,EPI</b>	-62,3	126	68	-0,492	0,9605
<b>RMP,EPI – CMP,UF</b>	726,5	126	68	5,746	<0,0001
<b>RMP,UF – CMP,EPI</b>	-478,1	126	68	-3,781	0,0018
<b>RMP,UF – CMP,UF</b>	310,7	126	68	2,457	0,0761
<b>CMP,EPI – CMP,UF</b>	788,8	126	68	6,238	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

- Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Resina</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>CMP</b>	<b>UF</b>	1068	89,4	68	839	1297	a
<b>RMP</b>	<b>UF</b>	1379	89,4	68	1150	1607	a
<b>RMP</b>	<b>EPI</b>	1795	89,4	68	1566	2023	b
<b>CMP</b>	<b>EPI</b>	1857	89,4	68	1628	2086	b

*Nivel de significancia utilizado:  $\alpha = 0,05$*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TRACCIÓN PERPENDICULAR A LAS CARAS DEL TABLERO

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: TRACCIÓN PERPENDICULAR N/mm<sup>2</sup></b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Resina	1	0,3145	0,314475	6,6600	0,01144	*
Pulpa	1	0,1259	0,125942	2,6672	0,10585	
Interacción						
(Resina-Pulpa)	1	0,2774	0,277416	5,8751	0,04076	*
Error	92	4,3441	0,047219			

*Códigos de significancia: '\*\*\*\*' 0,001; '\*\*\*' 0,01; '\*\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

W = 0,96706

p-valor = 0,01622

- Homocedasticidad

### Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)

Fórmula de varianza: ~ valores ajustados

Chi-cuadrado = 1,073227

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,30022

## Prueba Kruskal-Wallis

Dado que no se cumple con los supuestos, se procede con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis con un nivel de confianza de 95%.

- Prueba estadística

---

<b>Prueba Kruskal-Wallis</b>		
Chi-cuadrado = 12,109	Grados de libertad = 3	p-valor = 0,007018

---

- Agrupamiento

---

<b>Tratamiento</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos</b>
CMP-EPI	64,95833	a
RMP-EPI	46,95833	b
RMP-UF	42,91667	b
CMP-UF	39,16667	b

---

## ANEXO 14. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ASTILLAS Y PULPAS

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HOLOCELULOSA

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: CONTENIDO DE HOLOCELULOSA %</b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	158,385	79,192	557,78	1,531 e <sup>-7</sup>	***
Error	6	0,852	0,142			

*Códigos de significancia: '\*\*\*\*' 0,001; '\*\*\*' 0,01; '\*\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

<b>Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk</b>	
W = 0,92268	p-valor = 0,4149

- Homocedasticidad

<b>Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)</b>		
<b>Fórmula de varianza: ~ valores ajustados</b>		
Chi-cuadrado = 0,7361964	Grados de libertad = 1	p-valor = 0,39088

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Holocelulosa, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	10,11	0,308	6	32,861	<0,0001
<b>AB - RMP</b>	6,65	0,308	6	21,604	<0,0001
<b>CMP - RMP</b>	-3,46	0,308	6	-11,257	0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 4 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>CMP</b>	77,32	0,2175	6	76,61	78,03	a
<b>RMP</b>	80,78	0,2175	6	80,07	81,50	b
<b>AB</b>	87,43	0,2175	6	86,72	88,14	c

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE ALFA-CELULOSA

Análisis de varianza (ANOVA)

---

**ANOVA: CONTENIDO DE ALFA-CELULOSA %**

---

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	0,82825	0,41413	1,583	0,2805	
Error	6	1,56962	0,26160			

---

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

---

Análisis de residuales

- Normalidad

---

### Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

---

W = 0,92393

p-valor = 0,4257

---

- Homocedasticidad

---

### Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)

---

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

---

Chi-cuadrado = 0,01080864

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,9172

---

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HEMICELULOSA

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: CONTENIDO DE HEMICELULOSA %</b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	152,309	76,154	137,48	9,739 e <sup>-6</sup>	***
Error	6	3,324	0,554			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

<b>Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk</b>	
W = 0,91777	p-valor = 0,3741

- Homocedasticidad

<b>Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)</b>		
<b>Fórmula de varianza: ~ valores ajustados</b>		
Chi-cuadrado = 3,655958	Grados de libertad = 1	p-valor = 0,055869

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Hemicelulosa, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	9,76	0,608	6	16,064	<0,0001
<b>AB - RMP</b>	7,04	0,608	6	11,593	0,0001
<b>CMP - RMP</b>	-2,72	0,608	6	-4,471	0,0101

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>CMP</b>	24,1	0,43	6	22,7	25,5	a
<b>RMP</b>	26,8	0,43	6	25,4	28,2	b
<b>AB</b>	33,9	0,43	6	32,5	35,3	c

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE LIGNINA

Análisis de varianza (ANOVA)

---

**ANOVA: CONTENIDO DE HEMICELULOSA %**

---

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	28,5283	14,2641	67,432	7,728 e <sup>-5</sup>	***
Error	6	1,2692	0,2115			

---

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

---

Análisis de residuales

- Normalidad

---

### Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

---

W = 0,8764

p-valor = 0,1439

---

- Homocedasticidad

---

### Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)

---

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

---

Chi-cuadrado = 1,924625

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,16535

---

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Lignina, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	-4,22	0,376	6	-11,246	0,0001
<b>AB - RMP</b>	-3,05	0,376	6	-8,131	0,0005
<b>CMP - RMP</b>	1,17	0,376	6	3,116	0,0472

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>AB</b>	21,8	0,266	6	20,9	22,7	a
<b>RMP</b>	24,9	0,266	6	24,0	25,7	b
<b>CMP</b>	26,0	0,266	6	25,2	26,9	c

*Nivel de significancia utilizado:  $\alpha = 0,05$*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE EXTRACTIVOS EN ETANOL

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: CONTENIDO DE EXTRACTIVOS EN ETANOL %</b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	1,68827	0,84413	116,34	1,588 e <sup>-5</sup>	***
Error	6	0,04353	0,00726			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### **Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,86375

p-valor = 0,1053

- Homocedasticidad

### **Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 7,668233

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,0056201

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Extractivos en etanol, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	0,213	0,0695	6	3,067	0,0501
<b>AB - RMP</b>	-0,793	0,0695	6	-11,407	0,0001
<b>CMP - RMP</b>	-1,007	0,0695	6	-14,474	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>CMP</b>	0,567	0,0492	6	0,406	0,728	a
<b>AB</b>	0,780	0,0492	6	0,619	0,941	a
<b>RMP</b>	1,573	0,0492	6	1,412	1,734	b

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE SOLUBLES EN AGUA FRÍA

Análisis de varianza (ANOVA)

---

**ANOVA: CONTENIDO DE SOLUBLES EN AGUA FRÍA %**

---

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	43,042	21,5212	174,45	4,832 e <sup>-6</sup>	***
Error	6	0,740	0,1234			

---

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

---

Análisis de residuales

- Normalidad

---

### Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

---

W = 0,85124

p-valor = 0,0769

---

- Homocedasticidad

---

### Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)

---

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

---

Chi-cuadrado = 0,1495513

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,69896

---

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Solubles en agua fría, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	-0,173	0,287	6	-0,604	0,8230
<b>AB - RMP</b>	-4,723	0,287	6	-16,470	<0,0001
<b>CMP - RMP</b>	-4,550	0,287	6	-15,866	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>AB</b>	4,34	0,203	6	3,68	5,01	a
<b>CMP</b>	4,52	0,203	6	3,85	5,18	a
<b>RMP</b>	9,07	0,203	6	8,40	9,73	b

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE SOLUBLES EN AGUA CALIENTE

Análisis de varianza (ANOVA)

<b>ANOVA: CONTENIDO DE SOLUBLES EN AGUA CALIENTE %</b>						
	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	24,7783	12,3891	102,49	2,3 e <sup>-5</sup>	***
Error	6	0,7253	0,1209			

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

Análisis de residuales

- Normalidad

### **Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk**

W = 0,8984

p-valor = 0,2429

- Homocedasticidad

### **Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)**

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

Chi-cuadrado = 0,05792149

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,80981

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Solubles en agua caliente, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	-3,98	0,284	6	-14,020	<0,0001
<b>AB - RMP</b>	-1,28	0,284	6	-4,497	0,0098
<b>CMP - RMP</b>	2,70	0,284	6	9,523	0,0002

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>AB</b>	3,51	0,201	6	2,85	4,17	a
<b>RMP</b>	4,79	0,201	6	4,13	5,44	b
<b>CMP</b>	7,49	0,201	6	6,83	8,15	c

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Análisis de varianza (ANOVA)

---

**ANOVA: CONTENIDO DE CENIZAS %**

---

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Muestra	2	14,490	7,2448	648,79	9,751 e <sup>-8</sup>	***
Error	6	0,067	0,0112			

---

*Códigos de significancia: '\*\*\*' 0,001; '\*\*' 0,01; '\*' 0,05; '.' 0,1; ' ' 1*

---

Análisis de residuales

- Normalidad

---

### Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

---

W = 0,90746

p-valor = 0,2985

---

- Homocedasticidad

---

### Prueba NCV (Non-constant Variance Score Test)

---

**Fórmula de varianza: ~ valores ajustados**

---

Chi-cuadrado = 0,9247884

Grados de libertad = 1

p-valor = 0,33622

---

## Prueba Tukey

Dado que existe significancia en el ANOVA para el contenido de Cenizas, se realiza la prueba Tukey (3 niveles) con un nivel de confianza de 95%.

### - Contrastes

<b>Contraste</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Desviación estándar de diferencia</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>
<b>AB - CMP</b>	-3,04	0,0863	6	-35,234	<0,0001
<b>AB - RMP</b>	-0,96	0,0863	6	-11,126	0,0001
<b>CMP - RMP</b>	2,08	0,0863	6	24,107	<0,0001

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*

### - Agrupamiento

<b>Pulpa</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Límites de confianza inferior</b>	<b>Límite de confianza superior</b>	<b>Grupo</b>
<b>AB</b>	0,77	0,061	6	0,57	0,97	a
<b>RMP</b>	1,73	0,061	6	1,53	1,93	b
<b>CMP</b>	3,81	0,061	6	3,61	4,01	c

*Nivel de significancia utilizado: alpha = 0,05*

*Ajuste del valor p: Método de Tukey para comparar un grupo de 3 estimaciones.*