



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE  
LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cyristax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS  
PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES**

**Silda Verónica González Gudiel**

Asesorado por la Inga. Telma Maricela Cano Morales

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**SILDA VERÓNICA GONZÁLEZ GUDIEL**

ASESORADO POR LA INGA. TELMA MARICELA CANO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramo Antonio
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cyristax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería de Química, con fecha junio de 2012



**Silda Verónica González Gudiel**



Guatemala, 07 de Febrero de 2012

Ingeniero  
Williams Álvarez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente HACEMOS CONSTAR que hemos revisado y dado nuestra aprobación al informe final del trabajo de graduación **EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES**, de la estudiante de Ingeniería Química Silda Verónica González Gudiel quien se identifica con el carné número 2006-11172

Sin otro particular nos suscribimos de usted.

Atentamente,



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
DIRECTORA

Centro de Investigaciones de Ingeniería/USAC  
Asesora

Ing. Mario José Mérida Meré  
COORDINADOR

Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -LIEV-  
Asesor





Guatemala, 18 de abril de 2012  
Ref. EI.Q.TG-IF.018.2012

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-077-2010-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Silda Verónica González Gudiel**

Identificada con número de carné: **2006-11172**

Previo a optar al título de INGENIERA QUÍMICA.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera: **Telma Cano Morales**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. César Alfonso García  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

  
ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2012

  
ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **SILDA VERÓNICA GONZÁLEZ GUDIEL** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (CYBISTAX DONELL-SMITHII (ROSE) SEIBERT) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2013

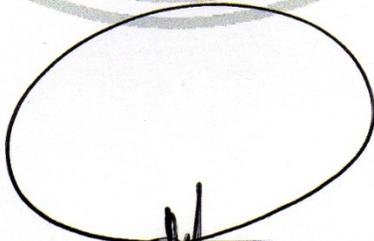
Cc: Archivo  
VMMV/ale



DTG. 616.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DEL ASERRÍO DE LA MADERA DE PALO BLANCO (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) DE LOS PRIMEROS RALEOS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE AGLOMERANTES**, presentado por la estudiante universitaria: **Silda Verónica González Gudiel**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 4 de septiembre de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por permitirme alcanzar esta meta, por darme fuerzas para superar los obstáculos presentados. Porque sé, que tomada de tu mano nunca me hará falta nada.

### **Mi madre**

Elsa Amanda Gudiel Carranza, por tu apoyo incondicional, tus sabios consejos, la confianza brindada y por ser la mejor madre del mundo.

### **Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por las enseñanzas académicas y personales, pero sobre todo, por darme el honor de ser orgullosamente sancarlista.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por cuidarme y mostrarme día a día el camino a seguir, por su infinita misericordia para conmigo y sobre todo, por rodear mi vida de ángeles.
- Mis padres** Elsa Gudiel y Jesús González, por estar conmigo en todo momento, por el amor que solo un padre sabe dar, por el apoyo y enseñanzas que me brindaron, las cuales me hacen ser quien soy. Los amo.
- Mi hermana** Alcira González, por cuidar de mí siempre.
- Familia Reyes Carranza** Por el cariño y por ser indiscutiblemente mi ejemplo a seguir.
- Mis amigos** Albin Gómez, Alicia García, Ana Herrera, Andrea Fong, Estuardo Chavarría, Jorge Doradea, Josué Alvarado, Luz Figueroa, Oswaldo Salazar, Pablo Gatica, Paola Mendía, Ulrich Segura y especialmente a Fernando Gutiérrez, por estar conmigo en todo momento, por hacer mi vida más plena, por los buenos y malos momentos compartidos, y por ser una bendición en mi vida.

**Centro de Investigaciones de Ingeniería** Por creer en mí para realizar dicha investigación.

**Comunidad de Nuevo México** Por brindarme el apoyo y confianza para realizar la investigación.

**Universidad de San Carlos de Guatemala** Por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios en esta prestigiosa institución.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS / HIPÓTESIS.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Generalidades de la madera.....	5
2.1.1. Estructura de la madera.....	5
2.1.2. Estructura macroscópica de la madera.....	6
2.2. Propiedades físicas de la madera.....	8
2.2.1. Anisotropía.....	9
2.2.2. Humedad de la madera. Relación agua-madera .....	10
2.2.3. Contenido de humedad.....	11
2.2.4. Hinchazón y merma de la madera .....	11
2.2.5. Peso específico.....	12
2.2.6. Durabilidad.....	13
2.2.7. Inflamación y combustión.....	14
2.3. Propiedades mecánicas de la madera.....	14
2.3.1. Elasticidad - deformidad.....	14
2.3.2. Flexibilidad .....	15
2.3.3. Dureza .....	16
2.3.4. Cortadura.....	16

2.3.5.	Hendibilidad.....	17
2.3.6.	Desgaste .....	17
2.3.7.	Resistencia al choque .....	18
2.3.8.	Resistencia a la tracción.....	18
2.4.	Composición elemental de la madera .....	19
2.5.	Panel de madera .....	22
2.5.1.	Tableros contrachapados .....	22
2.5.2.	Tableros de fibras.....	24
2.5.3.	Tableros de partículas o aglomerados .....	25
2.5.3.1.	Cualidades de los aglomerados .....	26
2.5.4.	Normas y especificaciones .....	29
2.5.4.1.	Tableros contrachapados .....	30
2.5.4.2.	Tableros de fibras .....	30
2.5.4.3.	Tableros aglomerados.....	31
2.6.	Uso de adhesivos en la madera.....	32
2.6.1.	Adherencia de la madera .....	33
2.6.2.	Tipos de adhesivos o colas .....	33
2.6.2.1.	Colas naturales.....	34
2.6.2.2.	Colas vegetales .....	35
2.6.2.3.	Colas de dextrinas.....	35
2.6.2.4.	Colas celulósicas.....	35
2.6.2.5.	Colas de hidratos de carbono.....	36
2.6.2.6.	Colas proteínicas (aglutina).....	36
2.6.2.7.	Colas de caseína.....	36
2.6.2.8.	Colas de albúmina.....	36
2.6.2.9.	Colas de soja.....	37
2.6.2.10.	Colas plásticas .....	37
2.6.2.11.	Policondensados .....	37
2.6.2.12.	Polímeros .....	38

2.7.	Información general del palo blanco .....	39
2.7.1.	Taxonomía de la planta.....	40
2.7.2.	Descripción botánica.....	40
2.7.3.	Ecología de la planta.....	41
2.7.3.1.	Requerimientos ambientales.....	41
2.7.3.2.	Fenología .....	41
2.7.3.3.	Características de la madera de palo blanco.....	41
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	43
3.1.	Variables.....	43
3.1.1.	Variables independientes.....	44
3.1.2.	Variables dependientes.....	44
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	45
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	45
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	46
3.4.1.	Materia prima, reactiva y material .....	46
3.4.2.	Cristalería .....	46
3.4.3.	Equipo.....	47
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	47
3.5.1.	Elaboración de aglomerados .....	50
3.5.2.	Determinación de propiedades físico-mecánicas de los aglomerados .....	50
3.5.2.1.	Propiedades físicas.....	50
3.5.2.2.	Propiedades mecánicas.....	51
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	51
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	52
3.7.1.	Elaboración de aglomerados .....	52
3.7.2.	Medición de densidad aparente de la madera .....	54

3.7.3.	Medición de humedad de la madera .....	55
3.7.4.	Cálculo de materia prima.....	56
3.7.5.	Determinación de contenido de humedad a trabajar .....	57
3.7.5.1.	Método matemático .....	59
3.7.5.2.	Método gráfico.....	60
3.7.6.	Humedad (UNE 56710) .....	62
3.7.7.	Determinación de peso específico (UNE 56709).....	63
3.7.8.	Variación del espesor y absorción de agua por inmersión (UNE 56713) .....	65
3.7.9.	Determinación de la resistencia de flexión (UNE 56711) .....	66
3.7.10.	Tabla de tabulación de datos.....	69
3.8.	Diseño experimental.....	70
4.	RESULTADOS.....	75
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	87
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES .....	95
	BIBLIOGRAFÍA .....	97
	APÉNDICES.....	101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura macroscópica de la madera.....	8
2.	Estructura de la madera.....	21
3.	Proceso de fabricación de tableros aglomerados .....	29
4.	Diagrama de bloques del diseño general de la investigación.....	48
5.	Diagrama de bloques del proceso de elaboración de aglomerados....	49
6.	Curva de desorción de la madera <i>Persea Americana Var.</i> <i>Guatemalensis Mill (Hass)</i> .....	58
7.	Determinación de la humedad de equilibrio de la madera en función de la humedad relativa del aire .....	61
8.	Porcentaje de humedad de los tableros de cola blanca(PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	78
9.	Porcentaje de humedad de los tableros de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	78
10.	Porcentaje de humedad de los tableros de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	79
11.	Densidad de los tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	79
12.	Densidad de los tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	80
13.	Densidad de los tableros con aglomerante de colofonía a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	80
14.	Absorción en agua de los tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67 .....	81

15.	Absorción en agua de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	81
16.	Absorción en agua de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	82
17.	Hinchazón de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	82
18.	Hinchazón de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	83
19.	Hinchazón de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	83
20.	Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T=21,93 Celsius y %h = 75,67.....	84
21.	Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de poliuretano a T=21,93 Celsius y %h = 75,67.....	84
22.	Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de colofonia a T=21,93 Celsius y %h = 75,67.....	85
23.	Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	85
24.	Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	86
25.	Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67.....	86

## TABLAS

I.	Composición química de la madera.....	20
II.	Definición operacional de las variables, para la elaboración de tableros de partículas de la madera de palo blanco.....	43

III.	Diseño experimental de la elaboración de aglomerados de los subproductos del aserrío de la madera de palo blanco .....	52
IV.	Modelo matemático de la curva de desorción de la madera <i>Persea Americana Var. Guatemalensis Mill (Hass)</i> .....	59
V.	Valores experimentales de humedad de equilibrio de la madera <i>Persea americana Var. Guatemalensis Mill (Hass)</i> .....	59
VI.	Resultados de humedad de equilibrio en función de la humedad relativa del aire.....	60
VII.	Determinación de densidad para el grano fino de madera .....	69
VIII.	Determinación de contenido de humedad de la madera.....	69
IX.	Monitoreo de contenido de humedad del aglomerado y humedad relativa del ambiente.....	69
X.	Análisis físico-mecánico de los aglomerados de madera de palo blanco de proporción 82%-18%, con aglomerante de cola blanca .....	70
XI.	Datos típicos para el diseño de bloques al azar .....	71
XII.	Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio .....	73
XIII.	Diseño experimental de la elaboración de tableros de partículas realizados .....	75
XIV.	Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de cola blanca (PVAc) .....	76
XV.	Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de poliuretano .....	76
XVI.	Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de colofonia .....	77
XVII.	Resumen de propiedades físico-mecánicas del tablero comercial .....	77



## GLOSARIO

<b>Aglomerado</b>	Plancha de fragmentos de madera prensados y mezclados con cola.
<b>Aglomerante</b>	Materiales aglomerantes que, en estado pastoso y con consistencia variable, tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, de unirlos entre sí, protegerlos, endurecerse y alcanzar resistencias mecánicas considerables.
<b>Aserrío</b>	Conjunto de desperdicio del proceso de serrado de la madera, excedentes después del corte de la misma como el que se produce en un aserradero, incluyendo aserrín, hojuelas, viruta, etcétera.
<b>Colofonia</b>	Resina sólida, transparente e inflamable, producto de la destilación de la trementina de algunos árboles, que se emplea sobre todo en farmacia.
<b>Densidad aparente</b>	Relación entre el volumen que se le presupone (incluyendo huecos y poros que contenga) y su peso real.
<b>Humedad de equilibrio</b>	Humedad contenida en un material higroscópico a una temperatura dada y humedad relativa.

**Humedad relativa**

Humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica.

**UNE**

Norma Española.

**Tamizado**

Separación de una mezcla compuesta por sólidos de diversos tamaños de grano en dos o más porciones mediante una superficie tamiz que actúa como separador.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación, busca el aprovechamiento de los subproductos del aserrío de madera, del primer raleo de palo blanco de especie *Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert, utilizándolos como materia prima, para la elaboración de tableros de partículas o aglomerados.

Se realizaron pruebas preliminares, para fijar las variables del proceso de mezcla y prensado de los tableros. Los aglomerantes utilizados fueron cola blanca (PVAc), barniz poliuretano y colofonia de pino oocarpa, en 3 proporciones diferentes y con 3 repeticiones sucesivas. Se utilizó tamaño de partícula de aserrín y viruta de la especie comprendida menor a 5,64 milímetros. La presión óptima de prensado fue de 40 000 libras fuerza, con un tiempo de 2 minutos por cada 10 000 libras fuerza.

Se determinaron algunas propiedades físico-mecánicas a los tableros de partículas, elaborados con base en la Norma Española de Tableros de Partículas (UNE), siendo estas: densidad o peso específico (UNE 56709), humedad (UNE 56710), resistencia a la flexión (UNE 56711), resistencia a la tracción paralela a las caras (UNE 56712) y por último hinchazón y absorción de agua por inmersión total (UNE 56713). Dichos ensayos, también fueron aplicados en las mismas condiciones, a un aglomerado comercial, el cual sirvió de parámetro de comparación para los especímenes elaborados.

Al realizarse el estudio estadístico, a través de un análisis de varianza se logró establecer que existe diferencia significativa entre las propiedades físico-mecánicas de los tableros según el aglomerante utilizado; determinándose que el tablero que muestra resultados más satisfactorios, es el tablero elaborado con barniz poliuretano.

# OBJETIVOS

## Generales

Evaluar la elaboración de tableros de partículas del aserrío de la madera de palo blanco (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) de los primeros raleos, utilizando distinto aglomerante.

## Específicos

1. Diseñar nueve mezclas de aserrío-aglomerante para la elaboración de especímenes de aglomerados, en función de la carga específica de prensado y el tiempo de compactación.
2. Determinar las propiedades físico-mecánicas de los aglomerados, en función del aglomerante a utilizar y de las diferentes proporciones aserrío-aglomerante.
3. Comparar las propiedades físico-mecánicas del espécimen elaborado con respecto a un espécimen de aglomerado comercial.

## HIPÓTESIS

Investigación

H1

Las propiedades físico-mecánicas de los aglomerados de los subproductos de la madera de palo blanco (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert), varían en función del aglomerante que se utilice.

Estadística

Ho:

Las propiedades físico-mecánicas de los aglomerados de los subproductos de la madera no varían en función del aglomerante que se utilice.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Ha:

Las propiedades físico-mecánicas de los aglomerados de los subproductos de la madera sí varían en función del aglomerante que se utilice.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

## INTRODUCCIÓN

Un tablero es un producto forestal, es decir, un elemento que se obtiene de la madera mediante algún proceso industrial y se presenta en forma de hojas, las cuales están constituidas por chapas, partículas o fibras. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) distingue tres tipos de tableros: de madera contrachapada o *triplay*, de fibra y de partícula o aglomerados.

De estos tres tipos, solamente los de madera contrachapada y los de partículas, pueden tener una aplicación estructural, ya que los de fibra no tienen las propiedades requeridas, para utilizarlos en construcción. Los tableros aglomerados se fabrican con partículas de madera, como son las hojuelas, astillas y virutas, las cuales se combinan con resinas sintéticas y otros tipos de adhesivo; la mezcla formada, se coloca entre planchas (moldes) a temperaturas altas, para luego prensarla y aumentar la densidad del producto.

A pesar del vasto mercado de Guatemala, existe ausencia de producto totalmente nacional, en cuanto a tableros se refiere, limitando grandemente las opciones de estos productos; lo que conlleva a proponer como trabajo de graduación, el estudio y elaboración de tableros aglomerados de los residuos de la madera de palo blanco (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert), utilizando distintos aglomerantes y proporción de madera, así como la realización de los ensayos respectivos para la determinación de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los mismos.



## 1. ANTECEDENTES

En Guatemala se tiene poca información sobre el aprovechamiento de subproductos de la madera, sin embargo, es en los países de América del Sur y en Cuba donde se encuentra la mayor parte de investigaciones en madera, habiéndose realizado estudios que brindan información acerca del aprovechamiento de subproductos de la madera. Entre los trabajos de investigación más relevantes se encuentran los siguientes:

- Compuestos no-estructurales de cementos comerciales y aserrín de maderas argentinas, realizado por Antonio L. Beraldo y Humberto Balzamo, en la Universidad BioBio de Chile, en el Departamento de Ciencia y Tecnología en la sección de madera en el 2009. En este trabajo se mezcló cierta proporción de aserrín y corteza a tres tipos de cemento comercial, elaborando probetas para luego realizarle pruebas físico-mecánicas a los 14 días de elaboración de las mismas.
- Compuestos mixtos a base de plásticos y madera, realizado por Mario Solís Jara y Justo Lisperguer Muñoz, del Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de BioBio, Chile, en el 2002. El estudio presentado, trata sobre la elaboración de compuestos mixtos a base de polietileno (PE) y cloruro de polivinilo (PVC) vírgenes y maderas de pino (*radiata*, *raulí* y *eucaliptus nitens*). Investigando las influencias del tipo de madera, su granulometría y el porcentaje de reemplazo del polímero por madera en las propiedades mecánicas y físico-químicas a base de tracción, resistencia al impacto y resistencia a la humedad, para ver el efecto de las variables anteriormente planteadas.

- Obtención y polimerización del alquitrán de pirolisis de aserrín de pino en cama fluidizada, realizado por Manuel Díaz y José Suárez, del Departamento FQB, Facultad de Ingeniería Química y la Facultad de Ingeniería Mecánica, universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, en el 2006. Este trabajo busca obtener polímeros que puedan ser utilizados a escala industrial, obtenidos de la pirolisis de materiales lignocelulósicos, ya que los mismos presentan fenoles, los cuales al ponerse en contacto con formaldehído forman polímeros. Se utilizó como materia prima el aserrín y a través del resultado de las pruebas aplicadas al polímero se concluye que el mismo se trata de un polímero alto.
- Aprovechamiento de los residuos madereros, estudio realizado por la Dra. Esther Álvarez Godoy, del Centro de Estudios Forestales, Universidad de Pinar del Río, Cuba, en el 2003. En dicho estudio se expone el problema del desaprovechamiento de los materiales lignocelulósicos como el aserrín y la corteza de la madera; así también, se presentan sugerencias para el aprovechamiento óptimo de estos residuos con enfoque ambientalista.
- Estudio de las propiedades de la madera del primer raleo de teca, gmelina, ciprés y palo blanco, para determinar su potencial industrial, realizado por MSc. José Mario Saravia Molina e Inga. Telma Maricela Cano Morales, para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Secretaría Nacional de Ciencias y Tecnología y el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología. En el estudio presentado se determinan las propiedades físicas, anatómicas, químicas y mecánicas de la madera de diversas especies forestales, con el fin de crear bases de datos para caracterizar la flora guatemalteca y ampliar el uso industrial de la madera de primer raleo.

Se tomaron muestras a tres alturas diferentes, comparando los resultados entre sí y en el caso específico de la madera palo blanco se trabajó a seis años de edad.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Generalidades de la madera**

La madera es una sustancia dura y resistente que constituye el tronco de los árboles; se ha utilizado durante miles de años como combustible, materia prima para la fabricación de papel, mobiliario, construcción de viviendas y una gran variedad de utensilios para diversos usos.

La madera debe sus atributos a la complejidad de su estructura, con propiedades y características que dependen no solo de su composición, sino de su constitución, la manera en que están colocados u orientados los diversos elementos que la forman.

La madera no es un material homogéneo, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos; estos sirven para realizar las funciones fundamentales del árbol; conducir la savia, transformar y almacenar los alimentos. Por último, formar la estructura resistente o portante del árbol.

#### **2.1.1. Estructura de la madera**

La madera es una sustancia fibrosa, organizada, esencialmente heterogénea, producida por un organismo vivo que es el árbol. Sus propiedades y posibilidades de empleo son, en definitiva, la consecuencia de los caracteres, organización y composición química de las células que la constituyen.

El origen vegetal de la madera hace de ella un material con características peculiares que la diferencia de otros de origen mineral.

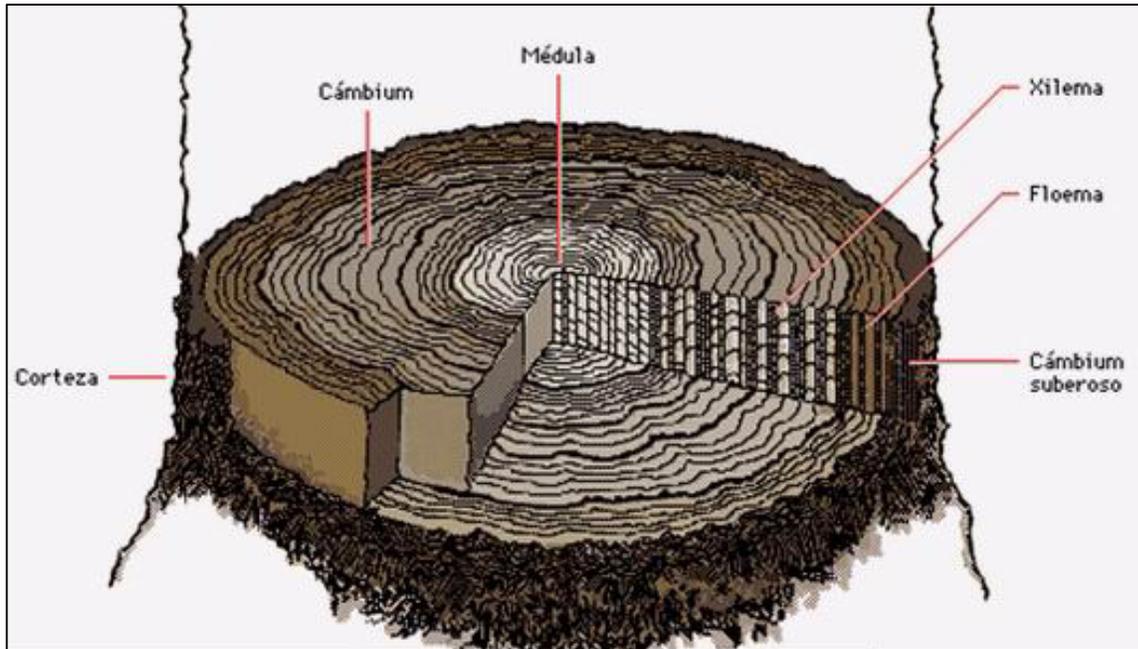
### **2.1.2. Estructura macroscópica de la madera**

La madera posee diversos elementos característicos que lo forman, y además, se trata de un material homogéneo. Si se observa el tronco de un árbol, se ve que tiene forma casi cilíndrica, es decir, una forma troncocónica; y que está formado por sucesivas capas superpuestas, llamadas anillos. En primer lugar se aprecia que, entre la madera y la corteza existe una capa generatriz llamada cambium, que produce madera hacia el interior y corteza hacia el exterior. En cada período vegetativo se forma una nueva capa o anillo que cubre la anterior.

- La médula es la parte central del árbol constituida por tejido flojo y poroso. Tiene un diámetro muy pequeño. La madera vieja y normalmente agrietada, se suele desechar en los procesos de elaboración de productos de madera.
- El duramen es la madera de la parte interior del tronco constituido por tejidos que han llegado a su máximo desarrollo y resistencia de coloración, a veces más oscura que la exterior. La madera adulta y compacta, es más aprovechable. La duraminización, la transformación de albura a duramen, de la madera se caracteriza por una serie de modificaciones anatómicas y químicas, como oscurecimiento, aumento de densidad y mayor resistencia frente a los ataques de los insectos.
- El albura se encuentra en la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en período de crecimiento (zona viva).

- Contiene mucha savia y materias orgánicas de coloración más clara que el duramen, más porosa y más ligera, con mayor riesgo frente a los ataques bióticos.
- El cambium es la capa existente entre la albura y la corteza, constituye la base del crecimiento, en especial del tronco, generando dos tipos de células:
  - Hacia el interior: madera (albura)
  - Hacia el exterior: liber
- El liber es la parte interna de la corteza, es filamentosa y poco resistente, madera embrionaria viva y la corteza es la capa exterior del tronco es tejido impermeable que recubre el liber y protege al árbol.
- Los radios leñosos son bandas o láminas delgadas de un tejido, cuyas células se desarrollan en dirección radial o sea, perpendicular a los anillos de crecimiento. Ejercen una función de trabazón. Almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente. Por ello, constituyen las zonas de rotura a compresión, cuando se ejerce el esfuerzo paralelamente a las fibras.
- Los anillos anuales corresponden al crecimiento anual, consta de dos zonas claramente diferenciadas: una formada en primavera: predominan en ella los vasos gruesos que conducen la savia bruta hasta las hojas color claro, pared delgada y fibras huecas y blandas. El otro formado en verano: tienen los vasos más pequeños y apretados. Sus fibras forman el tejido de sostén. Color oscuro denso y fibras de paredes gruesas.

Figura 1. **Estructura macroscópica de la madera**



Fuente: ESCOBAR TOLEDO, Erickson Roberto. *Caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe pinuscaribaea (morelet) var. hondurensis (barretygolfari) a nivel laboratorio proveniente de la finca semuc 6, El Estor Izabal.* p. 3.

## 2.2. **Propiedades físicas de la madera**

Las principales propiedades de la madera son: resistencia, dureza, rigidez y densidad. Esta última suele indicar propiedades mecánicas, ya que cuanto más densa es la madera, su composición es más fuerte y dura.

Entre sus cualidades resalta su resistencia a la compresión que puede llegar a ser superior a la del acero, a la flexión, al impacto y a las tensiones.

### **2.2.1. Anisotropía**

Los hidróxidos de la mayoría de los elementos que se separan de la disolución por precipitación deben llamarse mejor óxidos hidratados, ya que llevan asociada al óxido una cantidad de agua indefinida.

Dado que la madera es un material formado por fibras orientadas en una misma dirección, es un material anisótropo, es decir, que ciertas propiedades físicas y mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado, sino que varían en función de la dirección en la que se aplique el esfuerzo.

Se consideran tres direcciones principales con características propias:

- Dirección axial: paralela a las fibras y por tanto al eje del árbol. En esta dirección es donde la madera presenta mejores propiedades.
- Dirección radial: perpendicular al axial, corta el eje del árbol en el plano transversal y es normal a los anillos de crecimiento aparecidos en la sección recta.
- Dirección tangencial: localizada también, en la sección transversal pero tangente a los anillos de crecimiento o también, normal a la dirección radial.

### **2.2.2. Humedad de la madera. Relación agua-madera**

Es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás propiedades físicas, mecánicas, mayor o menor aptitud para su elaboración, estabilidad dimensional y resistencia al ataque de seres vivos.

El agua es el vehículo de transporte que utilizan las plantas para su alimento, esto, unido a la higroscopicidad de la madera, hace que esta tenga normalmente en su interior cierta cantidad de agua, que es necesario conocer antes de su uso, debido a las modificaciones que produce en las características físicas y mecánicas.

El agua en la madera puede estar presente de tres formas diferentes:

- Agua de constitución o agua combinada: es aquella que entra a formar parte de los compuestos químicos que constituyen la madera. Forma parte integrante de la materia leñosa (de su propia estructura) y no se puede eliminar si no es destruyendo al propio material (por ejemplo, quemándola).
- Agua de impregnación o de saturación: es la que impregna la pared de las células rellenando los espacios submicroscópicos y microscópicos de la misma. Se introduce dentro de la pared celular, siendo la causa de la contracción de la madera cuando la pierde (desorción) y de su expansión o hinchamiento cuando la recupera (sorción: retención de agua). Se puede eliminar por calentamiento hasta 100 – 110 Celcius.
- Agua libre: es la que llena el lumen de las células o tubos (vasos, traqueidas, etcétera). Es absorbida por capilaridad.

El agua libre, una vez perdida por la madera, ya no puede ser recuperada a partir de la humedad atmosférica. Para recuperarla habrá de ser por inmersión directa en el agua. El agua libre no tiene más repercusión que la ocupación física de los huecos y por consiguiente, no influye en la hinchazón o merma de la madera ni en las propiedades mecánicas. Las dos últimas, impregnación y libre son las que constituyen la humedad de la madera. La humedad es la cantidad de agua que contiene la madera expresada en porcentaje (%) de su peso en estado anhidro o húmedo.

### **2.2.3. Contenido de humedad**

La humedad no es constante en todo el espesor de la pieza, siendo menor en el interior y teniendo más humedad la albura que el duramen.

La madera contiene más agua en verano que en invierno. Es un material higroscópico, lo cual significa que absorbe o desprende agua en función del ambiente que le rodea. Expuesta al aire pierde agua y acaba estabilizándose a una humedad que depende de las condiciones del ambiente: temperatura y humedad.

Si estas condiciones varían, también variará su contenido de humedad. La humedad de la madera tiende a estar en equilibrio con el estado del aire ambiente. Este equilibrio no es el mismo si la madera está secándose, que si está absorbiendo agua.

### **2.2.4. Hinchazón y merma de la madera**

Es la propiedad que posee la madera de variar sus dimensiones y su volumen cuando su contenido de humedad cambia. Cuando una madera se

seca por debajo de punto de saturación de las fibras se producen unos fenómenos comúnmente llamados movimientos, trabajo o juego de la madera..

El aumento de volumen con la humedad es, prácticamente, proporcional a la misma, hasta un punto que coincide aproximadamente con el 25 por ciento de humedad, sigue el aumento de volumen, pero con incrementos cada vez menores, hasta el punto de saturación de las fibras (PSF) a partir que el volumen permanece prácticamente constante (deformación máxima).

La contracción volumétrica entre dos estados de humedad viene dado por el porcentaje de variación de volumen entre los dos estados. La medida de contracción volumétrica no es suficiente para determinar la calidad de una madera. Es preciso saber cómo se comporta bajo la influencia de las variaciones de humedad próximas a la humedad normal, que es, en general, la que corresponde al ambiente de empleo de la madera.

#### **2.2.5. Peso específico**

Al ser un material poroso se puede considerar o no los poros para determinar el peso específico. Dada esta naturaleza porosa y las variaciones de peso y volumen, en función del contenido de humedad, hay que especificar las condiciones en que se verifican las medidas del peso específico.

Si se consideran los poros se contempla el volumen aparente y se obtiene el peso específico aparente. Si se considera solo la masa leñosa (se deduce el volumen de poros) se obtiene el peso específico real. Se establecen como puntos de comparación los valores de 0 y 12 por ciento de humedad. Al primero se llama peso específico anhidro y al segundo es la humedad normal, según normas internacionales.

El peso específico de la pared celular (peso, sin considerar los poros), es prácticamente constante en todas las especies y es del orden de 1,55 gramos por centímetro cúbico. Este es el límite máximo teórico, que podría alcanzar una madera, en la que los huecos celulares los hubiese reducido a cero. Las diferencias entre las maderas se debe a la mayor o menor proporción de dichos huecos.

### **2.2.6. Durabilidad**

Es una propiedad muy variable, pues depende de muchos factores:

- El ambiente.
- La especie de la madera.
- La forma de apeo.
- Las condiciones de la puesta en obra.
- La forma de secado.
- Las alteraciones de la humedad y sequedad.
- El contacto con el suelo (empotrada en terrenos arcillosos y en arena húmeda se conserva mucho tiempo, en arenas y calizas, duran poco).
- El agua (sumergida en agua dulce se conserva mucho tiempo).
- Su tratamiento antes de ser usada, su protección una vez puesta en obra (pinturas, etcétera).

A más densidad mayor duración. Son maderas durables: la encina, el roble, la caoba, el haya, entre otras.

### **2.2.7. Inflamación y combustión**

Las maderas arden, lo cual desde el punto de su utilización como combustible, es una cualidad, pero para su empleo en la construcción y decoración es un defecto.

Las reacciones que se producen son las siguientes: la celulosa de la madera, constituyente de la fibra vegetal, al arder se combina con el oxígeno del aire, dejando un pequeño residuo ceniciento, procedente de la lignina y de las sales minerales; cuando el oxígeno es abundante y la temperatura suficiente, la destrucción es casi total, pero si la combustión es incompleta por carencia de estos factores, la celulosa sufre una deshidratación y la madera queda convertida en carbón vegetal, carente de resistencia. Con el pintado y mejor con la impregnación de sustancias ignífugas, se reduce considerablemente la inflamabilidad y combustibilidad de las maderas.

### **2.3. Propiedades mecánicas de la madera**

Al hablar de las propiedades mecánicas de la madera se debe hacer hincapié en su constitución anatómica, ya que dichas propiedades se refieren a la capacidad que tienen los materiales de resistir acciones de cargas o fuerzas externas.

#### **2.3.1. Elasticidad - deformidad**

Bajo cargas pequeñas, la madera se deforma de acuerdo con la Ley de Hooke, o sea, que las deformaciones son proporcionales a las tensiones.

Cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad la madera se comporta como un cuerpo plástico y se produce una deformación permanente. Al seguir aumentando la carga, se produce la rotura.

La manera de medir deformaciones es a través del módulo de elasticidad, según la fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad

$\sigma$  = tensión

$\varepsilon$  = deformación

Este módulo dependerá de la clase de madera, del contenido de humedad, del tipo y naturaleza de las acciones, de la dirección de aplicación de los esfuerzos y de la duración de los mismos. El valor del módulo de elasticidad E en el sentido transversal a las fibras será de 4 000 a 5 000 kilogramos por centímetro cuadrado. El valor del módulo de elasticidad E en el sentido de las fibras será de 80 000 a 180 000 kilogramos sobre centímetro cuadrado.

### **2.3.2. Flexibilidad**

Es la propiedad que tienen algunas maderas de poder ser dobladas o ser curvadas en su sentido longitudinal, sin romperse. Si son elásticas recuperan su forma primitiva cuando cesa la fuerza que las ha deformado.

La madera presenta especial aptitud para sobrepasar su límite de elasticidad por flexión sin que se produzca rotura inmediata, siendo esta una propiedad que la hace útil para la curvatura (muebles, ruedas, cerchas, instrumentos musicales, etcétera).

La madera verde, joven, húmeda o calentada es más flexible que la seca o vieja y tiene mayor límite de deformación. La flexibilidad se facilita calentando la cara interna de la pieza (produciéndose contracción de las fibras interiores) y, humedeciendo con agua la cara externa (produciéndose un alargamiento de las fibras exteriores). La operación debe realizarse lentamente.

### **2.3.3. Dureza**

Es una característica que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Se manifiesta en la dificultad que pone la madera de ser penetrada por otros cuerpos (clavos, tornillos, etcétera), o a ser trabajada (cepillo, sierra, gubia y formón).

La dureza depende de la especie, de la zona del tronco y de la edad. En general suele coincidir que las más duras son las más pesadas. El duramen es más duro que la albura. Las maderas verdes son más blandas que las secas. Las maderas fibrosas son más duras mientras las maderas más ricas en vasos son más blandas y las maderas más duras se pulen mejor.

### **2.3.4. Cortadura**

Es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección del esfuerzo es perpendicular a la dirección de las fibras.

Si la fuerza es máxima en sentido perpendicular a las fibras será cortadura y si es mínima en sentido paralelo a las mismas será desgarramiento o hendibilidad.

### **2.3.5. Hendibilidad**

Es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección de los esfuerzos es paralela a la dirección de las fibras. La madera tiene cierta facilidad para hendirse o separarse en el sentido de las fibras. Una cuña, penetra fácilmente en la madera, al vencer por presión la fuerza de cohesión de las fibras (no las corta). Es fácil observar esta propiedad al cortar madera para hacer leña, en la dirección de las fibras se separa en dos fácilmente. La madera verde es más hendible que la seca.

Cuando se van a realizar uniones de piezas de madera por medio de tornillos o clavos, interesa que la madera que se va a usar tenga una gran resistencia a la hienda.

### **2.3.6. Desgaste**

Las maderas sometidas a un rozamiento o a una erosión, experimentan una pérdida de materia (desgaste). La resistencia al desgaste es importante en las secciones perpendiculares a la dirección de las fibras, menor en las tangenciales y muy pequeña en las radiales.

### **2.3.7. Resistencia al choque**

Indica el comportamiento de la madera al ser sometida a un impacto. La resistencia es mayor, en el sentido axial de las fibras y menor en el transversal o radial.

En la resistencia al choque influyen el tipo de madera, el tamaño de la pieza, la dirección del impacto con relación a la dirección de las fibras, la densidad y la humedad de la madera, entre otros.

### **2.3.8. Resistencia a la tracción**

La madera es un material muy indicado para trabajar a tracción (en la dirección de las fibras), viéndose limitado su uso únicamente por la dificultad de transmitir estos esfuerzos a las piezas. Esto significa que en las piezas sometidas a tracción los problemas aparecerán en las uniones.

Si se realiza un esfuerzo de tracción en la dirección axial, la magnitud de la deformación producida será menor que si el esfuerzo es de compresión, sobre todo en lo que concierne a las deformaciones plásticas. Es decir, que la rotura de la madera por tracción se puede considerar como una rotura frágil.

Los factores que afectan la resistencia a la tracción son:

- **Humedad:** la resistencia a la tracción paralela a la fibra aumenta de forma lineal desde el punto de saturación de las fibras hasta el 10 por ciento, con un aumento del 3 por ciento por cada disminución de humedad del 1 por ciento. Entre el 8 y el 10 por ciento de humedad existe un máximo, a partir del cual disminuye ligeramente.

- Temperatura: el efecto de la temperatura es menor en la tracción paralela, que en otros tipos de esfuerzos.
- Nudos: afectan enormemente frente a este esfuerzo, ya que la desviación de fibras alrededor del nudo tiene gran influencia en la resistencia. Así, pequeños nudos, que reducirían la resistencia a compresión en un 10 por ciento, lo haría en el 50 por ciento en el caso de tracción. Los nudos dan lugar, también, a una distribución irregular de las tensiones.
- Inclinação de la fibra: se puede decir que la resistencia a tracción se ve más afectada que la resistencia a la compresión con igual inclinación de las fibras. Un ángulo de 15 grados reduce la resistencia a la tracción a la mitad y si el ángulo es de 30 grados la resistencia es 1/5 de la que tendría si la dirección del esfuerzo fuese paralela a la fibra.

#### **2.4. Composición elemental de la madera**

La madera está constituida, principalmente por células tubulares orientadas verticalmente (fibras) cementadas por la lámina media. Los componentes químicos se encuentran distribuidos en una red que se entrelaza con esa estructura.

Tabla I. **Composición química de la madera**

<b>Componentes</b>	<b>Conífera (%)</b>	<b>Latifoliadas (%)</b>
Holocelulosa	59,80 – 80,90	71,00 – 89,10
Celulosa	30,10 – 60,70	31,10 – 64,40
Poliosasa	12,50 – 29,10	18,00 – 41,20
Pentosanos	04,58 – 17,50	12,60 – 32,30
Lignina	21,70 – 37,00	14,00 – 34,60
Extractivos (agua caliente)	0,20 – 14,40	0,30 – 11,00
Extractivos (agua fría)	0,50 – 10,60	0,20 – 08,90
Extractivos éter	0,20 – 08,50	0,10 – 07,70
Cenizas	0,02 – 01,10	0,10 – 05,40

Fuente: ESCOBAR TOLEDO, Erickson Roberto. *Caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe pinuscaribaea(morelet) var. hondurensis (barret y golfari)) a nivel laboratorio proveniente de la finca semuc 6, El Estor Izabal.* p. 8.

La composición elemental de muchas especies de madera es aproximadamente la siguiente: carbono: 48-50 por ciento - hidrógeno: 6,0-6,2 por ciento - nitrógeno: 0,1-0,3 por ciento. Pequeñas cantidades de minerales, principalmente calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg)- están presentes en las cenizas de madera. El contenido de cenizas queda entre los límites del 0,2 al 1 por ciento. Algunas maderas exóticas pueden llegar al 8 por ciento y más todavía. Al describir los componentes químicos de la madera, suele distinguirse entre componentes de la pared celular y materia extraña.<sup>1</sup>

Los componentes de la pared celular son la lignina y los polisacáridos totales, constituida por celulosa y hemicelulosa. La materia extraña está constituida por sustancias que pueden separarse por extracción con disolventes

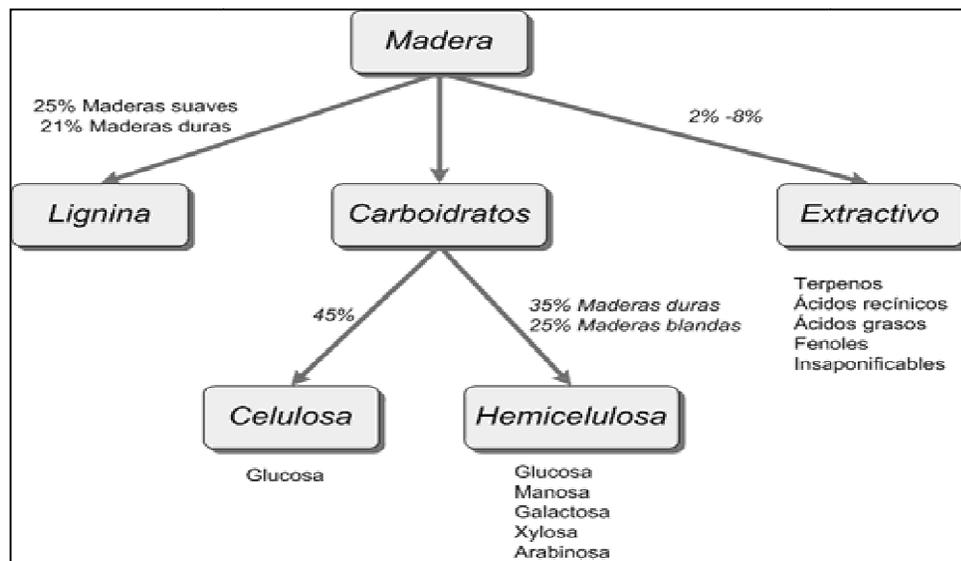
---

<sup>1</sup>ESCOBAR TOLEDO, Erickson Roberto. *Caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe pinuscaribaea(morelet) var. hondurensis (barret y golfari)) a nivel laboratorio, proveniente de la finca semuc 6, El Estor, Izabal.* p. 6.

no reactivos, residuos de proteínas del protoplasma de la célula en crecimiento y componentes minerales, algunos muy difíciles de eliminar.<sup>2</sup>

La madera contiene pequeños tubos que transportan agua desde las raíces a las hojas; estos vasos conductores están dispuestos verticalmente en el tronco y son los que forman su veta. El tronco de un árbol no crece hacia lo alto (excepto en su parte superior), sino a lo ancho y la única sustancia del tronco destinada a su crecimiento es una fina capa situada entre la corteza y la madera, llamada cámbium; a través del cual la savia cruda, produce el tejido fibroso externo, así como la zona interna a través de la cual circula la savia.

Figura 2. Estructura de la madera



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/papel/estructura-madera>. Consulta: febrero de 2011.

<sup>2</sup>ESCOBAR TOLEDO, Erickson Roberto. *Caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe pinuscaribaea(morelet) var. hondurensis (barret y golfari) a nivel laboratorio, proveniente de la finca semuc 6, El Estor, Izabal.* p. 6.

## **2.5. Panel de madera**

El término panel, se ha aceptado como denominación genérica de los tableros y aglomerados de producto derivados de la madera. Estos pueden fabricarse a base de madera en forma de madera maciza, chapas, cintas, partículas, fibras, etcétera. Durante la fabricación se agregan agentes de aglutinación y otras sustancias, con el fin de obtener o aumentar determinadas propiedades del panel, como: flexibilidad, torsión, elasticidad, etcétera. La ligazón o unión depende de las propiedades adhesivas inherentes al material, como en algunos tableros de fibra; también pueden obtenerse mediante un aglutinado orgánico, como en los tableros de partículas.

El término puede comprender también, estructuras compuestas de forma de panel, al que se le agregan elementos plásticos (tales como: fórmica, melamina, etcétera), en una o dos caras del panel y que constituye una pequeña parte del contenido total del mismo.

### **2.5.1. Tableros contrachapados**

Los tableros de gran superficie no pueden ser de una sola pieza, por lo cual se debe recurrir a la composición de varias piezas encoladas; para evitar la interrupción del veteado exterior, se recurre al revestimiento con chapas. Estas también se usan en el revestimiento de muebles finos para que la pieza maciza, que es de madera ordinaria, tenga apariencia de madera noble.

Se entiende por chapas unas láminas delgadas de madera, con un grueso que puede oscilar entre los 0,2 milímetros y los 4 milímetros. Las chapas se pueden clasificar en dos grandes grupos: las destinadas a contra placar, usadas

para la preparación de la madera cruzada y la que se usan para decorar, que se emplean en revestimientos de lujo.

Contrachapar es formar un tablero con diversas chapas encoladas, unas sobre otras, con sus fibras en sentido contrario, tanto sobre una base, como por chapas solas. El desarrollo de los tableros contrachapados ha dado lugar a que se hayan anulado casi por completo los movimientos de la dilatación y contracción, al formarse un tablero con placas de madera en número impar, que se encolan unas a otras, con fibras encontradas a 90 grados. Para ello, las chapas tienen que estar compensadas, de modo que el espesor total de las orientadas en un sentido, sea igual al de las orientadas en sentido contrario; así las fuerzas quedan equilibradas y el tablero no se deforma.

El panel resultante presenta propiedades análogas de contracción y resistencia en dos sentidos perpendiculares entre sí, con los que se elimina virtualmente los grandes cambios dimensionales y los bajos valores de resistencia que se dan a través de la fibra de madera. El número de hojas encoladas tienen que ser 3, 5, 7 o cualquier número impar para que las vetas de las caras exteriores resulten paralelas.

Los tableros contrachapados, comúnmente llamados chapeados constituyen, expresados en volumen, el más importante de todos los productos para paneles a base de madera.

Existe otro tipo de tablero contrachapado con el alma de madera maciza (tablero enlistonado), en el cual el alma está hecha de listones o tablitas de madera de longitud variable, colocadas unas al lado o a continuación de otras.

Los listones son, en general estrechos, pero su anchura puede variar con arreglo a la especie de madera, el método de fabricación, la aplicación fina de que haya de ser objeto y otros factores. Frecuentemente se emplean listones cortos unidos a tope. Pueden ser objeto de encoladura puntiforme o bien encolarse por completo; en algunos casos, el encolado se suprime totalmente y los listones se mantienen juntos por la acción de las contrahojas y de la cola que queda entre ellos al ser expulsada de la superficie de encolado de las contrahojas.

En la actualidad, la técnica del chapeado contribuye en gran medida a las exigencias de la construcción de muebles, puertas y revestimientos en general.

### **2.5.2. Tableros de fibras**

Panel hecho a base de fibra de madera u otros materiales lignocelulosicos y fabricado por interfibrado de las fibras, de modo que formen una esfera a la que luego se le da compacidad haciéndola pasar entre rodillo o en una prensa de platos. Durante el proceso de fabricación puede agregársele aglutinantes u otros materiales para mejorar determinadas características, como las propiedades mecánicas y la resistencia a la humedad, al fuego, la ataque de insectos o a la pudrición.

El tablero de fibras MDF (Medium Density Fiberboard) es un tablero de fibras de madera, unida en seco mediante resinas sintéticas con un prensado en alta frecuencia, con lo cual se obtiene un producto de alta calidad, uniforme, fuerte compacto, estable, liso por ambas caras y con una homogeneidad total en todo su espesor. El MDF tiene unas características excelentes para sustituir, en algunos casos, a la madera natural y eliminar sus inconvenientes (nudos,

grietas, alabeos, tensiones, polillas, etcétera), aunque su peso específico sea algo superior al de los otros tableros.

Este tablero, extraordinariamente resistente a la humedad; no se astilla ni se pudre y posee muy buenas cualidades térmicas, aisladas y de sonido. El tablero de fibras se presenta en varias calidades, siempre con una cara lisa decorada y la otra rugosa en forma de malla. La cara a la vista puede imitar distintos tipos de madera, por medio de un sistema de impresión de veteado. El tablero de fibra lacado en blanco el más empleado de todos los tipos, especialmente en la decoración de interiores, tanto de comercio, como de muebles y muy especialmente en muebles de cocina.

La fabricación del tablero de fibra se inicia con el corte de la madera en tronco o rollo, cuando por sus dimensiones o características, no es apta para el consumo directo. Con una cinta transportadora, el tablero para la astilladora que convierte la madera en astillas reducidas; mediante cibras se va seleccionando y eliminado en agitación los tamaños de astillas que no interesa. A continuación, la astilla adecuada pasa a la desfibradora en donde, mediante vapor a presión la celulosa se reblandece al mismo tiempo que los aceites, resinas y lignina contenidos en la madera y continúan con el proceso hasta la refinadora.

### **2.5.3. Tableros de partículas o aglomerados**

Son paneles formados por virutas o partículas de madera que se colocan por medio de resinas sintéticas termoendurecibles y polimerizadas, mediante presión de altas temperaturas, a través de sofisticadas máquinas que elaboran la materia en procesos de alta automaticidad y con una mínima intervención de la mano de obra.

El tablero aglomerado de madera representa el completo aprovechamiento de la madera. Las resinas han permitido la posibilidad de aglomerar la madera, para lograr que su utilización sea rentable. Fue precisamente el diseño moderno del mobiliario el que, al requerir grandes superficies de madera, motivó la aparición de un tablero industrial, que posteriormente ha sido incorporado en la construcción de puertas y muebles, así como diversas áreas de la industria.

Todas las dificultades que se encuentran en la madera, no existen al trabajar los tableros aglomerados de virutas planas y cortadas, ya que estas se cruzan en todos los sentidos, tanto en la superficie como en toda su estructura.

Por ello, el tablero aglomerado es un material homogéneo que tiene un 90 por ciento de madera y se comporta mecánicamente mejor que maderas constituidas orgánicamente.

#### **2.5.3.1. Cualidades de los aglomerados**

La industria de estos tableros continuamente está sacando al mercado nuevas modalidades y tratamientos, lo que permite tener una diversidad de materia para usos más específicos, en todo caso, su cualidad esencial sigue siendo su estabilidad frente al medio y a las situaciones que sean expuestas.

A continuación se listan las ventajas que ofrece este producto:

- Estabilidad aún mayor que el contrachapado por la disposición multidireccional de sus fibras que permite uniformidad en la dureza en toda la superficie.
- Ausencia de juntas, defectos o deformaciones y encoladuras.

- Resistencia a la humedad por la parcial impermeabilización de sus fibras, ante el fenómeno de filtración.
- Mayor resistencia a los agentes atmosféricos y a los sucesivos cambios de temperatura.
- Grandes dimensiones en planchas que pueden llegar a tener 8 metros de largo por 2 metros de ancho, que es imposible obtener en madera natural con una sola pieza.
- Se puede alcanzar una densidad homogénea media entre 500 y 750 kilogramos por metro cubico.
- No es una materia atacable, como la madera, por agentes bióticos (moho, los insectos xilófagos y los hongos), ya que sus partículas son amorfas y están recubiertas de resina.
- Una cualidad importante en términos prácticos es que las planchas de tablero aglomerado no necesitan apilarse, como sucede con las tablas y listones, ya que estas planchas se podrán poner en contacto unas con otras en una cantidad únicamente limitada por la facilidad de su transporte.

En Guatemala se produce este tipo de tableros de la siguiente manera:

- El proceso de elaboración empieza con la madera; se usan varios tipos de ella, pero principalmente el pino y el ciprés. Los troncos de madera se muelen hasta obtener astillas finas, que se someten a un proceso de

secado. Es importante que las astillas se encuentren con bajo contenido de humedad; de lo contrario no se obtendrá un tablero uniforme.

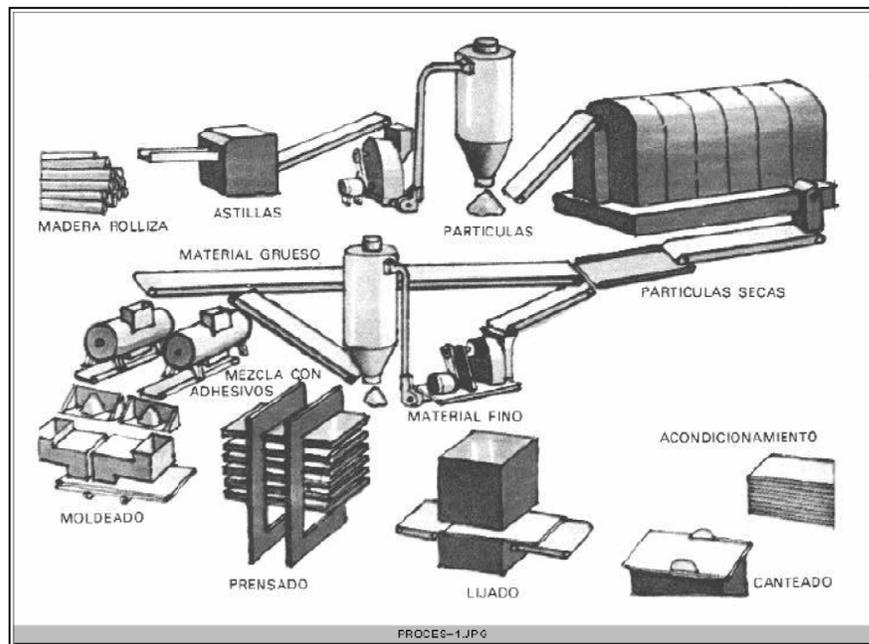
- Luego del secado, las astillas pasan a la encoladora, que es la máquina que las impregna de cola. Las astillas ya encoladas se transportan hacia la estación de formación. En esta etapa, las astillas son depositadas sobre una banda sin fin en forma de colchones. Ya formados, la banda los conduce a la prensa. Esta se encarga de comprimir los colchones, hasta formar el tablero aglomerado.
- El prensado consiste en aplicar una presión (24 kilogramos por centímetro cuadrado) al colchón de astillas (partículas de madera) a una temperatura de 160 Celsius aproximadamente. Es en esta etapa donde entra en función el adhesivo que llevan las astillas. El adhesivo o resina es sensible a la temperatura, de tal manera que durante el prensado alcanza cierta temperatura de activación y retícula, que permite enlazar a las astillas en el colchón. No obstante, aunque se alcance la temperatura de activación, la cola no endurece debidamente si el pH del material es muy alto, o si la humedad de las astillas no es la apropiada. Esta es la etapa más crítica del proceso, ya que se requieren muchos factores para lograr un buen tablero.

Entre los factores que más influyen están:

- Uniformidad del colchón
- Humedad de las astillas
- Tiempo de prensado
- Acidez del medio

Una vez prensado el tablero, se deja enfriar y luego se lleva a la lijadora. La etapa de lijado se encarga de emparejar el tablero, darle el acabado y el grosor requerido. Cuando el tablero ya está uniforme, se transporta a la sierra, donde se le da el tamaño final. En la figura 3, se muestra este proceso de fabricación.

Figura 3. **Proceso de fabricación de tableros aglomerados**



Fuente: CHAN, Mario; MOLINA, Omar. *Tableros de madera de partículas*. p. 45.

#### 2.5.4. Normas y especificaciones

Existe una serie de especificaciones para cada tipo de tablero de madera; por lo que se debe tener sumo cuidado durante el proceso de fabricación de los mismos, ya que del cumplimiento de dichas características depende la calidad de los tableros.

#### **2.5.4.1. Tableros contrachapados**

Se dividen, principalmente en tres clases según la calidad y cualidades de las caras exteriores. Las cuales se detallan a continuación:

- Calidad A: las caras exteriores del tablero contrachapado se muestran limpias, sin ningún defecto, es decir, sin nudos, sin juntas defectuosas, grietas o cualquier anomalía que interrumpa el veteado parejo y homogéneo.
- Calidad B: en las caras exteriores del tablero contrachapado, se pueden admitir que tenga pequeños defectos como algunos nudos pequeños y firmes y en las chapas interiores puede haber grietas sin importancia.
- Calidad C: en estos tableros, las caras exteriores tienen defectos más o menos visibles, irregularidades y ondulaciones en el interior y algunos nudos grandes vivos y muertos. Los tableros de esta categoría tienen casi siempre dos caras pulidas.

#### **2.5.4.2. Tableros de fibras**

Este producto tiene características adecuadas para su manipulación, que en muchos casos puede sustituir a la madera natural, ya que carece de nudos, grietas, alabeos, tensiones, ataques de insectos o parásitos. A continuación se detallan algunas de las características físico – mecánicas de este tipo de tablero.

### **2.5.4.3. Tableros aglomerados**

En el país debido a sus características y ventajas, se ha utilizado aglomerados de fabricación nacional o importada, principalmente de Colombia y México, el cual lleva un estricto control de normas y especificaciones a nivel internacional. En un tablero fabricado de partículas de madera aglomeradas con un polímero de condensación (urea – formaldehído).

El aglomerado ofrece las siguientes características, que lo hace un material ideal para la construcción de muebles y estructuras internas.

- Uniformidad de propiedades mecánicas
- Superficies perfectamente lisas y homogéneas idóneas
- Facilidad de manejo

La relación que existe entre las propiedades físico-mecánicas del tablero aglomerado con proceso normalmente utilizados para la fabricación de muebles, puertas y estructuras internas son las siguientes:

Densidad: es la propiedad física que describe la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Para describir la densidad del tablero aglomerado se usan las unidades de kilogramos por metro cúbico.

La densidad del aglomerado tiene una influencia directa sobre las propiedades mecánicas de un tablero, si la densidad baja de un cierto nivel, se estaría fabricando un tablero demasiado débil y si excede de cierto valor se estaría fabricando un tablero demasiado pesado, difícil de manipular, cortar y barrenar, además de hacerlo demasiado costoso.

El tablero nacional está clasificado dentro de los aglomerados de mediana densidad; estos van de 580 a 800 kilogramos por metro cúbico, las otras clasificaciones son baja densidad (menos de 580 kilogramos por metro cúbico) y alta densidad (mayor de 800 kilogramos por metro cúbico). En el mercado centroamericano, por lo general existe sólo el tablero de mediana densidad, que se utiliza en la fabricación de muebles.

Contenido de humedad: el contenido de humedad de un tablero aglomerado es una propiedad física difícil de especificar con exactitud debido a que este cambia con la humedad relativa en el ambiente en que se encuentre. Cuando aumenta la humedad relativa del ambiente, el contenido de humedad el tablero aumenta y lo opuesto sucede cuando la humedad relativa disminuye.

El aglomerado producido es despachado con un contenido de humedad que oscila entre el 7 por ciento y el 12 por ciento según la época del año. Si este es almacenado en una bodega húmeda con poca ventilación, su contenido de humedad podría llegar hasta un 20 por ciento, lo cual reduciría significativamente las propiedades mecánicas del tablero (por ejemplo, resistencia al arranque de tornillo) y dificultaría la ejecución de ciertos procesos (por ejemplo, el laminado del tablero con formica).

## **2.6. Uso de adhesivos en la madera**

El adhesivo o enlace de madera es una actividad que se ha practicado por muchos siglos. Se estima que el 70 por ciento de los productos en la práctica industrial es madera enlazada. Los adhesivos están diseñados para aplicaciones específicas, relacionados a miles de productos.

Los más comunes son aquellos adhesivos utilizados en la fabricación de composites o los que se utilizan en el ensamblaje de productos. El mercado más grande de producción de madera es el de los paneles, incluyendo las maderas flexibles, placas de filamentos orientados (OSB), placas de fibras y de partículas. Los adhesivos representan del 2 al 8 por ciento en comparación del peso total de los productos terminados.

### **2.6.1. Adherencia de la madera**

La adherencia es el esfuerzo de la capa molecular del adhesivo que entra en contacto con la capa superficial de los sustratos, tales como la madera. En general, la madera es fácil de adherir en comparación con la mayoría de sustratos.

Las superficies (en la madera), no son atraídas uniformemente en un contacto tan cercano, requiriendo del adhesivo para mantener a las superficies unidas. Tanto para maderas laminadas como para uniones al beso, los adhesivos pueden ser curados por calor o bien a temperatura ambiente. En la construcción y la fabricación de mobiliario, los adhesivos utilizados poseen tiempos de secado muy largos y usualmente se realizan a temperatura ambiente.

### **2.6.2. Tipos de adhesivos o colas**

Las colas se pueden clasificar de distintas maneras. El criterio más corriente es su capacidad de soportar las condiciones ambientales. En este caso, se distingue, principalmente cola para interiores y colas para la intemperie. Esta división se utiliza de manera general en la tecnología.

También se clasifican corrientemente las colas según su origen, en este caso los dos grupos principales son las colas naturales y las plásticas.

Las naturales se dividen además en los subproductos:

- Vegetales
- Proteínicas

Las colas plásticas pueden dividirse en tres subgrupos:

- Termoestables
- Colas termoplásticas
- Elastómeras

Dentro de esos grupos principales, la clasificación puede seguir con mayor detalle. A continuación figuran las características principales de esta clasificación detallada.

#### **2.6.2.1. Colas naturales**

Aunque este antiguo tipo de colas haya perdido importancia en el curso de los últimos años, ciertas colas naturales siguen siendo importantes, tanto solas como en combinación con colas plásticas. No hay razón alguna para suponer que vayan a dejar de emplearse por completo las colas naturales, ya que en la actualidad, la industria en general, busca el cuidado del ambiente y del máximo aprovechamiento de los recursos naturales.

### **2.6.2.2. Colas vegetales**

Este grupo comprende colas constituidas por hidratos de carbono macromoleculares, colas formadas con proteínas vegetales y colas hidrosolubles que contienen lignina. Se utilizan para aplicaciones sencillas en las que se han de satisfacer exigencias como estas. Como materia prima para las colas de almidón se pueden utilizar papas, trigo arroz, maíz, entre otras. También es digno de mención el almidón de tapioca que se obtiene a partir de las raíces de mandioca.

### **2.6.2.3. Colas de dextrinas**

Este grupo está muy relacionado con lo anterior. Las dextrinas se tienen por hidrólisis del almidón. Se aplican al encolado del papel cuando conviene evitar elevado contenido de humedad típico de las colas de almidón. En muchos casos, la cola de acetato de polivinilo ha sustituido a la cola de dextrina.

### **2.6.2.4. Colas celulósicas**

Hay dos tipos principales: éteres de celulosa (metilcelulosa) y colatos de celulosa (carboximetilcelusosa – CMC). Ambas se fabrican a partir de la celulosa sódica. Su principal campo de aplicación es el engrudo para empapelar, así también, en madera, cuero, metales y casi todos los demás materiales.

#### **2.6.2.5. Colas de hidratos de carbono**

La goma arábica, que es la más importante de este grupo, es utilizada ampliamente en la industria del correo postal, para realizar sellos de correos y sobres, aunque tienen pobre resistencia al agua y cohesividad.

#### **2.6.2.6. Colas proteínicas (aglutina)**

Las colas de este grupo suelen fabricarse a partir de residuos animales (residuos de pieles, cueros, huesos, pescado). La proteína (colágeno) contenida en dichos residuos se transforma por hidrólisis. Se disuelve bien en agua caliente y se convierte fácilmente en gel.

#### **2.6.2.7. Colas de caseína**

También estos adhesivos se utilizan desde hace mucho tiempo, la caseína es una proteína precipitada del suero de la leche mediante enzimas o ácidos. Este último tipo es la materia prima para las colas. La caseína se disuelve en una solución alcalina. La base que suele usarse para ello es el hidróxido de calcio.

#### **2.6.2.8. Colas de albúmina**

La albúmina es un elemento de la sangre. La cola a base de albúmina se utilizaba antiguamente en la industria de la madera terciada, pero ahora solo se encuentra en combinaciones con determinados compuestos como el fenol.

### **2.6.2.9. Colas de soja**

Algunas semillas de plantas oleaginosas dan un residuo de extracción que contiene proteína y puede utilizarse para fabricar colas. Las más conocidas son la soja y la cola de esta, se utiliza mucho en el Japón y en otros países.

### **2.6.2.10. Colas plásticas**

Este es el principal grupo de colas debido a sus buenas propiedades como la resistencia al agua, incluso en ebullición, resistencia a los productos químicos y a los microorganismos, rapidez de fraguado, entre otros.

Las colas plásticas utilizadas para encolar madera pueden dividirse en resinas termoestables que son irreversibles y solo se pueden utilizar una vez; y resinas termoplásticas que son reversibles y pueden utilizarse muchas veces. Esta es una división física. Desde el punto de vista químico, la división es la siguiente: policondensados, polímeros y poliaditivos.

### **2.6.2.11. Policondensados**

Cuando los monómeros para plásticos se combinan y forman polímeros, se separa una pequeña molécula del punto de unión de las moléculas adyacentes; normalmente se trata de agua (policondensación).

En la fabricación de colas, la reacción se interrumpe a la mitad. Al encolar, la reacción prosigue y se forma un grupo de macromoléculas irreversible y endurecido, que es la unión encolada. El grupo policondensado comprende cuatro importantes plásticos para cola básicos, que tienen en común una

reacción con el formaldehído. Se trata de dos resinas fenólicas (fenol-formaldehído y resorcina) y dos resinas amínicas (urea y melanina).

Las colas fenólicas pueden aplicarse en frío, pero su grado elevado de acidez (pH vecino 1,0) limita esta aplicación, por lo que su aplicación principal es el encolado en caliente.

La resorcina guarda estrecha relación con el fenol. También se obtiene a partir del benceno, que se ha impregnado con ácido sulfúrico. Como la resorcina se combina muy fácilmente con el formaldehído, hay que tomar ciertas precauciones. En muchos aspectos, la cola de resorcina es similar a la del fenol; con ella se obtienen uniones que fraguan a temperatura ambiente.

La urea es un compuesto amínico, se obtiene fácilmente a partir de anhídrido carbónico y amoníaco, de manera que su precio es relativamente bajo. La urea, como la resorcina, se combina con el formaldehído para construir una resina termoestable. La resina de urea son sustancias blancas, cristalinas y solubles en agua. También la melanina es un compuesto amínico. Se fabrica a partir de piedra caliza, carbón y nitrógeno en un proceso de etapas múltiples; su costo, por lo tanto es elevado.

La melanina, también es un polvo incoloro cristalino. Las uniones de melanina son incoloras, fuertes, elásticas y resistentes al agua.

#### **2.6.2.12. Polímeros**

En el proceso de polimerización no se elimina nada de entre las moléculas de monómero, como ocurre en el policondensado. La cola más importante de

este grupo es el acetato de polivinilo (PVAc) que pertenece a la categoría de los plásticos vinílicos. La polimerización del PVAc es fácil y su precio es bajo.

Al encolar madera, se utiliza el agua como disolvente. Otros polímeros que pueden utilizarse como colas son:

- Colas poliacrílicas: materiales solubles en agua, adecuada para colas pastosas.
- Colas de polietileno: se pueden utilizar en la industria de la madera como elementos de colas fusibles.
- Poliisobutileno: cucho de butileno.
- Colas depoliestireno (caucho Buna S): ambos productos dan una unión muy firme y resistente.

## **2.7. Información general del palo blanco**

- Nombre científico: *Calycophyllum multiflorum*
- Distribución: se puede encontrar en los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Quetzaltenango, Petén, Alta Verapaz e Izabal.

### 2.7.1. Taxonomía de la planta

- Reino: *Plantae*
- División: *Magnoliophyta*
- Clase: *Magnoliopsida*
- Subclase: *Asteridae*
- Orden: *Schophulariales*
- Familia: *Bignoniaceae*
- Género: *Cybistax*
- Especie: *Cybistaxdonell-smithii (Rose) Seibert*
- Nombre común: palo blanco
- Nombre científico: *Cybistaxdonell-smithii (Rose) Seibert.*

### 2.7.2. Descripción botánica

- Dimensión: la altura del palo blanco oscila entre 20 a 35 metros de diámetro y entre 30 a 50 centímetros, que excepcionalmente puede llegar hasta 70 centímetros.
- Corteza: gris blanquecina, con grietas longitudinales profundas.
- Hojas: compuestas, opuestas, con cinco pequeñas hojuelas.
- Frutos: cápsula cilíndrica rugosa de color verde-amarillento cuando está madura.
- Fuste: cilíndrico, recto y ligeramente acanalado.

- Semilla: numerosas, castañas, oblongo-comprimidas, de 1,5 - 2 milímetros de largo por menos de 1 milímetros de ancho, acompañadas en cada extremo (apical y basal) de una ala membranácea de 0,5-1 milímetros de largo, agudas en el ápice.

### **2.7.3. Ecología de la planta**

La ecología de las plantas estudia las relaciones recíprocas entre sus necesidades vitales, debidas a la herencia y las condiciones externas que actúan sobre las plantas en el ámbito de su espacio vital.

#### **2.7.3.1. Requerimientos ambientales**

- Elevación mínima: 300 metros sobre el nivel del mar
- Elevación máxima: 800 metros sobre el nivel del mar
- Precipitación mínima: 1 200 milímetros
- Precipitación máxima: 4 000 milímetros
- Temperatura mínima: 21 Celsius
- Temperatura máxima: 35 Celsius

#### **2.7.3.2. Fenología**

- Inicio época floración: marzo
- Final época floración: mayo

#### **2.7.3.3. Características de la madera de palo blanco**

- Color del duramen: blanco grisáceo
- Grano: recto, cruzado o en ondas

- Color albura: blanco grisáceo
- Textura: fina
- Brillo o lustre: veteadado suave
- Olor: ausente
- Densidad: 0,64 gramos por centímetro cúbico

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Con base en la bibliografía consultada sobre los factores influyentes en el estudio realizado, se determinaron las variables de entrada sujetas a modificaciones para la medición de su efecto en los resultados obtenidos:

Tabla II. **Definición operacional de las variables, para la elaboración de tableros de partículas de la madera de palo blanco**

No	Variable	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
		Constante	Variable	Controlable	Ruido
<b>Elaboración de aglomerados</b>					
1	Acetato de polivinilo (PVAc)		X		
2	Barniz poliuretano		X		
3	Resina de pino oocarpa		X		
4	Porcentaje de madera		X		
<b>Análisis del ambiente externo</b>					
5	Temperatura ambiente				X
6	Presión atmosférica				X
7	Humedad				X

Fuente: elaboración propia.

### **3.1.1. Variables independientes**

- Porcentaje o proporción de madera a utilizar para la elaboración de los aglomerados.
- Tipo de aglomerante o adhesivo a utilizar para la elaboración de los aglomerados.

### **3.1.2. Variables dependientes**

- Porcentaje de humedad: la cantidad de agua contenida en el material.
- Peso específico: masa del material por unidad de volumen.
- Absorción en agua: se evaluó la cantidad de agua que absorbe el aglomerado a 2 horas de inversión en la misma.
- Variación de espesor: se determinó la cantidad de hinchamiento en el espesor del aglomerado a las 2 horas de inmersión.
- Resistencia a flexión: se determinó el esfuerzo máximo que resiste el material sometido a flexión.
- Resistencia a tensión: se determinó la carga máxima que soportan los tableros antes de romperse.

### **3.2. Delimitación de campo de estudio**

- **Industria:** tecnología de la madera.
- **Proceso:** elaboración de aglomerados con subproductos del aserrío de palo blanco.
- **Etapas:** del proceso: determinación de propiedades físicas y propiedades mecánicas mediante ensayos de laboratorio.
- **Ubicación:** en la comunidad de Nuevo México, San Vicente Pacaya, Escuintla, se obtuvo la materia prima. La elaboración de aglomerados se realizó en el taller de carpintería del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- **Clima:** semicálido entre los (19 y 24 Celsius) en la ciudad capital y cálido (24-32 Celsius) en el departamento de Escuintla.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- **Investigadora:** Br. Silda Verónica González Gudiel
- **Asesora:** Inga. Telma Maricela Cano Morales
- **Asesor:** Ing. Mario José Mérida Meré

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

En el trabajo de graduación presentado se realizó el proceso de fabricación de aglomerados con aserrío de madera de palo blanco, en el taller de carpintería de la sección de Tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, USAC.

Las propiedades de la materia prima a utilizar fueron determinadas en el Laboratorio de Investigación de Extractos Naturales (LIEEXVE). Se determinaron también, las propiedades físicas y mecánicas de los aglomerados realizados en el Laboratorio de la Sección de Metales y Productos Manufacturados del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **3.4.1. Materia prima, reactiva y material**

- Aserrío obtenido de la corteza y aserrín de la madera de palo blanco (*Cyristaxdonell-smithii* (Rose) Seibert).
- Barniz poliuretano.
- Acetato de polivinilo (cola blanca).
- Colofonia de pino oocarpa.
- Agua desmineralizada, marca Salvavidas.
- Aguarrás (Trementina).
- *Wipe*.

#### **3.4.2. Cristalería**

- Probetas de 1 000 mililitros
- Probetas de 500 mililitros
- Probetas de 100 mililitros

- Varillas de agitación
- Beakers de 500 y 1 000 mililitros
- Recipiente con capacidad de 7 litros

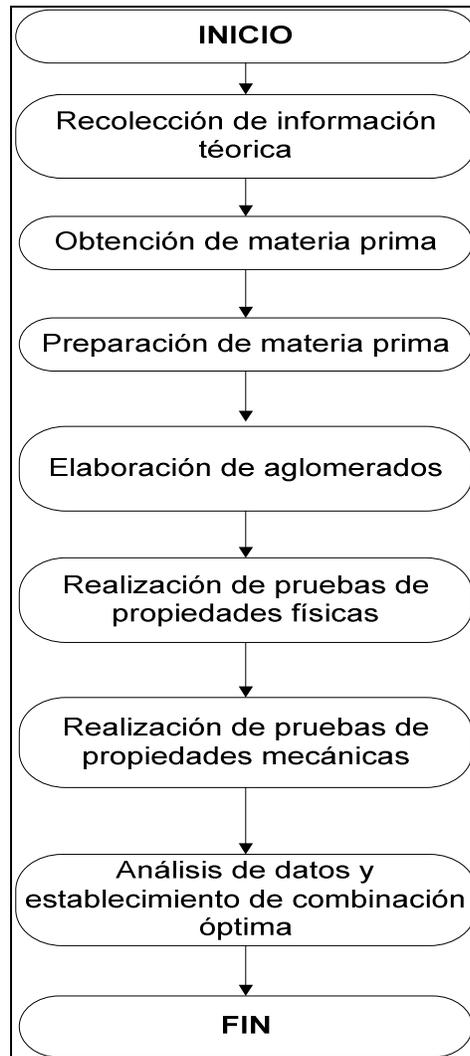
### **3.4.3. Equipo**

- Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 gramos
- Cartón
- Horno de convección natural Precisión
- Marco de carga Forney
- Medidor de humedad
- Molde de hierro angular
- Plancha de calentamiento con agitación, marca Corning
- Plástico antiadherente
- Recipiente plástico
- Rejillas de metal
- Secador
- Tablas de madera
- Tamices
- Termómetro de 0 a 100 Celsius
- Vernier

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

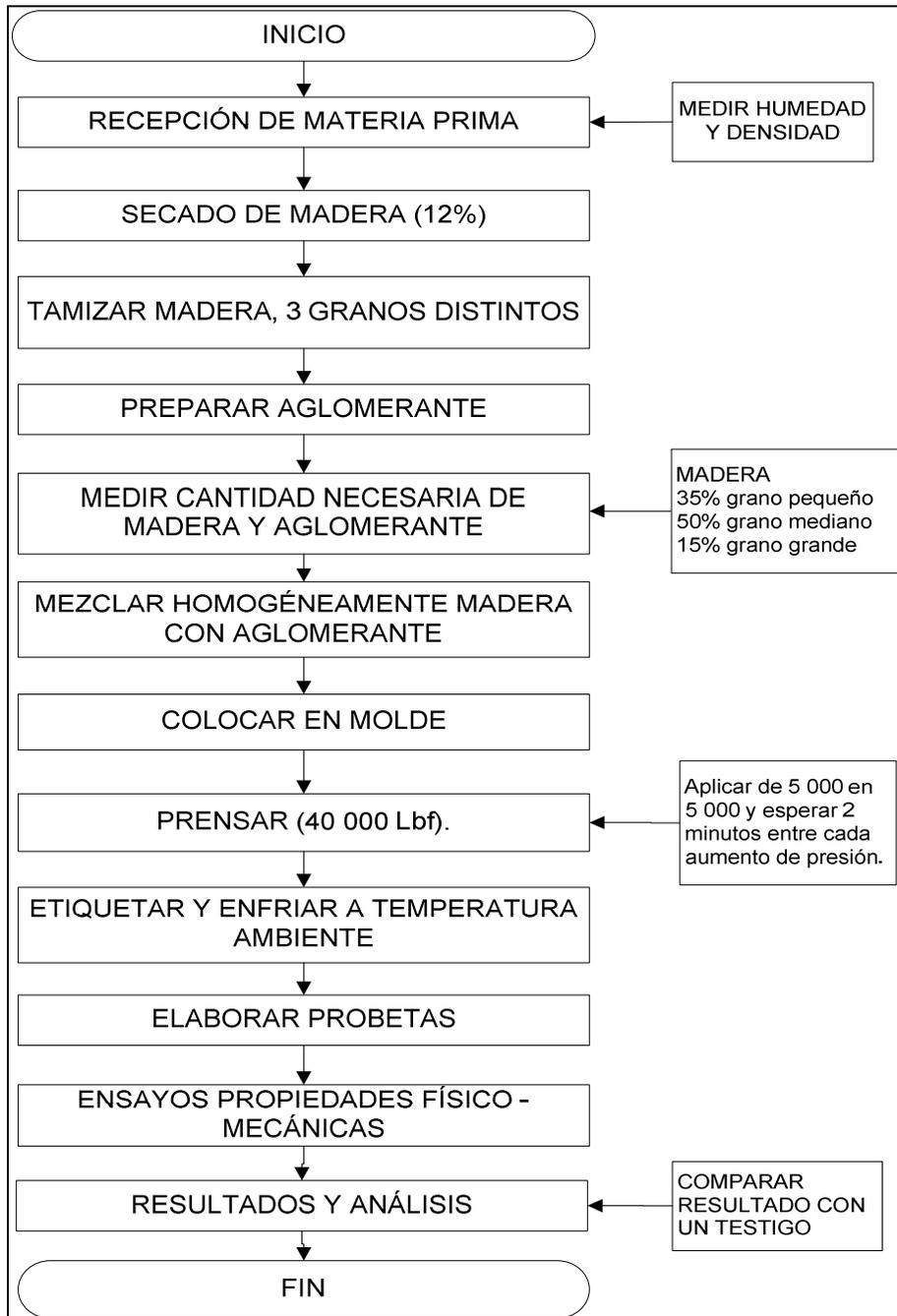
El procedimiento del diseño general utilizado para realizar la presente investigación es representado a través de un diagrama de bloques; así también, el procedimiento experimental detallado del proceso de elaboración de aglomerados de madera.

Figura 4. Diagrama de bloques del diseño general de la investigación



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Diagrama de bloques del proceso de elaboración de aglomerados**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5.1. Elaboración de aglomerados**

La elaboración de tableros de partículas se trabajó con tres distintas proporciones de madera-aglomerante y tres distintos aglomerantes. Utilizando como tamaño de tablero, el tamaño estándar de 1 pie cuadrado. Se trabajó con contenido de humedad de madera no mayor al 12 por ciento.

La densidad de la madera utilizada fue determinada previamente a través de una balanza y una probeta, los datos obtenidos son:

- Grano: densidad aparente
- Grano fino : 0,042 gramo sobre centímetro cúbico
- Grano mediano: 0,057 gramo sobre centímetro cúbico
- Grano grande: 0,120 gramo sobre centímetro cúbico

### **3.5.2. Determinación de propiedades físico-mecánicas de los aglomerados**

Se realizaron los ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas más relevantes de los tableros de partículas elaborados. Dichos ensayos se realizaron de acuerdo con las especificaciones de la Norma UNE 56709 – 56712 y la Norma ASTM 1037-96a.

#### **3.5.2.1. Propiedades físicas**

Las propiedades físicas que se determinaron en los aglomerados de partículas incluidas en el estudio realizado, siguieron las indicaciones de las Normas Españolas (UNE) siguientes:

- Contenido de humedad (UNE 56710)
- Peso específico o Densidad (UNE 56709)
- Absorción de agua (UNE 56713)
- Variación del espesor (UNE 56713)

### **3.5.2.2. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas que se determinaron a los tableros de partículas incluidos en el estudio, siguieron las indicaciones de la Norma Española (UNE) y la Norma ASTM siguientes:

- Tensión paralela a la superficie (ASTM D 1037-96a)
- Resistencia a flexión (UNE 56711)

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Los aglomerados se realizaron con tres distintos porcentajes de madera-aglomerante, así también, se realizaron aglomerados variando el aglomerante, dando como resultado la elaboración de diez (10) aglomerados diferentes a los cuales se les determinaron las propiedades físicas y mecánicas con tres (3) observaciones por cada una de ellas, para tener un total de 30 tratamientos.

Tabla III. **Diseño experimental de la elaboración de aglomerados de los subproductos del aserrío de la madera de palo blanco**

<b>No. de aglomerado</b>	<b>Aglomerante</b>	<b>Porcentaje de madera</b>
1	A	88%
2	B	85%
3	C	82%
4	A	91%
5	B	88%
6	C	85%
7	D	82%
8	A	91%
9	B	88%
10	C	85%

Fuente: elaboración propia.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

El contenido de la presente investigación requiere de varios procedimientos, los cuales se describen detalladamente a continuación; desde la elaboración de los tableros de partículas hasta la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los mismos.

#### **3.7.1. Elaboración de aglomerados**

Para la elaboración de los aglomerados de madera, se debe realizar el siguiente procedimiento:

- a. Preparar y clasificar la materia prima.

- b. Secar la madera hasta un contenido de humedad mínimo del 12 por ciento.
- c. Clasificar la madera, mediante un tamizado, con el objeto de obtener tres tamaños de granos diferentes.
- d. Medir la densidad de cada uno de los granos.
- e. Luego se almacenaron las partículas de madera según su tamaño en bolsas plásticas herméticas, para evitar absorción de humedad. Cada una de estas son etiquetadas de manera que informen el peso, densidad y el contenido de humedad.
- f. Medir la cantidad de madera y aglomerante requeridos para la elaboración del tablero según corresponda.
- g. Colocar la madera en la mezcladora, previa dosificación, de acuerdo con la condición a fabricar.
- h. Agregar el aglomerante dentro de la encoladora.
- i. Mezclar hasta lograr una consistencia homogénea y se vertió en el molde.
- j. Colocar las placas en ambas caras.
- k. Introducir el tablero a prensa, y aplicar 40 000 libras fuerza.

Nota: el prensado se realizó paulatinamente, aplicando la presión en un rango de 5 000 libras fuerza hasta llegar a las 40 000 y esperando 2 minutos entre cada aumento de presión; esto con el objetivo de dar tiempo para que las partículas se acomoden al aplicarles presión.

- l. Luego del prensado sacar el tablero de la prensa, almacenarlos unos sobre otros y dejarlos enfriar durante varios días a temperatura ambiente.
- m. Recortar con sierra para las dimensiones deseadas y lijó para dar el grosor final.
- n. Por último, se elaboran las probetas para ensayos físicos y mecánicos.

### **3.7.2. Medición de densidad aparente de la madera**

Para la medición de la densidad aparente de la madera, se debe realizar el siguiente procedimiento:

- a. Tamizar y separar la madera.
- b. Tomar una muestra representativa de cada uno de los granos de madera.
- c. Determinar el volumen a analizar. (ej. 10 mililitros).
- d. Tarar una probeta.
- e. Colocar los 10 mililitros de madera en la probeta, dar suaves golpes en la parte de debajo de la probeta, para lograr que las partículas se acomoden.

- f. Medir la masa de la madera.
- g. Calcular la densidad dividiendo la masa obtenida entre el volumen analizado (10 mililitros).
- h. Repetir los pasos donde se determina el volumen a analizar y el cálculo de la densidad de la madera.

### **3.7.3. Medición de humedad de la madera**

Para realizar la medición de la humedad de la madera, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

- a. Tamizar y separar la madera.
- b. Tomar una muestra representativa de cada uno de los granos de madera.
- c. Colocar 1 gramo de madera en el platillo para pruebas de una balanza de humedad.
- d. Cerrar la balanza y activar el análisis.
- e. Esperar hasta que la balanza de humedad indique que el resultado está listo.
- f. Tomar nota del contenido de humedad, así como la temperatura a la cual se realizó el análisis, datos que indica la balanza de humedad en la pantalla.

- g. Repetir los pasos c al f, al menos tres veces por cada tamaño de grano de madera.

Nota: la muestra analizada fue de 1 000 gramos, debido a que la medición fue realizada a través de la balanza de humedad; la cual tiene como capacidad máxima 1 000 gramos.

#### 3.7.4. Cálculo de materia prima

El cálculo para determinar la materia prima utilizada para un tablero de partículas se realizó a través del volumen total del molde y de la densidad aparente de la madera a trabajar.

$$V_{TOTAL} = Alto * Largo * Ancho \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$V_{TOTAL} = 4 \text{ centímetro} * 30,48 \text{ centímetro} * 30,48 \text{ centímetro}$$

$$V_{TOTAL} = 3\,716,16 \text{ centímetros cúbicos}$$

Para ejemplificar el cálculo se trabajó con un tablero de proporción 70 por ciento madera, distribuida de la siguiente manera:

- 35 por ciento grano fino (partículas menores a 1,6 milímetros).
- 50 por ciento grano mediano (partículas entre 1,6 milímetros y 4,74 milímetros).
- 15 por ciento grano grande (partículas entre 4,74 milímetros y 5,64 milímetros).

$$\text{Volumen de madera} = 3\,716,16 \text{ centímetros cúbicos} * 0,70$$

$$\text{Volumen de madera} \cong 2\,601 \text{ centímetros cúbicos}$$

Volumen grano fino = 911 centímetros cúbicos  
Volumen grano mediano = 1 300 centímetros cúbicos  
Volumen grano grande = 390 centímetros cúbicos

Conociendo su respectiva densidad se obtiene:

$$masa_1 = 911 \text{ centímetros cúbicos} * \frac{0,042 \text{ gramos}}{\text{centímetros cúbicos}} = 38,26 \text{ gramos}$$

$$masa_2 = 1\,300 \text{ centímetros cúbicos} * \frac{0,057 \text{ gramos}}{\text{centímetros cúbicos}} = 74,10 \text{ gramos}$$

$$masa_3 = 390 \text{ centímetros cúbicos} * \frac{0,12 \text{ gramo}}{\text{centímetros cúbicos}} = 46,8 \text{ gramos}$$

$$Masa_{TOTAL} = 38,26 \text{ gramos} + 74,10 \text{ gramos} + 46,8 \text{ gramos} = 159,16 \text{ gramos}$$

Para un tablero de 70 por ciento de madera, se requieren 159,16 gramos aproximadamente.

### 3.7.5. Determinación de contenido de humedad a trabajar

Para trabajar los ensayos físicos y mecánicos las probetas se colocaron en un ambiente de 65 por ciento, más menos 2 por ciento de humedad relativa, con el objetivo de que se homogenizaran. Periódicamente se pesaron y se midió la humedad, manteniéndolas en dicho ambiente hasta que dos pesadas consecutivas dieran el mismo resultado con un intervalo mínimo de 6 horas.<sup>3</sup>

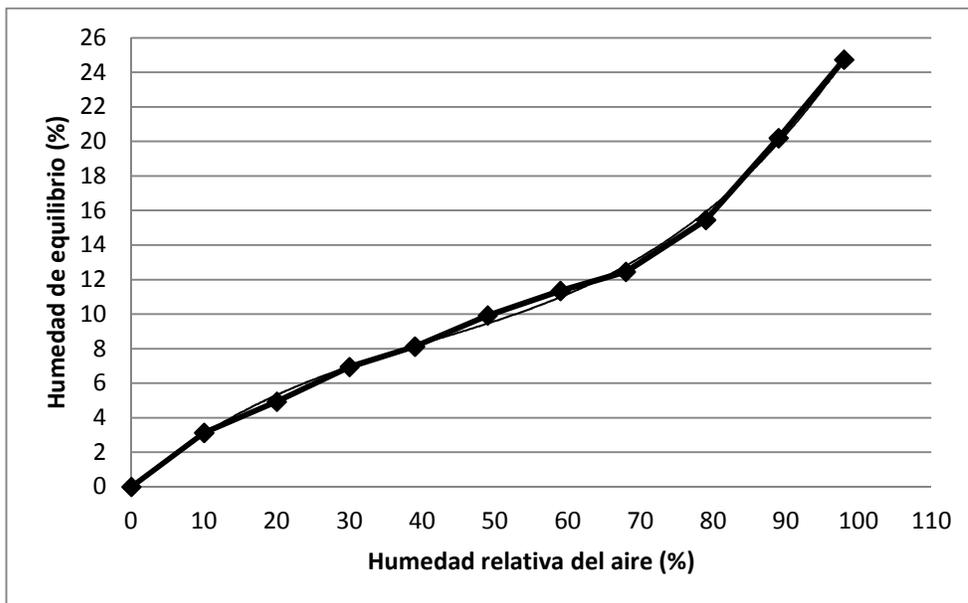
---

<sup>3</sup>FUENTES TALAVERA, Silvia Guzmán. *Comportamiento higroscópico de la madera de Persea Americana Var. Guatemalensis Mil (Hass)*. p. 56.

Para cumplir con la humedad relativa requerida, el tablero debería estar a una humedad de equilibrio la cual se determinará utilizando como referencia los datos de la madera *Persea Americana Var. Guatemalensis Mill (Hass)*, por falta de información de la madera palo blanco *Cyristaxdonell-smithii (rose) seibert*.

El contenido de humedad óptimo es aquel que dé como resultado el modelo matemático al evaluarlo con la humedad relativa requerida (65 por ciento) o bien gráficamente.

Figura 6. **Curva de desorción de la madera *Persea Americana Var. Guatemalensis Mill (Hass)***



Fuente: FUENTES TALAVERA, Silvia Guzmán. *Comportamiento higroscópico de la madera de Persea Americana Var. Guatemalensis Mil (Hass)*. p. 56.

Tabla IV. **Modelo matemático de la curva de desorción de la madera *Persea Americana Var. Guatemalensis* Mill (Hass)**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Rango
	$y = 5E-05x^3 - 0,006x^2 + 0,3716x - 0,1027$	0,9983	[0,100]

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Valores experimentales de humedad de equilibrio de la madera *Persea americana Var. Guatemalensis* Mill (Hass)**

Desorción	
Humedad relativa del aire (%)	Humedad de equilibrio de la madera (%)
98	24,73
89	20,19
79	15,45
68	12,45
59	11,34
49	9,92
39	8,12
30	6,94
20	4,93
10	3,13
0	0,00

Fuente: FUENTES TALAVERA, Silvia Guzmán. *Comportamiento higroscópico de la madera de Persea Americana Var. Guatemalensis Mil (Hass)*. p. 55.

### 3.7.5.1. Método matemático

$$Y = 5E - 05(X)^3 - 0,006(X)^2 + 0,3716(X) - 0,1027 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Sustituyendo el valor de la humedad relativa 65 por ciento.

$$Y = 5E - 05(65)^3 - 0,006(65)^2 + 0,3716(65) - 0,1027 = 12,44 \text{ por ciento}$$

Nota: de igual manera se sustituyó el valor de la humedad relativa  $65 \pm 2$  por ciento, es decir (63, 65 y 67 por ciento).

Tabla VI. **Resultados de humedad de equilibrio en función de la humedad relativa del aire**

Humedad relativa (%)	Humedad de equilibrio (%)
63	11,99
65	12,44
67	12,90

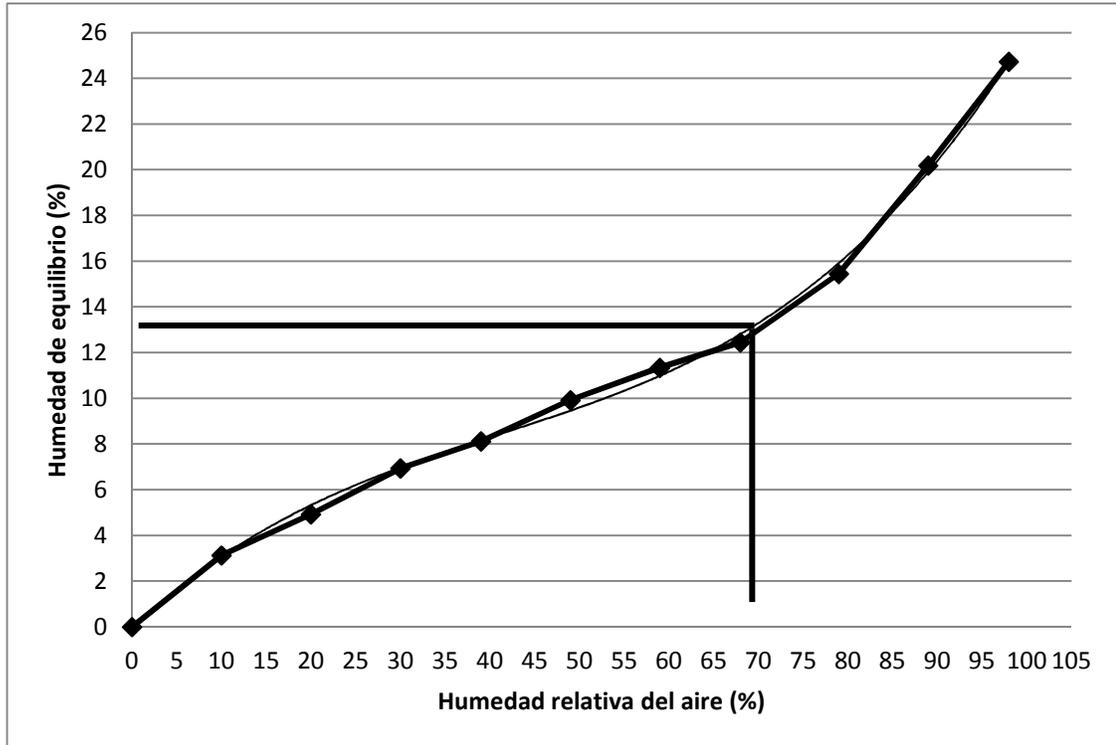
Fuente: elaboración propia.

### 3.7.5.2. Método gráfico

El contenido de humedad a trabajar se puede determinar gráficamente a través de la curva de humedad relativa del aire en función de la humedad de equilibrio de la madera a ensayar.

Para efectos de comparación con el método matemático se utilizaron los mismos datos que la sección anterior.

Figura 7. **Determinación de la humedad de equilibrio de la madera en función de la humedad relativa del aire**



Fuente: elaboración propia.

Resultado según gráfica:

X= 65 %      →      Y= 12 %

Conclusión: los tableros se deben ensayar cuando las probetas tengan un contenido de humedad de equilibrio del 12,4 por ciento.

### **3.7.6. Humedad (UNE 56710)**

Método de secado en estufa: este método es aplicable a maderas con cualquier contenido de humedad. Sirve para determinar el contenido de humedad de lotes de piezas de madera y de probetas destinadas a ensayos de laboratorio. El método de secado en estufa no es conveniente para maderas con gran cantidad de sustancias volátiles y para maderas impregnadas con productos químicos, sean estos volátiles o no, por lo que se recomienda usar el método de destilación.

- Principios: determinación por pesada de la pérdida de masa de la probeta cuando se seca hasta masa constante y cálculo de la pérdida de masa en porcentaje de la masa de la probeta después del secado.
- Aparatos: balanza, con una precisión de  $\pm 0,05$  por ciento del peso de la probeta; estufa, con circulación de aire, regulable a  $103 \pm 2$  Celsius.
- Obtención de las probetas: el ensayo se realizará con probetas de forma y medidas cualesquiera, con una superficie mínima de 25 centímetros cuadrados.
- Procedimiento: pesar la probeta con una precisión de 0,5 por ciento de su masa. Secar hasta masa constante en la estufa a una temperatura de  $103 \pm 2$  Celsius. Luego se saca definitivamente de la estufa y se deja enfriar a una atmósfera anhidra. A continuación se pesa rápidamente con la misma precisión que en la pesada inicial.

- Cálculo y expresión de resultados: calcular el contenido de humedad, w, de cada probeta, expresado en porcentaje, con una aproximación de 0,1 por ciento según la fórmula:

$$H\% = \frac{G_1 - G_2}{G_2} * 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde

G1 = es la masa, en gramos, de la probeta antes del secado

G2 = es la masa, en gramos, de la probeta después del secado

Calcular el promedio aritmético de los resultados obtenidos para las probetas individuales e informarlo como el valor promedio del contenido de humedad de las probetas o del lote. Redondear los resultados al entero porcentual más próximo.

### **3.7.7. Determinación de peso específico (UNE 56709)**

- Principios: el peso específico es el cociente del peso de la probeta, expresado en kilogramos fuerza, por el volumen de la misma expresado en metros cúbicos.
- Aparatos
  - Vernier: capaz de determinar las dimensiones de las probetas al 0,1 milímetros.
  - Balanza: capaz de pesar al 0,01 gramos, con precisión  $\pm 0,05$  por ciento.

- Preparación de las probetas: estas deben tener forma de cuadrado de 100 milímetros de lado. Sus bordes serán rectos, limpios y sin protección.
- Procedimiento
  - Pesar la probeta con una aproximación de 0,1 gramos.
  - Medir el espesor, longitud y anchura paralelamente a los lados, en 5 puntos diferentes, obteniéndose la media aritmética de las 5 medidas, que se considerará como grosor efectivo de la probeta.

Con estas medidas se obtiene el volumen de la misma con aproximación de 0,1 metros cúbicos.

- Cálculos y expresión de resultados: el peso específico de la probeta se calcula por la ecuación siguiente:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde

- $\gamma$  = peso específico
- G = peso en gramos
- V = volumen en centímetros cúbicos

- Precisión: expresar los resultados individuales de cada probeta con una aproximación de 5 kilogramos por metro cúbico (o 0,005 gramos por centímetro cúbico). Calcular con una precisión de 10 kilogramos por metro cúbico (o 0,01 gramos por metro cúbico) el promedio aritmético de

los resultados obtenidos en las probetas individuales e informar este valor como el promedio de densidad de las probetas.

### **3.7.8. Variación del espesor y absorción de agua por inmersión (UNE 56713)**

Esta norma tiene por objetivo indicar el modo de realizar el ensayo para determinar la hinchazón y la absorción de agua por inmersión total de los tableros de partículas

- Aparatos
  - Balanza con precisión de  $\pm 0,05$  % del peso de la probeta como mínimo.
  - Instrumento para medida de dimensiones.
  - Recipiente con agua.
  - Dispositivo de calefacción provisto de un termostato.
  
- Obtención de probetas

Las probetas deben tener forma cuadrada de 100 milímetros de lado. Sus bordes serán rectos, limpios y sin protección. Las medidas del tablero se indicarán sobre ellas.

A continuación se pesan con una aproximación de 0,01 por ciento. Se miden al grosor en cuatro puntos diferentes. La media aritmética de las cuatro medidas se considerará como grosor efectivo.

La longitud y la anchura se miden entre dos puntos de cada lado con una precisión de 0,01 milímetros. La media aritmética de cada dos medidas paralelas se considerará como longitud o anchura efectiva de la probeta.

- Procedimiento
  - Se sumergen las probetas verticalmente en el recipiente de forma que estén separadas las unas de las otras y que no toquen ni las paredes ni el fondo.
  - El agua debe estar limpia y en reposo y su temperatura será de  $20 \pm 1$  Celsius. Al principio de cada ensayo se comprobará que el pH del agua es de  $6 \pm 1$ , corrigiéndose en caso contrario.
  - Los bordes superiores deben estar unos 20 milímetros por debajo de la superficie del agua. Se mantienen sumergidas las probetas durante 2 horas, las probetas se hacen girar verticalmente en un eje horizontal al cabo de una hora. La tolerancia en los tiempos es de  $\pm 15$  minutos.

### **3.7.9. Determinación de la resistencia de flexión (UNE 56711)**

- Aparatos

Para realizar el ensayo se necesita un aparato provisto de dos apoyos cilíndricos paralelos, de 80 milímetros de longitud, situados en un plano horizontal cuya distancia sea regulable.

Si las probetas tienen un grosor inferior o igual a 7 milímetros el diámetro de los apoyos debe ser de  $15 \pm 0,5$  milímetros. Si las probetas tienen un grosor superior a 7 milímetros el diámetro de los apoyos debe ser de  $30 \pm 0,5$  milímetros.

Debe llevar también, para aplicar la carga, un cilindro central de altura regulable cuya longitud y diámetro deben ser iguales a los dos apoyos.

- Probetas

Si los tableros tienen un grosor inferior o igual a 7 milímetros se preparan probetas de 75 milímetros de anchura y de una longitud igual a 25 veces el grosor nominal, más de 50 milímetros. Si los tableros tienen un grosor superior a 7 milímetros las probetas serán de 75 milímetros de anchura y de una longitud 15 veces el grosor nominal.

Después de acondicionadas las probetas, se mide el grosor en tres puntos del eje transversal sobre el que se ha de aplicar la carga, uno de ellos situado en el centro y los otros dos a 5 milímetros de los bordes.

- Procedimiento

- Determinación de la resistencia a la flexión: una vez preparadas las probetas, se colocan centradas sobre los apoyos de forma que sus lados cortos sean paralelos a ellos.
- La distancia entre los soportes debe ser 25 o 15 veces el grosor de la probeta, según que este sea inferior o igual a 7 milímetros o superior a esta cifra.

- Se aplica la carga promedio del apoyo central cilíndrico a una velocidad de  $30 \pm 3$  milímetros por minuto de un modo continuado hasta la rotura de la probeta, anotando la carga aplicada en ese momento.
  - La mitad de los ensayos deben hacerse por la cara superior del tablero y la otra mitad por la cara inferior.
  - Determinación del módulo de elasticidad aparente a la flexión: durante la determinación anterior se mide la flecha producida por la carga en el período de deformación elástica.
- Obtención de resultados

La resistencia de flexión se calcula por la fórmula siguiente:

$$B = \frac{3 G \cdot l}{2b \cdot a^2} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde

- B = resistencia a la flexión en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado
- G = carga rotura en kilogramos fuerza con una aproximación de 0,5 %
- L = distancia entre los apoyos en cm con aproximación de  $\pm 0,1$  %
- b = anchura efectiva de la probeta en centímetros
- a = grosor efectivo de la probeta en centímetros

### 3.7.10. Tabla de tabulación de datos

Durante el desarrollo de la investigación, se recabaron datos de la preparación de materia prima, elaboración de aglomerados y determinación de propiedades físicas y mecánicas, las cuales fueron tabuladas de la siguiente manera:

Tabla VII. **Determinación de densidad para el grano fino de madera**

Grano fino			
No. Observación	Volumen (mL)	Masa (g)	Densidad (g/mL)
1	V1	M1	$\rho_1$
2	V2	M2	$\rho_2$
3	V3	M3	$\rho_3$

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Determinación de contenido de humedad de la madera**

No. Observación	Masa (g)	Contenido de humedad (%h)	Temperatura (°C)
1	M1	h1	T1
2	M2	h2	T2
3	M3	h3	T3

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Monitoreo de contenido de humedad del aglomerado y humedad relativa del ambiente**

No. Observación	Hora	Temperatura (°C)	Contenido de humedad tablero (%h)	Humedad relativa (%hr)
1	Hr1	T1	h1	X1
2	Hr2	T2	h2	X2
3	Hr3	T3	h3	X3

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Análisis físico-mecánico de los aglomerados de madera de palo blanco de proporción 82 % - 18 %, con aglomerante de cola blanca**

No.	Humedad	Densidad	Hinchazón	Absorción en agua	Resistencia a flexión	Resistencia a tensión
1	h1	$\rho$ 1	H1	A1	Rf1	Rt1
2	h2	$\rho$ 2	H2	A2	Rf2	Rt2
3	h3	$\rho$ 3	H3	A3	Rf3	Rt3

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Diseño experimental

Para el aprovechamiento de los subproductos del aserrío de la madera de palo blanco, se utilizarán 2 variables las cuales son: el tipo de aglomerante y el porcentaje de madera a utilizar, siendo esta última 82, 85 y 88 por ciento, con tres observaciones para hacer un total de 9 aglomerados o unidades experimentales. Posteriormente, a los 9 aglomerados se les realizarán pruebas que permitan conocer las propiedades físico-mecánicas de los mismos.

El análisis estadístico de los datos obtenidos de las propiedades físico-mecánicas se realizará a través de un análisis de varianza (ANOVA), por medio de un diseño de bloques aleatorio con la distribución de Fisher.

Tabla XI. **Datos típicos para el diseño de bloques al azar**

Tratamientos	Bloques			Promedio
	1	2	3	
1	Y <sub>1,1</sub>	Y <sub>1,2</sub>	Y <sub>1,3</sub>	Y <sub>1prom</sub>
2	Y <sub>2,1</sub>	Y <sub>2,2</sub>	Y <sub>2,3</sub>	Y <sub>2prom</sub>
3	Y <sub>3,1</sub>	Y <sub>3,2</sub>	Y <sub>3,3</sub>	Y <sub>3prom</sub>
4	Y <sub>4,1</sub>	Y <sub>4,2</sub>	Y <sub>4,3</sub>	Y <sub>4prom</sub>
5	Y <sub>5,1</sub>	Y <sub>5,2</sub>	Y <sub>5,3</sub>	Y <sub>5prom</sub>
6	Y <sub>6,1</sub>	Y <sub>6,2</sub>	Y <sub>6,3</sub>	Y <sub>6prom</sub>
7	Y <sub>7,1</sub>	Y <sub>7,2</sub>	Y <sub>7,3</sub>	Y <sub>7prom</sub>
8	Y <sub>8,1</sub>	Y <sub>8,2</sub>	Y <sub>8,3</sub>	Y <sub>8prom</sub>
9	Y <sub>9,1</sub>	Y <sub>9,2</sub>	Y <sub>9,3</sub>	Y <sub>9prom</sub>
<b>Promedio</b>	<b>Y<sub>1prom</sub></b>	<b>Y<sub>2prom</sub></b>	<b>Y<sub>3prom</sub></b>	<b>y</b>

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$Y_{i,j}$  = total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

$y$  = promedio total de las observaciones bajo el i,j-ésimo tratamiento

$Y_{a,b}$  = datos obtenidos para cada observación bajo cada tratamiento

Generalmente, el procedimiento para un diseño de bloque aleatorio consiste en seleccionar b cantidad de bloques y en ejecutar una repetición completa del experimento en cada bloque, con un solo factor con a cantidad de niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$i = 1, 2, \dots, a$$
$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$
$$j = 1, 2, \dots, b$$

Donde:

- $y_{ij}$  = observación  
 $\mu$  = media general  
 $\tau_i$  = efecto del tratamiento  $i$ ésimo  
 $\beta_j$  = efecto del bloque  $j$ ésimo  
 $\epsilon_{ij}$  = error aleatorio

Los efectos de bloque y tratamiento se definen como desviaciones respecto a la media general. Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la tabla XII, así como las fórmulas para el cálculo de la suma de cuadrados.

Tabla XII. **Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo
Tratamientos	$\sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{b} - \frac{y_{..}^2}{ab}$	a-1	$\frac{SS_{\text{tratamientos}}}{a-1}$	$\frac{MS_{\text{tratamientos}}}{MS_E}$
Bloques	$\sum_{j=1}^b \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{y_{..}^2}{ab}$	b-1	$\frac{SS_{\text{bloques}}}{b-1}$	
Error	SS <sub>E</sub> (por sustracción)	(a-1)(b-1)	$\frac{SS_{\text{bloques}}}{(a-1)(b-1)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$	ab-1		

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 446.

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se prueba mediante la razón de Fisher, que se define como:

$$F = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$$

Donde:

MS<sub>tratamientos</sub> = media cuadrática de los tratamientos

MSE = media cuadrática del error

El pH es un valor que representa la concentración de los iones hidrógeno dentro de una solución acuosa, es importante la toma del mismo, debido a que el indicador no trabaja en un pH con extremo básico o ácido. Por razones prácticas se define de manera experimental con un potenciómetro calibrado periódicamente.



## 4. RESULTADOS

Los datos presentados a continuación son los resultados obtenidos a través de la fase experimental empleada para la elaboración de tableros de partículas, la cual se detalla en el capítulo anterior. Así también se presenta el valor de la desviación estándar de los mismos.

Tabla XIII. **Diseño experimental de la elaboración de tableros de partículas realizados**

No. aglomerado	Aglomerante	Porcentaje de madera (%)	Porcentaje de aglomerante (%)
1	Acetato de polivinilo	88	12
2	Acetato de polivinilo	85	15
3	Acetato de polivinilo	82	18
4	Barniz poliuretano	91	9
5	Barniz poliuretano	88	12
6	Barniz poliuretano	85	15
7	Barniz poliuretano	82	18
8	Colofonia	91	9
9	Colofonia	88	12
10	Colofonia	85	15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de cola blanca (PVAc)**

Tablero	% humedad (%h)		Densidad ( $\rho$ Kg/m <sup>3</sup> )		% Absorción (% A)		% Hinchazón (% s)		Esfuerzo tensión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo flexión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	
	$\bar{h}$	$\pm \sigma$	$\bar{\rho}$	$\pm \sigma$	$\bar{A}$	$\pm \sigma$	$\bar{s}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$
12CB	10,85	0,21	485,36	18,52	51,7	6,79	9,92	1,07	12,5	1,73	25,09	0,76
15CB	9,98	0,72	524,83	20,80	72,64	17,18	10,29	3,32	15,57	1,33	26,4	4,44
18CB	9,57	0,13	536,03	37,16	NPS	NPS	NPS	NPS	15,67	0,53	28,68	2,65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de poliuretano**

Tablero	% humedad (%h)		Densidad ( $\rho$ Kg/m <sup>3</sup> )		% Absorción (% A)		% Hinchazón (% s)		Esfuerzo tensión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo flexión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	
	$\bar{h}$	$\pm \sigma$	$\bar{\rho}$	$\pm \sigma$	$\bar{A}$	$\pm \sigma$	$\bar{s}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$
9P	6,34	0,08	552,76	59,76	71,28	0,90	14,70	1,50	6,35	1,58	10,70	0,59
12P	8,46	4,61	571,02	16,63	62,07	7,04	15,86	5,42	19,11	1,83	28,00	3,36
15P	8,83	0,12	672,31	36,03	34,76	3,75	19,04	2,26	32,25	1,80	52,25	9,23
18P	9,68	0,10	683,18	24,19	30,92	11,75	20,10	1,66	35,07	0,60	59,65	4,45

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resumen de propiedades físico-mecánicas de los tableros de colofonia**

Tablero	% humedad (%h)		Densidad ( $\rho$ Kg/m <sup>3</sup> )		% Absorción (% A)		% Hinchazón (% s)		Esfuerzo tensión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo flexión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	
	$\bar{h}$	$\pm \sigma$	$\bar{\rho}$	$\pm \sigma$	$\bar{A}$	$\pm \sigma$	$\bar{s}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$
9C	9,56	0,14	401,62	31,86	103,60	16,86	8,15	1,22	2,65	1,27	3,88	0,71
12C	8,75	0,06	416,26	15,17	95,58	3,20	8,08	11,43	4,10	1,86	10,62	1,62
15C	8,75	0,20	471,93	28,91	80,39	21,53	7,91	2,28	5,81	1,75	13,65	0,99

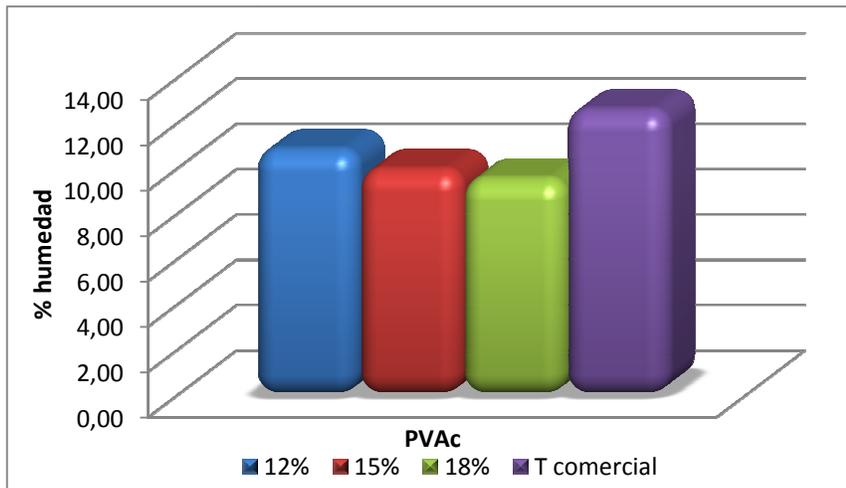
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resumen de propiedades físico-mecánicas del tablero comercial**

Tablero	% humedad (%h)		Densidad ( $\rho$ Kg/m <sup>3</sup> )		% Absorción (% A)		% Hinchazón (% s)		Esfuerzo tensión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo flexión $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	
	$\bar{h}$	$\pm \sigma$	$\bar{\rho}$	$\pm \sigma$	$\bar{A}$	$\pm \sigma$	$\bar{s}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$	$\bar{\sigma}$	$\pm \sigma$
T	12,6	0,01	620,08	2,46	70,26	0,08	12,88	0,01	31,83	4,30	47,46	2,68

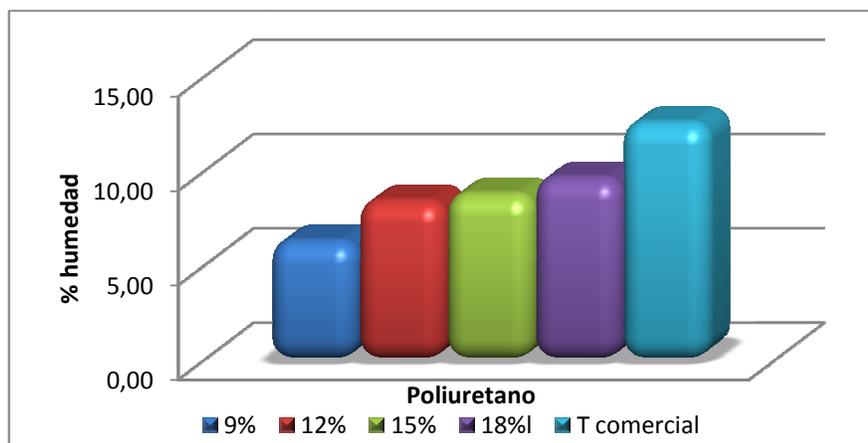
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Porcentaje de humedad de los tableros de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



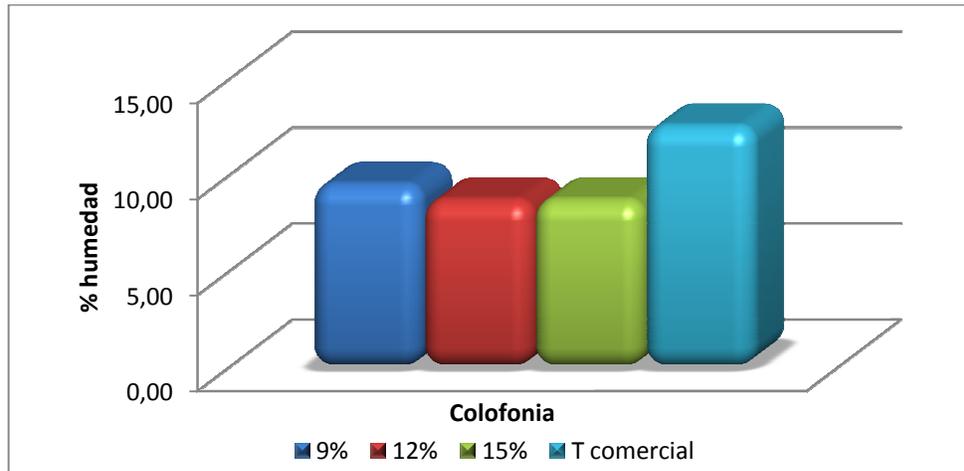
Fuente: elaboración propia

Figura 9. **Porcentaje de humedad de los tableros de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



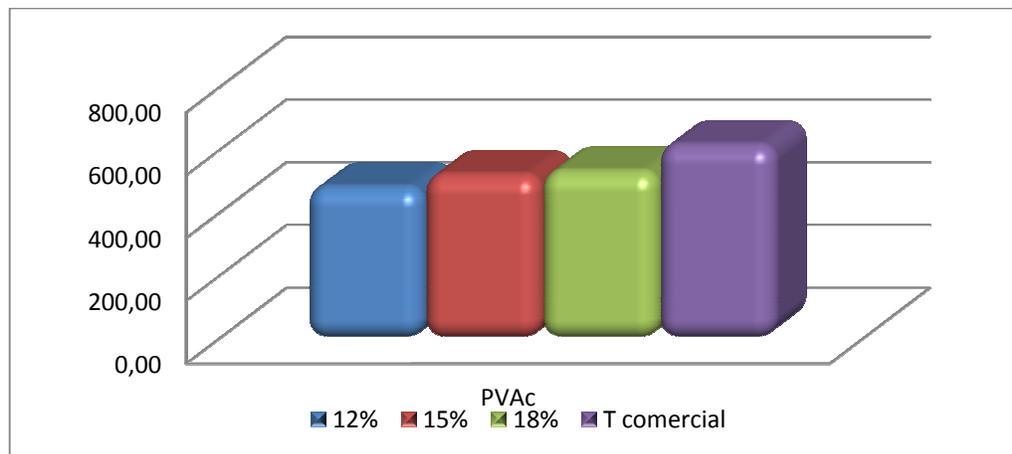
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Porcentaje de humedad de los tableros de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



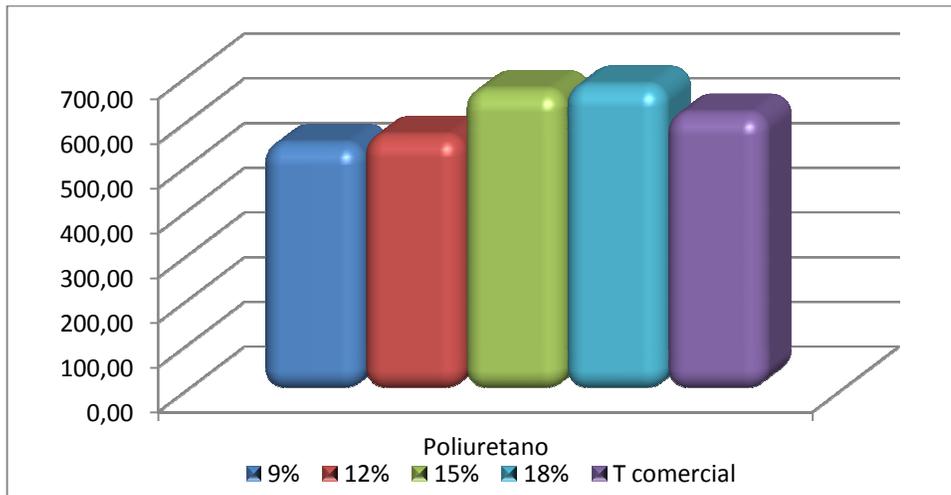
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Densidad de los tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



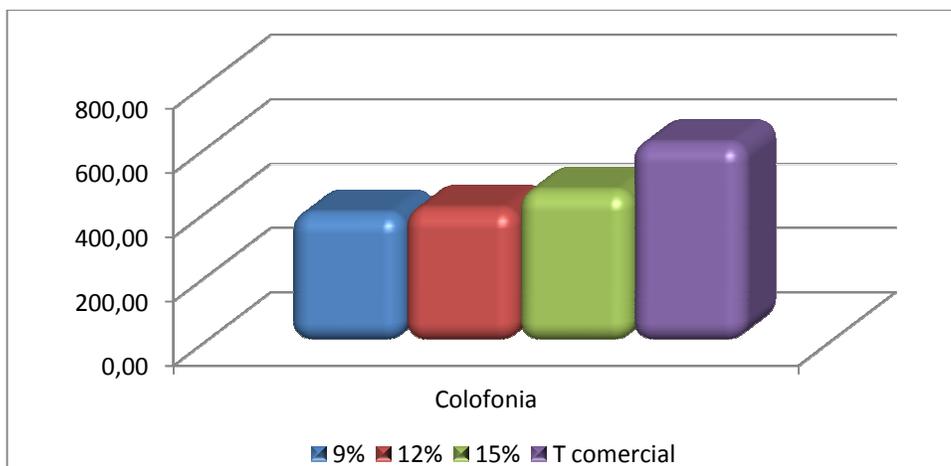
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Densidad de los tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



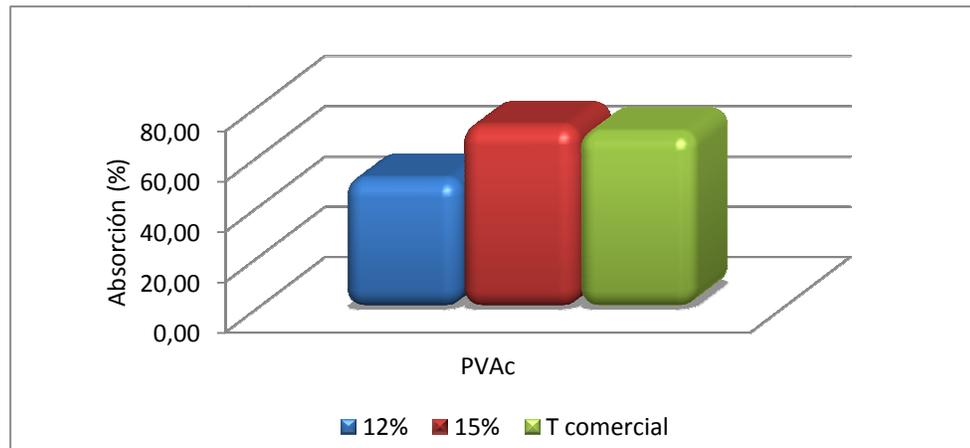
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Densidad de los tableros con aglomerante de colofonía a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



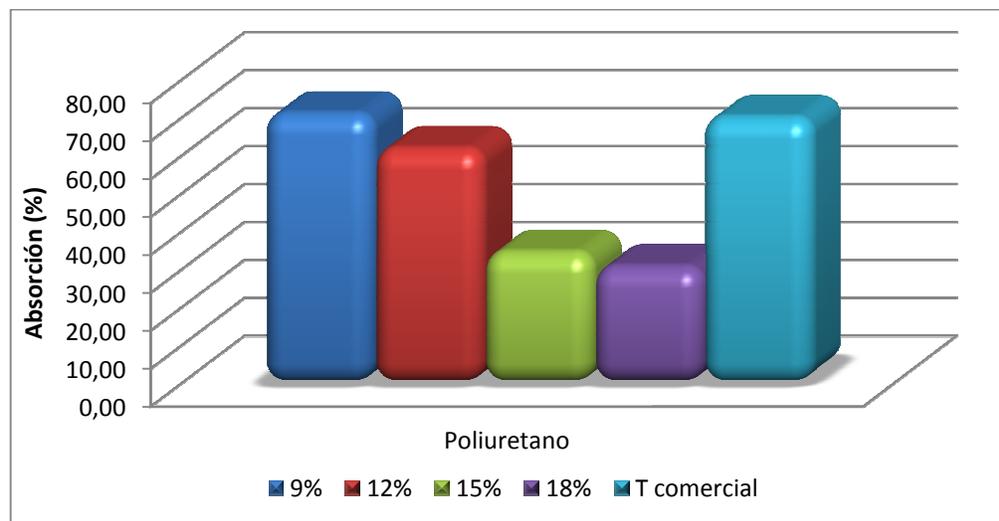
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Absorción en agua de los tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



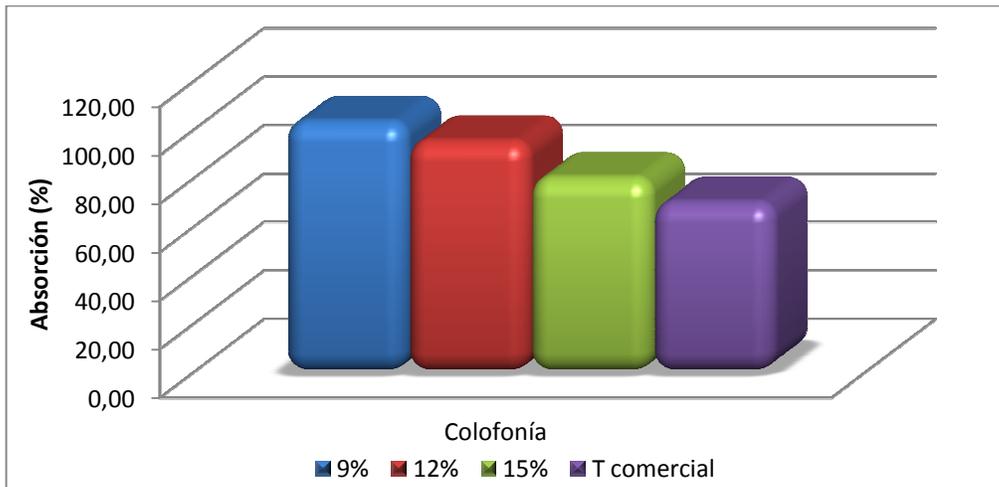
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Absorción en agua de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



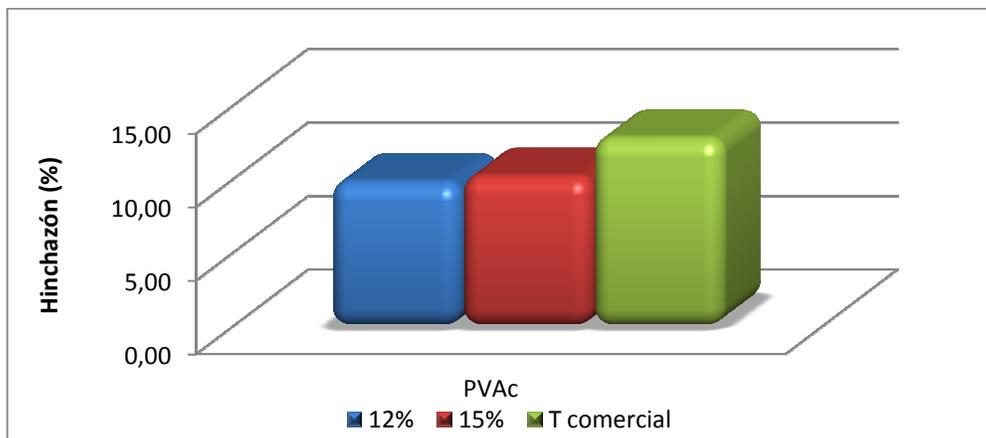
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Absorción en agua de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



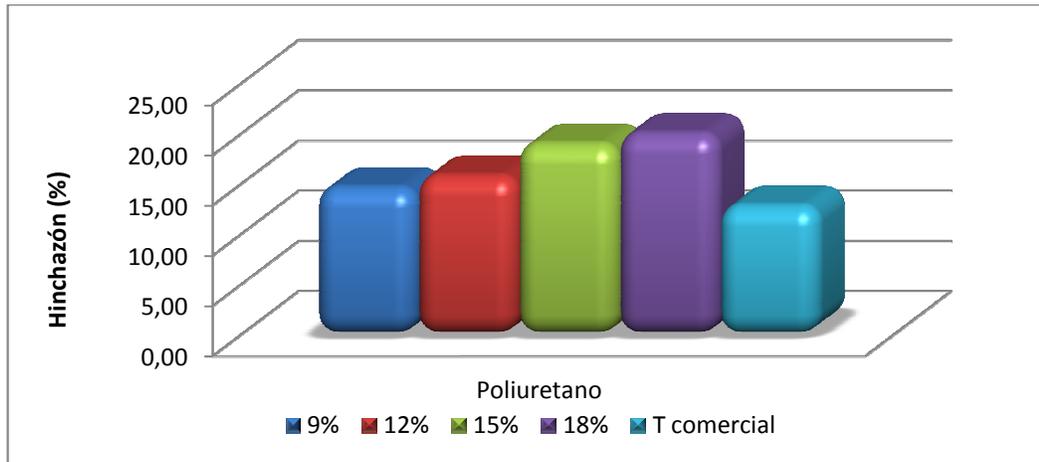
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Hinchazón de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



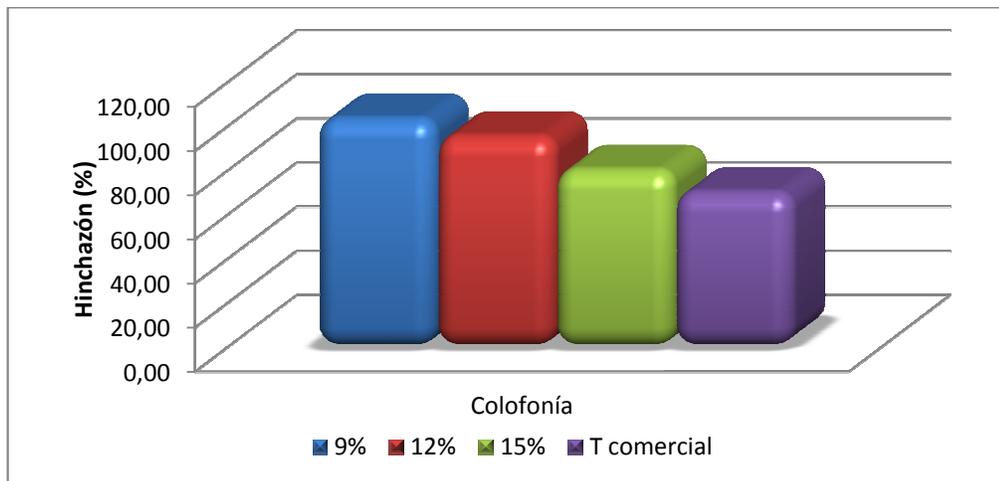
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Hinchazón de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



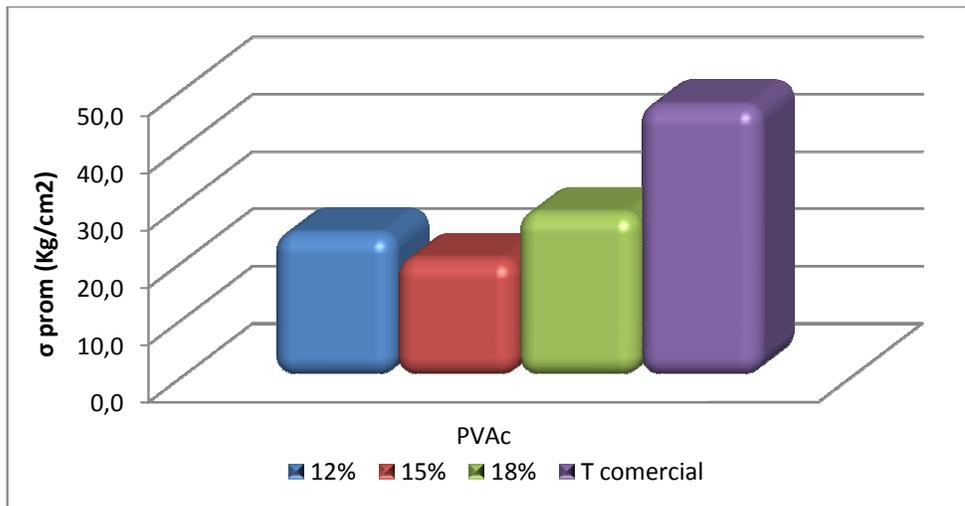
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Hinchazón de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



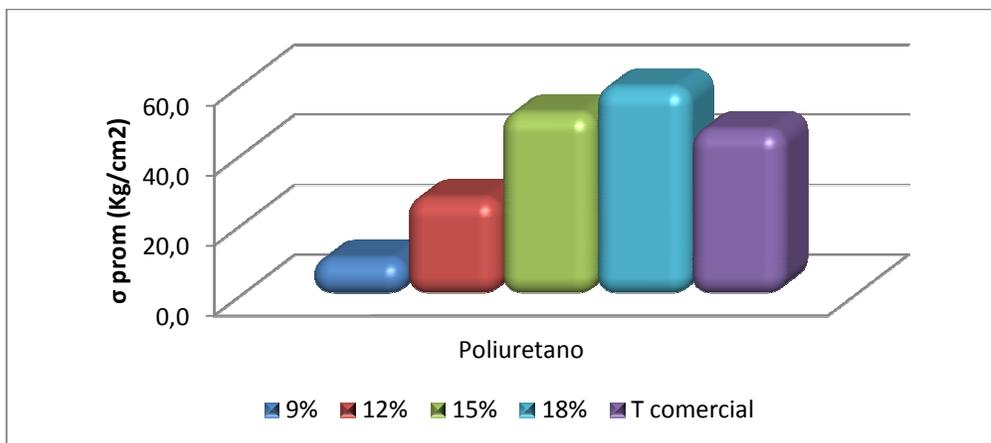
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T=21,93 Celsius y %h = 75,67**



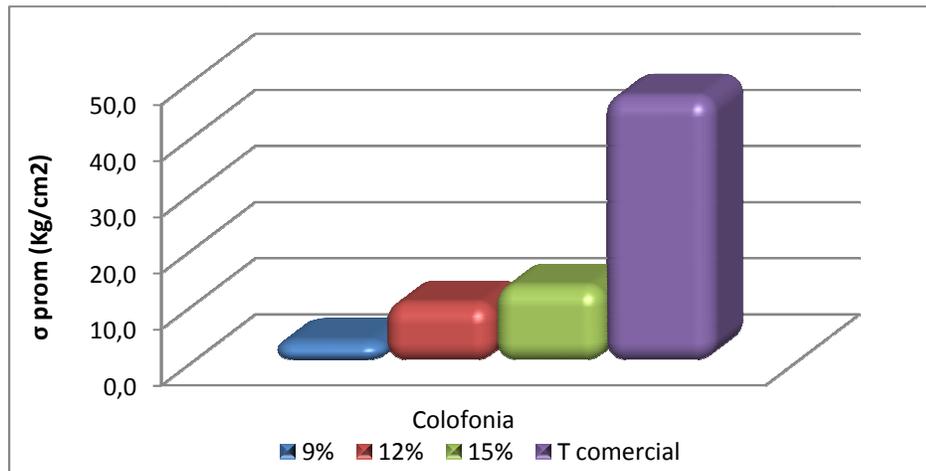
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de poliuretano a T=21,93 Celsius y %h = 75,67**



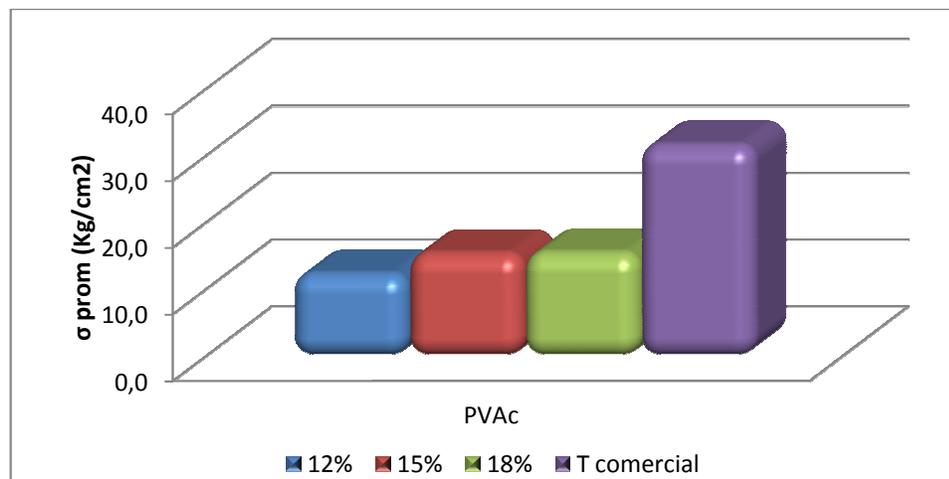
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Resistencia a flexión de tableros con aglomerante de colofonia a T=21,93 Celsius y %h = 75,67**



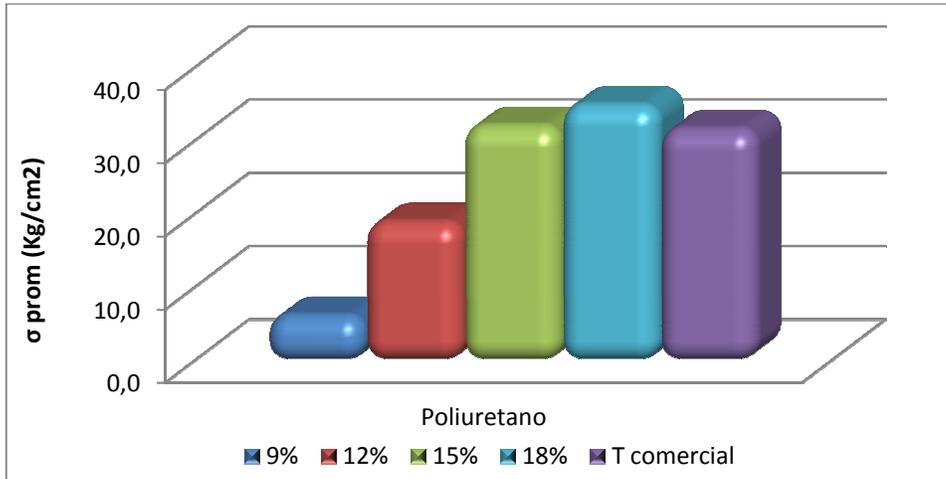
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc) a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



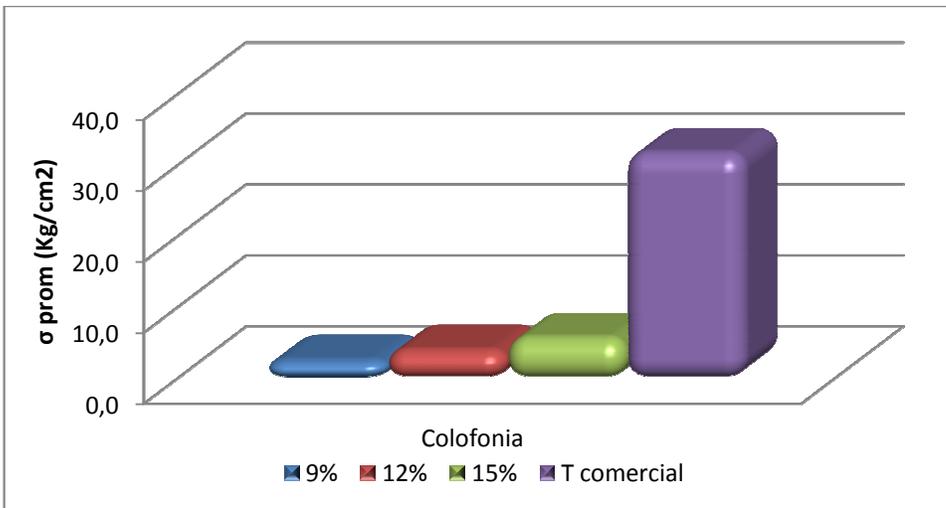
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de poliuretano a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Resistencia a tensión de tableros con aglomerante de colofonia a T = 21,93 Celsius y %h = 75,67**



Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La investigación se realizó con muestras de árboles de la plantación ubicada en la comunidad de Nuevo México del municipio de San Vicente Pacaya, Escuintla. Dicho cultivo tiene una edad máxima de 6 años. Se seleccionaron áreas y árboles al azar.

El proceso de reducción de tamaño de partícula se realizó a través de una canteadora, una cepilladora y una cierra circular; posteriormente se secó la madera de forma natural (expuesta al sol) con la finalidad que tuviera una humedad menor al 12 por ciento para luego hacerla pasar por tamices No. 4, 16 y 100 y finalmente almacenarla con su respectiva identificación.

Inicialmente se trabajaron 3 proporciones de aglomerante: 12, 15 y 18 por ciento que posteriormente fueron modificadas a 9, 12 y 15 por ciento, para los tableros con aglomerantes de barniz poliuretano y colofonia de pino Oocarpa. La razón por la cual se modificaron las proporciones de los tableros con los aglomerantes mencionados anteriormente es porque a pesar que dichos tableros presentaron compactación no presentaron adherencia (ver apéndice C), por lo que se repitieron dándole a la madera un pretratamiento.

El pretratamiento consistió en agregar y mezclar 10 por ciento de cola blanca a la madera y secarla hasta alcanzar un rango de humedad entre 15 y 20 por ciento, para luego proceder de la forma establecida. Con este pretratamiento se consigue sellar los poros de la madera lo que permite que el aglomerante actúe consiguiendo la adhesión necesaria.

Las proporciones de aglomerantes fueron modificadas a pesar del pretratamiento, ya que bajo las condiciones de trabajo no fue posible elaborar tableros de colofonia con 18 por ciento de aglomerante debido a que la mezcla no permitía aplicar una presión mayor a 10 000 libras fuerza dificultando así el prensado. Por otra parte, no se realizaron tableros de 9 por ciento de cola blanca pues la cantidad de aglomerante no alcanzaba a humedecer toda la madera y conseguir así la compactación.

Por lo anterior se tienen 10 mezclas aserrín-aglomerante para tableros de partículas de 1 pie x 1 pie, con carga de 60 000 libras fuerza y tiempo de compactación de 12 minutos, dando como resultado final 30 especímenes de aglomerados. Las 10 mezclas están distribuidas en cuatro proporciones de tableros de partículas con variación de 3 por ciento entre ellas, tableros con aglomerante de cola blanca (PVAc): 12, 15 y 18 por ciento; barniz poliuretano 9, 12, 15 y 18 por ciento y colofonia 9, 12 y 15 por ciento.

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros se utilizó la Norma Española de Tableros de Partículas, previo a la realización de los ensayos se cortaron las probetas según la norma y se colocaron en una cámara de secado donde se monitoreo el porcentaje de humedad relativa y temperatura ambiente.

Las propiedades físicas que se evaluaron en los tableros son: porcentaje de humedad, densidad, hinchazón y absorción en agua. Para la realización de los ensayos de humedad se utilizó un secador de flujo transversal y una balanza digital, se midió la pérdida de peso en las probetas en períodos de 1 hora hasta obtener dos medidas iguales.

A través de las figuras 8, 9 y 10 se muestra el porcentaje de humedad de los tableros de distintos aglomerantes con sus respectivas proporciones comparadas con el porcentaje de humedad de un tablero comercial. En las mismas figuras se observa que el porcentaje de humedad para los tres aglomerantes es menor al del tablero comercial y los valores en general oscilan entre el 7 y 11 por ciento, asimismo, no existe diferencia significativa entre las distintas proporciones para ninguno de los aglomerantes, siendo los tableros con poliuretano el que presenta mayor diferencia.

En cuanto la densidad de los tableros, esta se mantiene relativamente constante para todos los aglomerantes y todas las proporciones siendo los menos densos los tableros con colofonia y los de mayor densidad los tableros de poliuretano, en especial las proporciones 15 y 18 por ciento superando al tablero comercial.

Para el ensayo absorción en agua se utilizó agua desmineralizada marca Salvavidas con un pH de 5,8 y un recipiente plástico para sumergir las probetas; a dichas probetas se les midió la masa, largo y grosor con una balanza digital y un vernier previo a la inmersión en agua y después de 2 horas. En cuanto a los tableros con cola blanca (PVAc) la absorción en agua no se pudo evaluar para la proporción de 18 por ciento de aglomerante, ya que luego del lapso de tiempo establecido las probetas se desintegraron quedando las partículas de madera dispersas en el agua; sin embargo, los tableros de 12 por ciento de aglomerante presenta un valor de absorción en agua menor que el tablero comercial y el de 15 por ciento presenta una diferencia mínima por arriba del tablero de referencia.

Los tableros de poliuretano muestran una tendencia inversamente proporcional con relación al porcentaje de aglomerante, siendo el de 18 por ciento el que presenta el valor más bajo de todos los tableros, esto debido a que el barniz poliuretano crea una película impermeable; de las cuatro especímenes de aglomerados, tres de ellos presentan valores inferiores al valor de absorción de agua del tablero comercial siendo el de 9 por ciento el único que muestra una diferencia mínima superior. Por otra parte, los tableros de colofonia muestran una tendencia inversamente proporcional pero a diferencia de los tableros de poliuretano, estos presentan valores superiores al tablero comercial. Estos resultados pueden apreciarse en las figuras 14, 15, 16 y tablas XIV a la XVII.

La hinchazón de los tableros se ensayó bajo las mismas condiciones que la absorción en agua. Los resultados de este ensayo se muestran en las figuras 17, 18 y 19. Al igual que para el ensayo de absorción en agua, los tableros de cola blanca (PVAc) de 18 por ciento no fue posible evaluar dicha propiedad por los motivos expuestos anteriormente; las proporciones 12 y 15 por ciento del mismo aglomerante denotan valores muy cercanos entre sí y por debajo del valor del tablero comercial.

En cuanto los tableros de poliuretano muestran un comportamiento directamente proporcional con el porcentaje de aglomerante, mostrando en todas las proporciones valores superiores al valor del tablero comercial, lo que indica que dicho aglomerante permite que el tablero expanda sus dimensiones sin que se desintegre. Los tableros con colofonia revelan valores por arriba del tablero de comparación, con una tendencia decreciente al aumento de aglomerante.

Las propiedades mecánicas evaluadas son la resistencia a flexión y resistencia a tensión, las cuales se realizaron en el Laboratorio de Prueba de Resistencia de Materiales del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

En los tableros, la flexibilidad es la propiedad que tienen de ser doblados o curvados en sentido longitudinal, sin romperse. Dicha propiedad presenta, en general, un comportamiento ascendente con relación al porcentaje de aglomerante, siendo el barniz poliuretano el que alcanza los valores más altos, incluso superando al tablero comercial en las proporciones 15 y 18 por ciento. Los valores más bajos de esfuerzo de flexión los presentan los tableros de colofonia, los cuales están por debajo del 14 por ciento. Mientras los tableros de cola blanca (PVAc) permanecen en la media con valores entre 20 y 30 por ciento. Lo anterior se muestra en las figuras 20, 21, 22 y tablas XIV – XVII.

En cuanto el ensayo de tensión, los resultados se comportan de manera similar al ensayo de flexión, el valor de esfuerzo de tensión para los tableros de cola blanca (PVAc) incrementa conforme se incrementa la cantidad de adhesivo y la diferencia entre proporciones es mínima, permaneciendo valores relativamente bajos, ya que son la mitad del valor del tablero comercial.

Los tableros de poliuretano en las proporciones 15 y 18 por ciento son las que presentan los valores más altos de esfuerzo de tensión sobrepasando en gran manera el valor del tablero de referencia; estos tableros sí muestran diferencia significativa entre los valores de sus proporciones; por último, los tableros de colofonia son los que presentan los valores más bajos, siendo prácticamente despreciados, ya que están por debajo de 7 kilogramos por centímetro cuadrado. Los resultados se presentan en las figuras 23, 24, 25 y tablas XIV a la XVII.

En general, tanto para las propiedades físicas como mecánicas se estableció que sí existe diferencia significativa en función del aglomerante utilizado, por lo que se rechaza la hipótesis nula y por ende se acepta la hipótesis alternativa, producto del tratamiento estadístico al emplear un análisis de varianza con los resultados obtenidos.

## CONCLUSIONES

1. Puede aprovecharse el aserrío de la madera de palo blanco (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert) de primeros raleos, para la elaboración de tableros de partículas o aglomerados.
2. Los tres tipos de tableros de partículas estudiados con aserrío de madera de palo blanco (*Cybistax donell-smithii* (Rose) Seibert), se clasifican como tableros semipesados (SP) según la Norma UNE 56 707.
3. Los mejores resultados obtenidos al ensayar las propiedades físico-mecánicas, correspondieron a los tableros de barniz poliuretano con proporción de 15 y 18 por ciento de aglomerante.
4. El análisis estadístico permitió establecer que existe diferencia significativa en las propiedades físico-químicas entre las tres formulaciones de aglomerante.



## RECOMENDACIONES

1. Continuar con estudios de características físicas y propiedades mecánicas de tableros de partículas, utilizando prensado en caliente, agrandando el rango de tamaño de partículas, mezclando especies de madera o variando tipo de adhesivo, sugiriéndose utilizar fenol-formaldehido, urea-formaldehido y colofonia.
2. Al utilizar secado natural para los aglomerados, se debe llevar un control riguroso, ya que la etapa más crítica es en los primeros días, pues debido a la pérdida de agua la madera se hace sensible al ataque de hongos.
3. Investigar los posibles métodos de secado para tableros con el fin de determinar un proceso de secado, que permita minimizar el tiempo de curado, optimizar los costos, evitar los riesgos antes mencionados y brindar información de pérdida de humedad y de temperatura para su respectivo control y monitoreo.
4. Realizar estudios posteriores sobre las posibles aplicaciones artesanales o industriales de los tableros de partículas realizados.
5. Divulgar el presente estudio, como opción de aprovechamiento económico para personas o comunidades que se dediquen a la carpintería, talleres con alta producción de productos de la madera o bien aserraderos, para el aprovechamiento de los subproductos como corteza, viruta y aserrín.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ARCHILA MANZO, Henry Waldemar. *Aprovechamiento de la madera en contrachapado y aglomerados en la industria de puertas y muebles en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1999. 261 p.
2. ARCOS SÁNCHEZ, Patricio; ALLEN Javier. *Fabricación de osb y contrachapado a partir de eucalyptusnitens: analisis del comportamiento en proceso*. Trabajo de graduación de Ing. Civil en Industrias Forestales. Departamento de la Madera. Chile, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bio-Bio, 2005. 96 p.
3. CASTILLO SOSA, William Giovanni. *Propiedades físico mecánicas del PinusPatulaSchiede*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 145 p.
4. ECHEVERRÍA RAMÍREZ, José Francisco. *AlnusAcuminata O. Ktze (Ilamo), determinación de sus propiedades físico-mecánicas, para diseño de flexión en madera estructural y su uso como otra alternativa para la construcción de vivienda popular*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 123 p.

5. ESCOBAR TOLEDO, Erickson Roberto. *Caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe pinuscaribaea(morelet) var. hondurensis (barret y golfari) a nivel laboratorio, proveniente de la finca semuc 6, El Estor, Izabal.* Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 225 p.
6. FUENTES TALAVERA, Silvia Guzmán. *Comportamiento higroscópico de la madera de Persea Americana Var. Guatemalensis Mil (Hass).* Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente., enero –junio, año/vol 8, número 001. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 2002. 23 p.
7. JOACHÍN BAUTISTA, Juan; RIVAS BOCH, Claudia. *Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 72 p.
8. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. *Industrias del mueble de la ebanistería para países en desarrollo.* Primera parte, Insumos de materias primas. Publicación Austria, 1974. 138 p.
9. RODRÍGUEZ, Liz María Eugenia. *Determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (pinuspseudostrobuslindl) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango.* Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 186 p.

10. Sindicato Nacional de la Madera y Corcho. *Normas españolas de tableros de partículas*. UNE 56709, UNE 56710, UNE 56711, UNE 56711, UNE 56712, UNE 56713. editó AITIM Flora, Madrid, 1967. 236 p.
11. TUK DURÁN, Juan. *Encolado de maderas tropicales*. Costa Rica: Tecnología de Costa Rica, 1979. 73 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Determinación de humedad de los tableros

TABLERO	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>prom</sub> (mm)	m <sub>o</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	Humedad (%)	h <sub>promedio</sub> (%)
12CB-1	49,95	49,90	49,93	13,436	12,130	12,141	12,116	10,89	10,85
12CB-2	41,10	51,20	46,15	13,788	12,496	12,468	12,465	10,61	
12CB-3	50,40	50,20	50,30	13,573	12,263	12,228	12,224	11,04	
15CB-1	51,05	51,10	51,08	14,389	13,182	13,165	13,156	9,37	9,98
15CB-2	50,30	50,30	50,30	14,439	13,173	13,259	13,151	9,79	
15CB-3	50,60	50,60	50,60	14,662	13,336	13,324	13,236	10,77	
18CB-1	49,90	50,05	49,98	12,303	11,238	11,285	11,229	9,56	9,57
18CB-2	49,90	49,75	49,83	12,885	11,795	11,839	11,773	9,45	
18CB-3	50,95	50,85	50,90	13,610	12,435	12,489	12,407	9,70	
9P-1	50,40	49,40	49,90	16,871	15,915	15,877	15,876	6,27	6,34
9P-2	51,05	51,35	50,23	16,393	15,457	15,419	15,416	6,34	
9P-3	49,80	50,40	50,58	16,131	15,207	15,159	15,158	6,42	
12P-1	50,30	50,30	50,35	11,373	10,050	9,997	9,996	13,78	8,46
12P-2	51,30	50,20	50,80	11,549	11,248	10,897	10,895	6,00	
12P-3	50,30	50,25	50,25	11,023	10,518	10,440	10,438	5,60	
15P-1	51,20	51,05	50,73	14,509	13,392	13,349	13,336	8,80	8,83
15P-2	51,25	51,40	51,33	14,589	13,481	13,424	13,417	8,74	
15P-3	51,15	51,30	51,23	13,507	12,450	12,398	12,395	8,97	
18P-1	50,35	49,75	50,05	15,149	13,943	13,831	13,827	9,56	9,68
18P-2	50,10	50,05	50,08	13,338	12,269	12,154	12,153	9,75	
18P-3	59,65	50,35	55,00	15,454	14,213	14,090	14,084	9,73	
9C-1	50,20	50,30	50,25	13,351	12,257	12,197	12,193	9,50	9,56
9C-2	51,30	50,30	50,80	11,732	10,763	10,721	10,718	9,46	
9C-3	50,30	50,05	50,18	12,625	11,567	11,508	11,506	9,73	
12C-1	50,60	49,70	50,15	10,384	9,648	9,573	9,554	8,69	8,75
12C-2	51,15	51,20	51,18	10,529	9,760	9,680	9,676	8,82	
12C-3	51,10	51,15	51,13	10,727	9,948	9,868	9,864	8,75	
15C-1	51,15	49,95	50,55	11,610	10,758	10,705	10,680	8,71	8,75
15C-2	50,20	50,40	50,30	12,756	11,786	11,755	11,749	8,57	
15C-3	50,50	49,95	50,23	12,455	11,517	11,466	11,430	8,97	
T1	50,50	50,50	50,50	15,187	13,598	13,561	13,487	12,60	12,60

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Determinación de densidad de los tableros

TABLERO	G <sub>1</sub> (mm)	G <sub>2</sub> (mm)	G <sub>3</sub> (mm)	G <sub>4</sub> (mm)	G promedio (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	V (m <sup>3</sup> )	m (Kg)	Desidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (Kg/m <sup>3</sup> )
12CB-1	11,45	11,50	11,40	11,35	11,43	99,45	98,95	0,000112	0,055703	495,45	485,36
12CB-2	11,20	11,15	11,15	11,25	11,19	99,95	100,05	0,000112	0,051909	463,99	
12CB-3	11,10	11,00	11,10	11,00	11,05	99,30	99,55	0,000109	0,054250	496,65	
15CB-1	11,05	10,95	11,05	10,70	10,94	99,45	99,80	0,000109	0,054389	501,02	524,83
15CB-2	11,25	11,35	11,10	11,40	11,28	100,35	100,20	0,000113	0,061161	539,48	
15CB-3	11,20	11,05	11,25	11,20	11,18	100,60	100,00	0,000112	0,060032	534,00	
18CB-1	11,15	11,05	11,00	10,95	11,04	100,15	99,10	0,000110	0,059757	545,50	536,03
18CB-2	11,05	10,90	11,00	11,10	11,01	99,70	99,70	0,000109	0,062125	567,53	
18CB-3	11,15	11,20	11,20	11,20	11,19	99,95	100,10	0,000112	0,055411	495,05	
9P-1	11,10	10,95	10,85	11,00	10,98	100,50	110,30	0,000122	0,059374	488,03	552,76
9P-2	11,45	11,75	11,50	11,85	11,64	100,10	99,80	0,000116	0,065617	564,41	
9P-3	11,35	11,80	11,25	11,25	11,41	100,05	100,20	0,000114	0,069315	605,85	
12P-1	10,90	10,80	10,60	10,90	10,80	99,00	99,10	0,000106	0,060253	568,65	571,02
12P-2	11,05	11,10	11,05	11,05	11,06	99,15	99,70	0,000109	0,060769	555,70	
12P-3	10,95	10,85	11,05	10,90	10,94	98,80	99,20	0,000107	0,063109	588,71	
15P-1	7,35	7,65	7,65	7,60	7,56	100,10	100,25	0,000076	0,052907	697,15	672,31
15P-2	8,40	8,15	8,55	8,25	8,34	99,35	99,60	0,000083	0,056826	688,79	
15P-3	9,10	8,90	8,80	8,65	8,86	99,75	99,70	0,000088	0,055614	630,99	
18P-1	10,15	10,30	10,30	10,30	10,26	99,75	99,30	0,000102	0,071744	705,78	683,18
18P-2	10,10	10,15	10,05	10,15	10,11	100,60	99,80	0,000102	0,066771	657,66	
18P-3	10,25	10,25	10,40	9,95	10,21	99,75	99,45	0,000101	0,069509	686,11	
9C-1	13,00	12,70	13,00	12,35	12,76	99,35	99,25	0,000126	0,053303	423,56	401,62
9C-2	12,75	12,15	11,95	11,85	12,18	99,15	99,60	0,000120	0,050042	416,21	
9C-3	12,95	12,50	12,60	12,35	12,60	103,00	98,70	0,000128	0,046764	365,08	
12C-1	10,05	10,10	10,10	10,90	10,29	99,70	99,85	0,000102	0,04125	402,78	416,26
12C-2	10,15	9,90	10,00	9,85	9,98	99,25	99,85	0,000099	0,042772	432,68	
12C-3	10,50	10,65	10,00	10,85	10,50	100,50	100,30	0,000106	0,043745	413,31	
15C-1	10,55	10,20	10,05	10,10	10,23	99,40	99,90	0,000102	0,049574	488,25	471,93
15C-2	10,30	9,65	9,40	9,70	9,76	101,70	100,70	0,000100	0,043847	438,56	
15C-3	10,45	10,55	10,50	10,55	10,51	100,10	100,00	0,000105	0,051457	488,99	
T1	9,75	9,75	9,55	9,75	9,70	99,85	99,55	0,000096	0,05962	618,35	620,08
T2	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	99,70	99,60	0,000097	0,060513	621,82	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Determinación de porcentaje de hinchazón**

TABLERO	Datos iniciales (0 h)					Datos finales (2h)			Datos calculados	
	G <sub>1</sub> (mm)	G <sub>2</sub> (mm)	G <sub>3</sub> (mm)	G <sub>4</sub> (mm)	G <sub>prom</sub> (mm)	G <sub>1</sub> (mm)	G <sub>2</sub> (mm)	G <sub>prom</sub> (mm)	Hinchazón (%)	Hinchazón promedio (%)
12CB-1	11,45	11,50	11,40	11,35	11,43	12,45	12,40	12,43	8,75	9,9239
12CB-2	11,20	11,15	11,15	11,25	11,19	12,25	12,55	12,40	10,84	
12CB-3	11,10	11,00	11,10	11,00	11,05	12,25	12,10	12,18	10,18	
15CB-1	11,05	10,95	11,05	10,70	10,94	11,85	11,95	11,90	8,80	10,2921
15CB-2	11,25	11,35	11,10	11,40	11,28	12,20	12,15	12,18	7,98	
15CB-3	11,20	11,05	11,25	11,20	11,18	12,70	12,80	12,75	14,09	
18CB-1	10,95	11,05	11,00	10,95	10,99	No se pudo medir			NPS	
18CB-2	11,05	10,90	11,00	11,10	11,01	No se pudo medir				
18CB-3	11,15	11,20	11,20	11,20	11,19	No se pudo medir				
9P-1	11,10	10,95	10,85	11,00	10,98	12,9	11,9	12,4	12,98	14,6998
9P-2	11,45	11,75	11,50	11,85	11,64	12,95	13,90	13,43	15,36	
9P-3	11,35	11,80	11,75	11,75	11,66	13,90	13,10	13,5	15,76	
12P-1	10,90	10,80	10,60	10,90	10,80	12,10	12,30	12,2	12,96	15,8552
12P-2	10,50	10,25	10,95	10,70	10,60	11,95	11,90	11,93	12,50	
12P-3	10,30	10,20	10,95	10,40	10,46	12,90	12,65	12,78	22,10	
15P-1	7,35	7,65	7,65	7,60	7,56	9,45	8,95	9,2	21,65	19,0415
15P-2	8,40	8,15	8,55	8,25	8,34	9,45	10,20	9,825	17,84	
15P-3	9,10	8,90	8,80	8,65	8,86	10,20	10,65	10,43	17,63	
18P-1	10,15	10,30	10,30	10,30	10,26	12,35	12,00	12,18	18,64	20,0989
18P-2	9,90	10,15	10,05	10,15	10,06	12,60	11,50	12,05	19,75	
18P-3	10,25	10,25	10,40	9,95	10,21	12,30	12,60	12,45	21,91	
9C-1	13,00	12,70	13,00	12,35	12,76	13,95	13,55	13,75	7,74	8,1494
9C-2	12,75	12,15	11,95	11,85	12,18	13,05	13,05	13,05	7,19	
9C-3	12,95	12,50	12,60	12,35	12,60	14,20	13,40	13,8	9,52	
12C-1	10,05	10,10	10,10	10,90	10,29	11,20	12,70	11,95	16,16	8,0801
12C-2	10,15	10,90	10,00	10,85	10,48	10,40	10,55	10,48	0,00	
12C-3	10,10	10,50	10,05	10,90	10,39	10,80	11,63	11,21	8,08	
15C-1	10,55	10,20	10,05	10,10	10,23	11,25	10,40	10,83	5,87	7,9101
15C-2	10,30	9,65	9,40	9,70	9,76	11,40	10,15	10,78	10,37	
15C-3	10,45	10,55	10,50	10,55	10,51	11,25	11,35	11,3	7,49	
T1	9,75	9,75	9,55	9,75	9,70	10,90	11,00	10,95	12,89	12,8783
T2	9,80	9,60	9,75	9,65	9,70	11,20	10,70	10,95	12,87	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Determinación de porcentaje de absorción en agua**

<b>TABLERO</b>	<b>M<sub>inicial</sub> (g)</b>	<b>M<sub>final</sub> (g)</b>	<b>Absorción (%)</b>	<b>Absorción promedio (%)</b>
12CB-1	55,703	88,456	58,80	51,70
12CB-2	51,909	75,406	45,27	
12CB-3	54,250	81,931	51,02	
15CB-1	54,389	87,316	60,54	72,64
15CB-2	61,161	100,963	65,08	
15CB-3	60,032	115,443	92,30	
18CB-1	49,757	No se pudo medir		NPS
18CB-2	52,125	No se pudo medir		
18CB-3	55,411	No se pudo medir		
9P-1	59,374	101,975	71,75	71,28
9P-2	65,617	111,707	70,24	
9P-3	69,315	119,118	71,85	
12P-1	58,957	99,585	68,91	62,07
12P-2	60,769	98,720	62,45	
12P-3	60,109	93,080	54,85	
15P-1	52,907	69,544	31,45	34,76
15P-2	56,826	76,149	34,00	
15P-3	55,614	77,208	38,83	
18P-1	71,744	94,127	31,20	30,92
18P-2	66,771	95,167	42,53	
18P-3	75,509	89,877	19,03	
9C-1	53,303	109,297	105,05	103,60
9C-2	50,042	93,106	86,06	
9C-3	46,764	102,733	119,8	
12C-1	38,772	74,955	93,32	95,58
12C-2	38,772	76,709	97,85	
12C-3	38,772	75,830	95,58	
15C-1	49,574	81,591	64,58	80,39
15C-2	43,847	89,850	104,92	
15C-3	51,457	88,335	71,67	
T1	59,620	101,540	70,31	70,26
T2	60,513	102,995	70,20	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Datos del ensayo de resistencia a tensión

TABLERO	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a promedio (mm)	g <sub>1</sub> (mm)	g <sub>2</sub> (mm)	g promedio (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	σ (Kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>prom</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
12CB-1	75,29	75,23	75,26	11,63	11,38	11,51	8,659	125	14,436	12,503
12CB-2	76,43	76,01	76,22	11,83	11,80	11,82	9,005	100	11,104	
12CB-3	75,11	74,91	75,01	11,16	11,12	11,14	8,356	100	11,967	
15CB-1	75,19	75,44	75,32	11,64	11,57	11,61	8,740	125	14,302	15,565
15CB-2	74,57	74,64	74,61	11,47	11,47	11,47	8,557	145	16,945	
15CB-3	75,23	75,43	75,33	11,21	11,13	11,17	8,414	130	15,450	
18CB-1	74,63	74,77	74,70	11,63	11,45	11,54	8,620	130	15,081	15,665
18CB-2	75,43	75,23	75,33	11,44	11,64	11,54	8,693	140	16,105	
18CB-3	75,38	75,48	75,43	11,33	11,31	11,32	8,539	135	15,810	
9P-1	75,27	75,09	75,18	10,43	10,73	10,58	7,954	65	8,172	6,351
9P-2	75,38	75,57	75,48	12,41	12,43	12,42	9,374	50	5,334	
9P-3	75,82	75,17	75,50	10,79	10,70	10,75	8,112	45	5,547	
12P-1	75,05	75,10	75,08	12,24	12,38	12,31	9,242	160	17,313	19,111
12P-2	74,47	73,76	74,12	10,97	10,90	10,94	8,104	170	20,976	
12P-3	74,60	74,71	74,66	10,65	10,45	10,55	7,876	150	19,045	
15P-1	75,51	75,09	75,30	8,70	8,90	8,80	6,626	200	30,182	32,255
15P-2	75,81	75,60	75,71	8,39	8,30	8,35	6,318	210	33,241	
15P-3	75,73	75,63	75,68	8,41	8,63	8,52	6,448	215	33,342	
18P-1	74,57	74,24	74,41	8,77	8,82	8,80	6,544	225	34,383	35,070
18P-2	75,48	75,22	75,35	8,41	8,49	8,45	6,367	225	35,338	
18P-3	74,16	74,06	74,11	8,75	8,74	8,75	6,481	230	35,489	
9C-1	74,56	75,32	74,94	10,89	10,34	10,62	7,955	25	3,143	2,648
9C-2	75,48	75,09	75,29	11,02	11,02	11,02	8,296	10	1,205	
9C-3	75,12	75,22	75,17	11,06	11,14	11,10	8,344	30	3,595	
12C-1	76,38	75,53	75,96	11,21	11,17	11,19	8,499	30	3,530	4,098
12C-2	75,46	74,97	75,22	9,74	9,65	9,70	7,292	45	6,171	
12C-3	74,39	74,51	74,45	10,35	10,38	10,37	7,717	20	2,592	
15C-1	75,23	75,08	75,16	11,85	12,05	11,95	8,981	60	6,681	5,805
15C-2	75,27	75,28	75,28	11,77	11,17	11,47	8,634	60	6,949	
15C-3	74,16	73,45	73,81	10,64	10,83	10,74	7,923	30	3,786	
T1	74,43	74,59	74,51	10,23	10,28	10,26	7,641	220	28,792	31,832
T2	74,72	74,72	74,72	10,16	10,18	10,17	7,599	265	34,873	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Datos del ensayo de resistencia a flexión

TABLERO	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>3</sub> (mm)	h <sub>4</sub> (mm)	h promedio (cm)	B <sub>1</sub> (mm)	B <sub>2</sub> (mm)	B promedio (cm)	Carga (Kg)	Luz	σ (Kg/cm <sup>2</sup> )	σ promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )
12CB-1	11,45	11,50	11,55	11,45	1,149	99,40	99,85	9,96	32,500	6,8	25,215	25,088
12CB-2	11,85	11,75	11,70	11,70	1,175	100,30	100,30	10,03	35,000	6,8	25,781	
12CB-3	11,65	11,60	11,70	11,65	1,165	100,60	100,70	10,07	32,500	6,8	24,267	
15CB-1	11,40	11,10	10,90	10,70	1,103	99,90	99,95	9,99	35,000	6,8	29,393	26,400
15CB-2	10,70	10,75	10,90	10,80	1,079	100,05	99,85	10,00	32,500	6,8	28,501	
15CB-3	10,95	10,80	11,00	11,00	1,094	100,00	100,10	10,01	25,000	6,8	21,305	
18CB-1	11,70	11,70	11,85	11,90	1,179	99,90	100,30	10,01	35,000	6,8	25,668	28,682
18CB-2	11,70	11,75	11,60	11,80	1,171	100,10	99,90	10,00	40,000	6,8	29,741	
18CB-3	11,50	11,60	11,50	11,40	1,150	100,70	100,70	10,07	40,000	6,8	30,636	
9P-1	11,40	11,20	11,45	11,10	1,129	99,10	99,30	9,92	12,500	6,8	10,088	10,705
9P-2	12,60	12,60	12,60	12,50	1,258	100,15	100,35	10,03	17,500	6,8	11,260	
9P-3	12,00	11,90	12,05	11,80	1,194	99,60	99,85	9,97	15,000	6,8	10,766	
12P-1	1040	10,50	10,40	10,15	1,036	98,20	98,40	9,83	25,000	6,8	24,158	28,000
12P-2	9,20	10,15	9,95	10,00	0,983	99,05	98,05	9,86	27,500	6,8	29,486	
12P-3	9,95	10,05	10,10	10,00	1,003	100,30	100,30	10,03	30,000	6,8	30,357	
15P-1	8,80	8,80	8,65	8,80	0,876	99,45	99,45	9,95	45,000	6,8	60,111	52,252
15P-2	8,45	8,95	8,70	8,75	0,871	98,50	98,55	9,85	40,000	6,8	54,554	
15P-3	9,70	9,90	8,30	9,10	0,925	99,10	99,15	9,91	35,000	6,8	42,092	
18P-1	8,95	9,05	9,05	9,10	0,904	99,00	99,70	9,94	50,000	6,8	62,850	59,655
18P-2	9,50	9,05	8,95	9,45	0,924	98,70	98,45	9,86	45,000	6,8	54,568	
18P-3	8,95	9,50	8,70	9,45	0,915	99,05	98,90	9,90	50,000	6,8	61,546	
9C-1	12,70	11,60	11,10	10,90	1,158	99,50	99,10	9,93	5,128	6,8	3,931	3,880
9C-2	12,65	12,45	12,75	12,70	1,264	99,85	99,85	9,99	7,128	6,8	4,559	
9C-3	13,20	12,85	12,95	12,60	1,290	99,90	99,65	9,98	5,128	6,8	3,150	
12C-1	11,50	11,30	11,20	11,40	1,135	99,00	100,35	9,97	11,128	6,8	8,840	10,617
12C-2	10,70	10,60	10,65	10,45	1,060	98,95	99,45	9,92	13,128	6,8	12,014	
12C-3	11,20	10,83	11,05	11,10	1,105	99,95	99,65	9,98	13,128	6,8	10,999	
15C-1	11,65	11,40	11,35	12,00	1,160	99,10	99,20	9,92	17,128	6,8	13,095	13,646
15C-2	11,40	10,90	10,80	10,55	1,091	99,40	99,10	9,93	15,128	6,8	13,056	
15C-3	11,05	10,90	10,90	10,90	1,094	98,80	98,70	9,88	17,128	6,8	14,789	
T1	10,25	10,30	10,30	10,25	1,028	95,70	95,10	9,54	45,000	6,8	45,572	47,465
T2	10,00	10,25	10,15	10,25	1,016	99,95	100,15	10,01	50,000	6,8	49,357	

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Análisis de varianza para el porcentaje de humedad según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	2,552	2	1,276	6,606	0,030
	Intragrupos	1,159	6	0,193		
	Total	3,711	8			
Poliuretano	Intergrupos	18,129	3	6,043	1,135	0,392
	Intragrupos	42,595	8	5,324		
	Total	60,724	11			
Colofonia	Intergrupos	1,318	2	0,659	29,647	0,001
	Intragrupos	0,133	6	0,022		
	Total	1,451	8			

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Análisis de varianza para la densidad según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	4249,945	2	2124,972	2,956	0,128
	Intragrupos	4312,868	6	718,811		
	Total	8562,813	8			
Poliuretano	Intergrupos	40944,446	3	13648,149	9,524	0,005
	Intragrupos	11464,073	8	1433,009		
	Total	52408,518	11			
Colofonía	Intergrupos	8258,654	2	4129,327	5,955	0,038
	Intragrupos	4160,375	6	693,396		
	Total	12419,030	8			

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 9. Análisis de varianza para la determinación de absorción en agua según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	657,935	1	657,935	3,857	0,121
	Intragrupos	682,296	4	170,574		
	Total	1340,231	5			
Poliuretano	Intergrupos	3583,776	3	1194,592	23,595	0,000
	Intragrupos	405,027	8	50,628		
	Total	3988,803	11			
Colofonía	Intergrupos	833,600	2	416,800	1,660	0,267
	Intragrupos	1506,296	6	251,049		
	Total	2339,897	8			

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 10. Análisis de varianza para la determinación de hinchazón según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	0,608	1	0,608	0,079	0,793
	Intragrupos	30,872	4	7,718		
	Total	31,480	5			
Poliuretano	Intergrupos	58,979	3	19,660	1,993	0,194
	Intragrupos	78,925	8	9,866		
	Total	137,904	11			
Colofonía	Intergrupos	0,091	2	0,046	0,002	0,998
	Intragrupos	143,929	6	23,988		
	Total	144,020	8			

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 11. Análisis de varianza para el ensayo de flexión según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	98,336	2	49,168	9,877	0,013
	Intragrupos	29,868	6	4,978		
	Total	128,204	8			
Poliuretano	Intergrupos	4549,802	3	1516,601	52,035	0,000
	Intragrupos	233,167	8	29,146		
	Total	4782,969	11			
Colofonia	Inter-grupos	149,959	2	74,979	54,796	0,000
	Intra-grupos	8,210	6	1,368		
	Total	158,169	8			

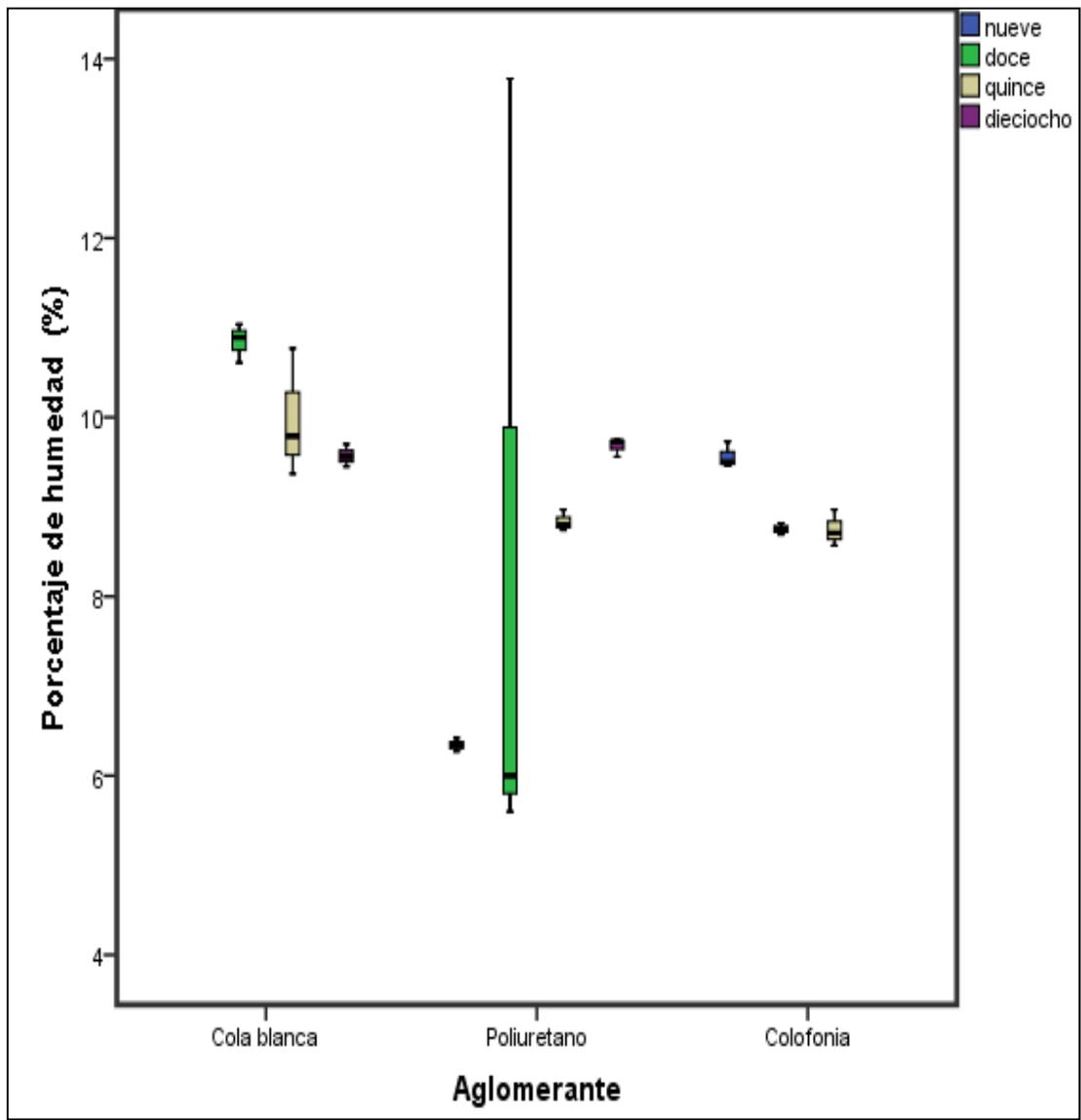
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 12. Análisis de varianza para el ensayo de tensión según el tipo de aglomerante**

Aglomerante		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Cola blanca (PVAc)	Intergrupos	19,322	2	9,661	5,847	0,039
	Intragrupos	9,913	6	1,652		
	Total	29,235	8			
Poliuretano	Intergrupos	1569,931	3	523,310	222,367	0,000
	Intragrupos	18,827	8	2,353		
	Total	1588,758	11			
Colofonia	Intergrupos	14,947	2	7,474	2,753	0,142
	Intragrupos	16,289	6	2,715		
	Total	31,237	8			

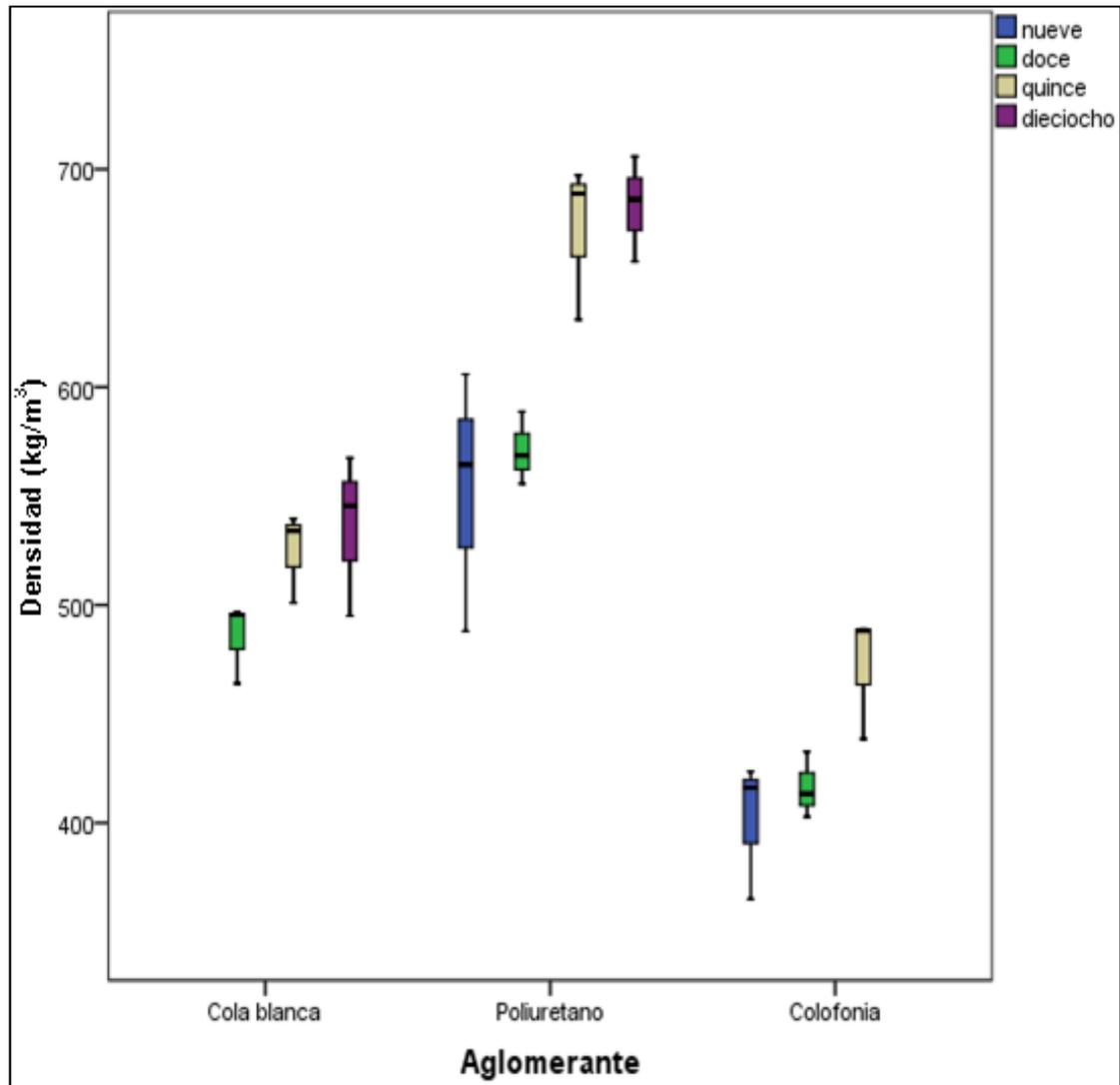
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Distribución de los resultados experimentales del porcentaje de humedad según el tipo de aglomerante**



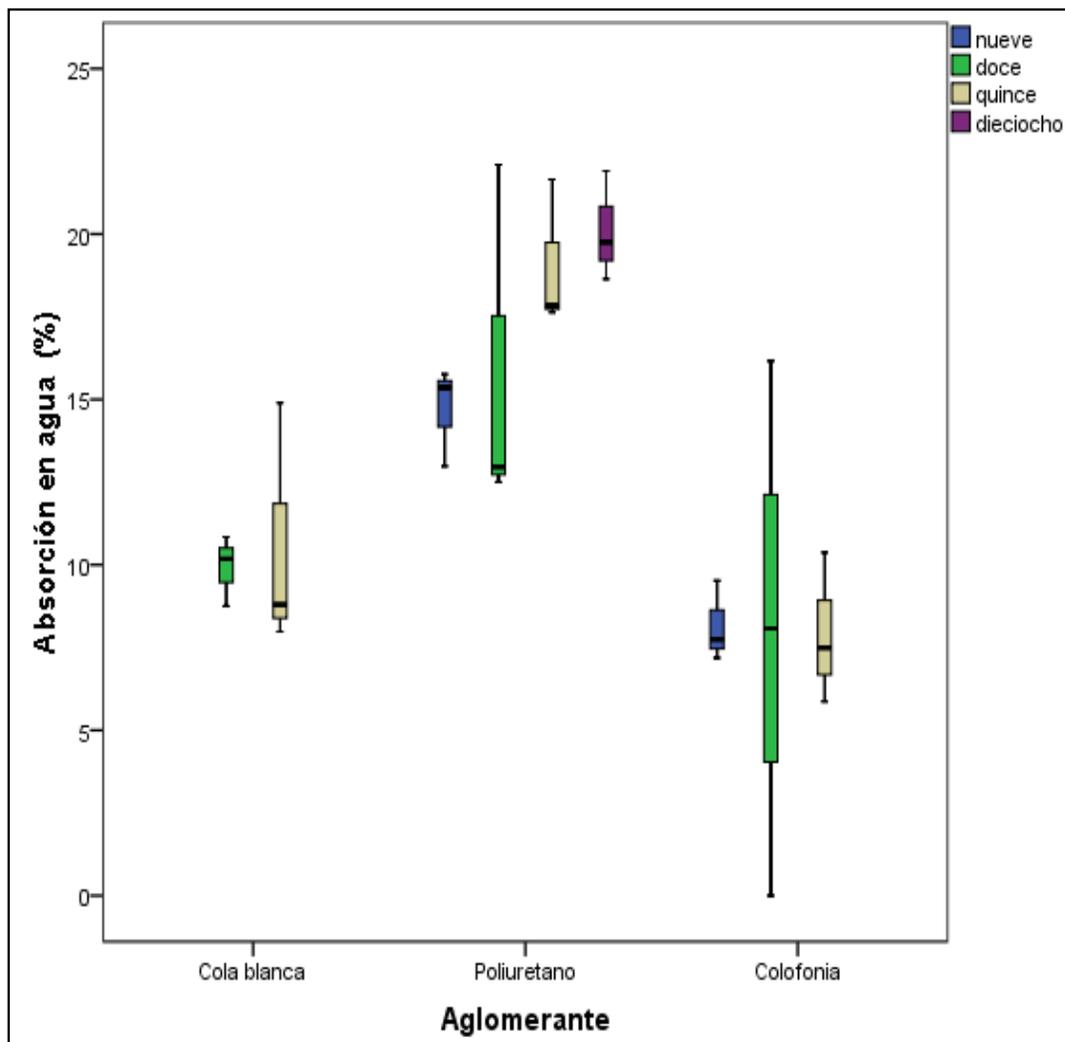
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Distribución de los resultados experimentales de la densidad según el tipo de aglomerante**



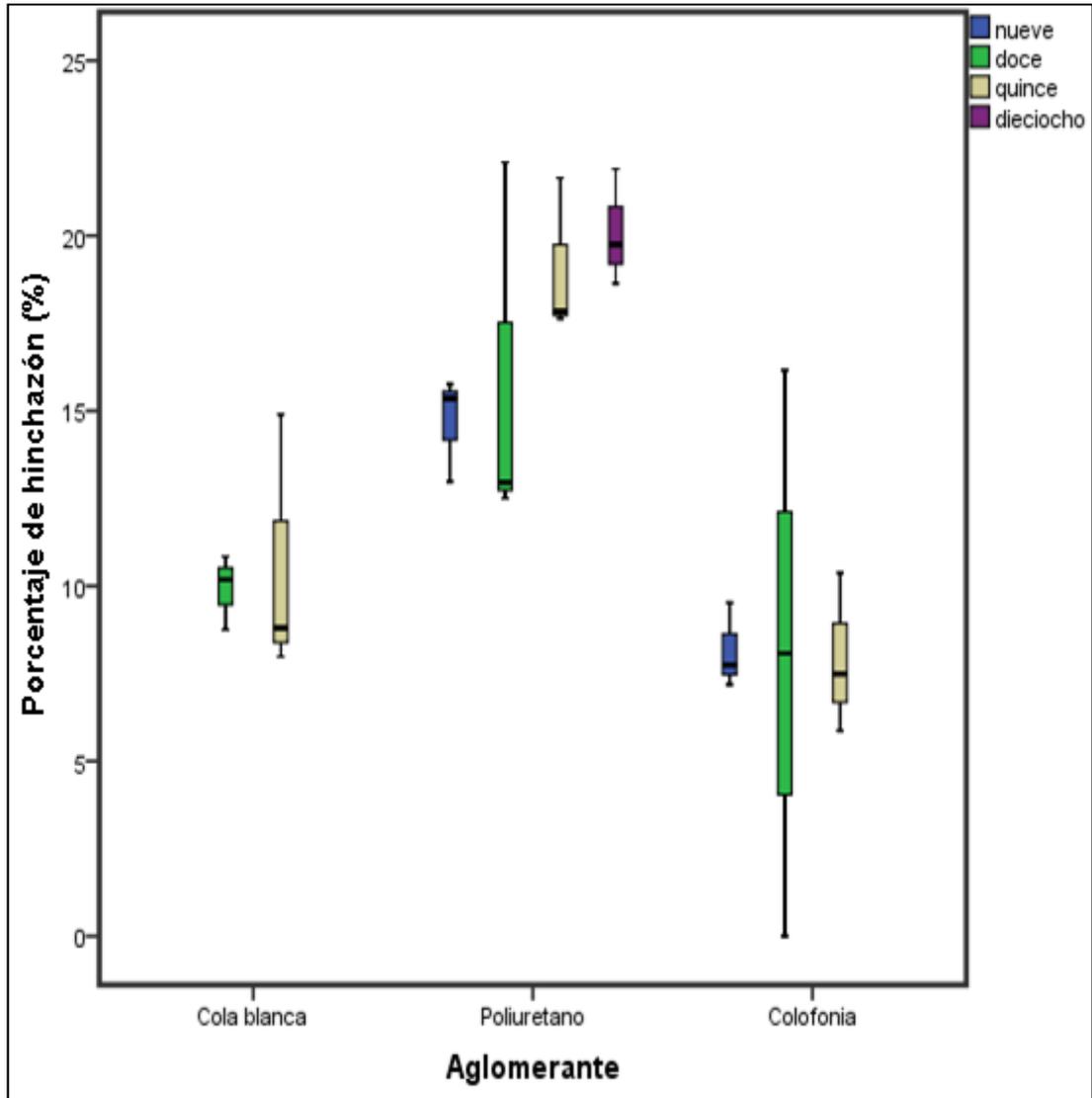
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Distribución de los resultados experimentales del porcentaje de absorción en agua según el tipo de aglomerante**



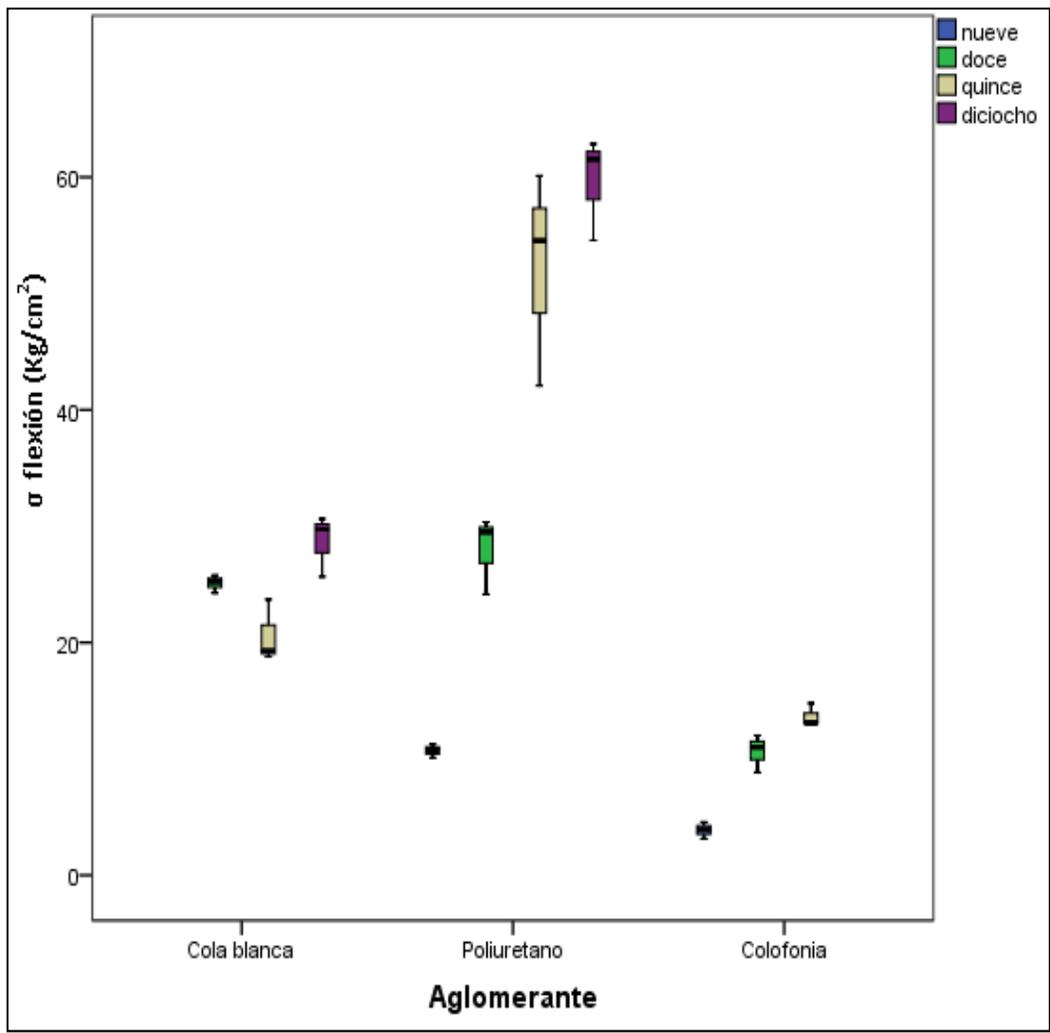
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Distribución de los resultados experimentales del porcentaje de hinchazón según el tipo de aglomerante**



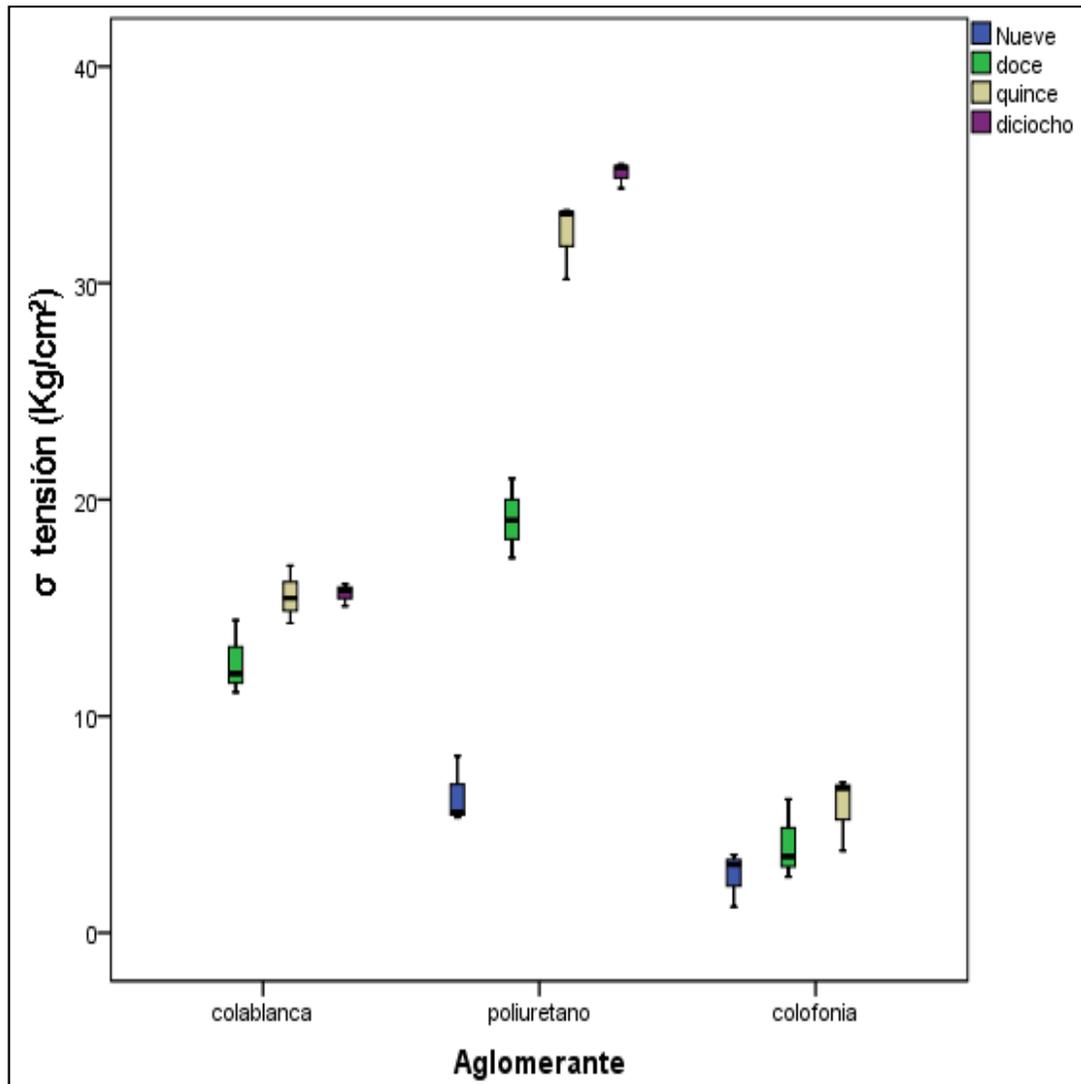
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Distribución de los resultados experimentales del esfuerzo de flexión según el tipo de aglomerante**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Distribución de los resultados experimentales del esfuerzo de tensión según el tipo de aglomerante**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Fotografías de la experimentación**

Primera fila-izquierda: trozas de palo blanco. Derecha: secado natural de partícula grande. Segunda fila-izquierda: mezcladora utilizada. Derecha: molde utilizado para hacer los tableros



Continuación del apéndice 20.

Primera fila: equipo para el prensado. Segunda fila-izquierda: prensado de tablero. Derecha: colocación de molde para el prensado



Continuación del apéndice 20.

Primera fila-izquierda: llenado de molde. Derecha: tablero de cola blanca (PVAc) al 15% de adhesivo. Segunda fila-izquierda: prensado de tablero de poliuretano al 18%. Derecha: tablero de colofonía al 15%



Continuación del apéndice 20.

Primera fila: secado de tableros con contrapeso  
Segunda fila: secado de tableros



Continuación del apéndice 20.

Primera fila: tablero de poliuretano sin pretratamiento.  
Segunda fila: tablero de colofonía sin pretratamiento



Continuación del apéndice 20.

Primera fila-izquierda: cepillado de tablero de poliuretano con pre-tratamiento. Derecha: corte de probetas en cierra circular. Segunda fila-izquierda: juego de probetas de tableros para ensayos. Derecha: secado de probetas en cámara de secado y monitoreo



Continuación del apéndice 20.

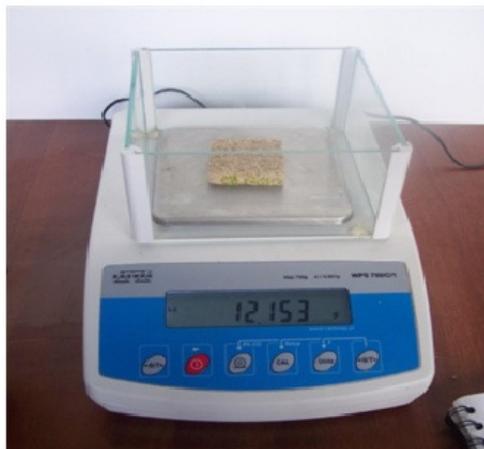
Primera fila: Ensayo de tensión en el laboratorio de la sección de metales y productos manufacturados del CII.

Segunda fila: probetas después del ensayo de tensión.



Continuación del apéndice 20.

Primera fila-izquierda: medición de probetas con vernier. Derecha: probetas para ensayo de determinación de densidad y humedad. Segunda fila-izquierda: secador utilizado para ensayo de determinación de humedad y densidad. Derecha: medición de masa de probetas para ensayo de humedad y densidad



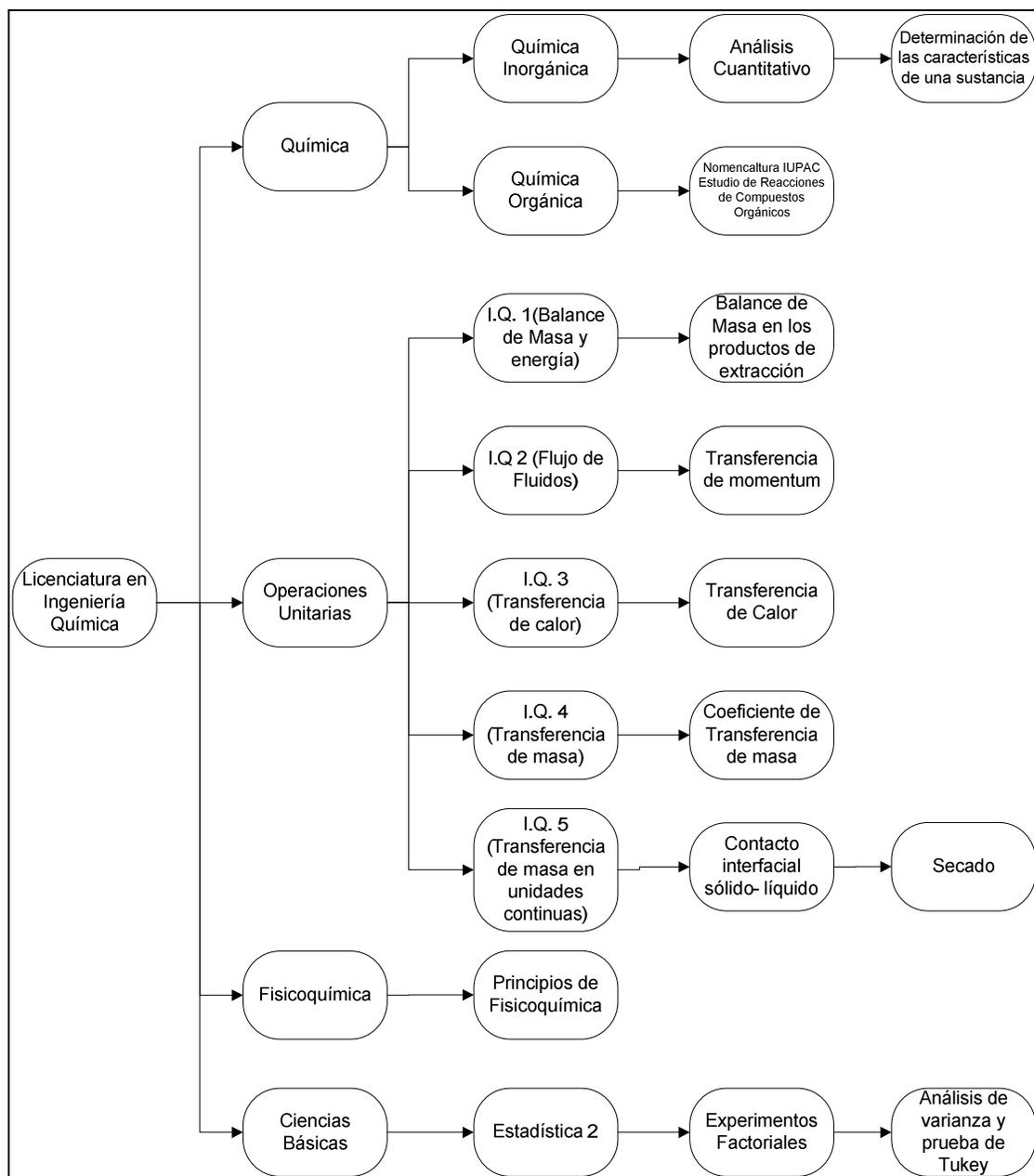
Continuación del apéndice 20.

Primera fila: ensayo de hinchazón y absorción en agua por inmersión total. Segunda fila-izquierda: probeta de cola blanca (PVAc) al 18% de aglomerante postensayo de hinchazón y absorción en agua por inmersión total. Derecha: restos de probetas de tableros de cola blanca (PVAc) al 18% en el ensayo de hinchazón y absorción en agua por inmersión total



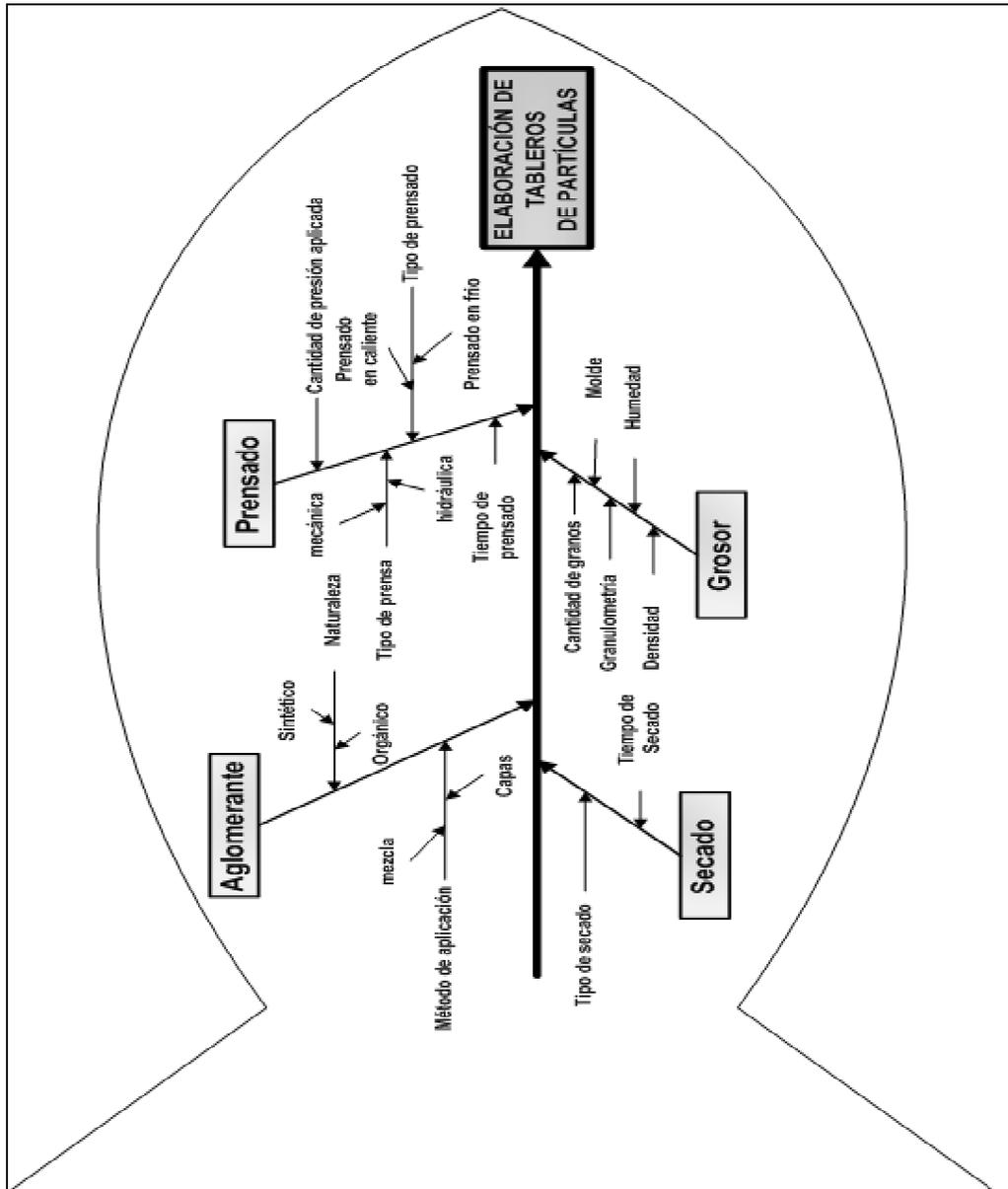
Fuente: Taller de carpintería, sección tecnología de la madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 21. **Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de tableros aglomerados en la carrera de Ingeniería Química**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. Diagrama de Ishikawa para la elaboración de tableros de partículas



Fuente: elaboración propia.