



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

## BIOCOMPUESTOS BASADOS EN POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y SUBPRODUCTO DE MADERA: EFECTO DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO EN MATERIALES

Presenta

Jesús Francisco Coronado Ruíz

Hermosillo, Sonora

Diciembre 2023

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 08 de diciembre de 2023.

**DR. PAUL ZAVALA RIVERA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO**  
**INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional "BIOCOMPUESTOS BASADOS EN POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y SUBPRODUCTO DE MADERA: EFECTO DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL", presentada por:

**JESÚS FRANCISCO CORONADO RUÍZ**

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

**INGENIERO EN MATERIALES**

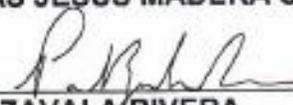
08/12/2023

Fecha



DR. TOMAS JESUS MADERA SANTANA

08/12/2023



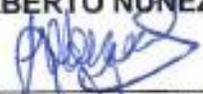
DR. PAUL ZAVALA RIVERA

08/12/2023



DR. LUIS ALBERTO NÚÑEZ RODRÍGUEZ

08/12/2023



DR. ALEJANDRO VALENZUELA SOTO

## DEDICATORIAS

Agradezco a dios por permitirme terminar una etapa de mi vida.

Agradezco a mis padres Ana Alicia y Jesús Humberto, por qué lo que soy hasta ahorita y lo que llegue a hacer será por todo lo que ustedes me han enseñado, por el apoyo que me han dado durante mi vida, infinitamente estaré agradecido, con mucho amor, muchas gracias.

A mis hermanas Jeny, Cynthia, Violeta y koala, por siempre apoyarme y confiar en mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de Sonora por permitir ser parte de mi formación académica.

A el Centro de Investigación y Desarrollo (CIAD) y el Departamento de Polímeros por el apoyo brindado en este trabajo realizado.

Agradezco especialmente al Dr. Tomas Jesús Madera Santana por la confianza brindada en el desarrollo de este trabajo, sus consejos y compartir sus conocimientos de gran valor desde mi primera estancia por parte en la UTH y hoy de la Universidad de Sonora.

Al Departamento de Ingeniería Química, Metalurgia y Materiales. Así como al Dr. Paul Zavala Rivera y Dr. Luis Alberto Núñez Rodríguez por compartir sus conocimientos en clases. Especialmente al Dr. Alejandro Valenzuela Soto por todo el apoyo recibido. Sin olvidar el apoyo brindado por el Dr. José Carmelo Encinas Encinas en el desarrollo de este proyecto en el Departamento de Materiales y Polímeros.

A todos mis maestros, del Departamento que me brindaron sus conocimientos de gran valor.

Y a mis compañeros por el gran apoyo emocional y académico que compartimos.

¡Muchas Gracias a Todos!

## INDICE DE CONTENIDO

<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	V
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	IX
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	XIII
<b>RESUMEN</b> .....	XIV
<b>ABSTRACT</b> .....	XV
<b>I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Particulares.....	5
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	6
2.1 Generación de Residuos Sólidos a Nivel Internacional.....	7
2.2 Residuo de Madera .....	7
2.2.1 Lignocelulosa .....	7
2.3. Madera .....	8
2.3.1 Clasificación de la Madera .....	9
2.3.2 Estructura de la Madera .....	10
2.3.3 Estructura Fibrosa .....	10
2.3.4 Estructura de las Celdas .....	11
2.4 Polímeros .....	12
2.4.1 Polietileno de Alta Densidad.....	13
2.5 Concepto de Materiales Compuestos .....	15

2.5.1 Biocompuestos.....	15
2.6 Reforzamiento con Fibras Celulósicos a Polímeros .....	16
2.7 Importancia de las Fuentes de Biopolímeros en el Medio Ambiente.....	17
2.8 Biocompuesto de Madera Plástica .....	18
2.9 Tratamiento Superficial a Subproducto de Madera .....	19
2.9.1 Tratamiento Alcalino.....	20
2.9.2 Tratamiento Superficial con Quitosano .....	21
2.9.3 Tiramiento Superficial con Ácido Esteárico .....	22
2.10 Procesamiento de Biocompuestos .....	23
2.10.1 Extrusión .....	23
2.10.2 Moldeo por Compresión .....	24
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1. Material.....	26
3.2 Caracterización del Subproducto de Madera .....	27
3.2.1 Análisis Granulométrico.....	27
3.2.2 Determinación de Humedad.....	28
3.2.3 Determinación de Cenizas .....	29
3.2.4 Determinación de Proteínas .....	30
3.3 Modificación Superficial del Subproducto de Madera.....	32
3.3.1 Tratamiento Alcalino con Hidróxido de Sodio.....	32
3.3.2 Tratamiento Superficial con Quitosano .....	33
3.3.3 Tiramiento Ácido Esteárico.....	34
3.4 Procesamiento del Biocompuesto .....	36
3.4.1 Mezcla de Formulaciones del Biocompuesto .....	36

3.4.2 Extrusión del Biocompuesto .....	38
3.4.3 Termocompresión del Biocompuesto .....	39
3.5 Caracterización del Subproducto de Madera y del Biocompuesto .....	40
3.5.1 Microscopía Óptica .....	40
3.5.2 Determinación de Color .....	40
3.5.3 Absorción de agua de los Biocompuestos.....	41
3.5.4 Espectroscopia de Infrarroja con Transformada de Fourier .....	42
3.5.5 Propiedades Mecánicas de los Biocompuestos .....	43
3.6 Microscopía Electrónica de Barrido MEB .....	44
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>45</b>
4.1 Análisis Granulométrico del Residuo de Madera sin Tratamientos .....	46
4.1.2 Análisis Proximal Subproducto de Madera .....	47
4.1.3 Contenido de Humedad, Cenizas y Proteínas.....	47
4.2 Microscopía Óptica del Subproducto de Madera y Biocompuestos.....	48
4.2.1 Subproducto de Madera .....	48
4.2.2 Biocompuesto.....	50
4.3 Colorimetría de los Biocompuestos .....	52
4.4 Absorción de Agua .....	53
4.5 Espectroscopia de Infrarroja con Transformada de Fourier .....	55
4.6 Propiedades Mecánicas de los Biocompuestos .....	58
4.7 Microscopía Electrónica de Barrido MEB .....	61
<b>V.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
5.1 Conclusiones.....	65
5.2 Recomendaciones.....	66

<b>VI.REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>VII. ANEXOS.....</b>	<b>82</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina de la pared celular vegetal (Arnoldi et al., 2020) .....	8
Figura 2. Composición de la madera (Askeland, 2017) .....	11
Figura 3. Clasificación de los termoplásticos de acuerdo con su consumo global (Gilbert, 2017) .....	12
Figura 4. Estructura química del monómero de etileno (Salme et al., 2015) .....	14
Figura 5. Estructura de, a) polietileno de baja densidad, b) Polietileno lineal de baja densidad, c) Polietileno de alta densidad .....	14
Figura 6. Estructura del ácido esteárico (Kokta et al., 1990) .....	23
Figura 7. Equipo de extrusor de polímeros (Bengtsson, 2005) .....	24
Figura 8. Proceso de termocompresión de un polímero (Johnson, 2008) .....	24
Figura 9. Imagen de materiales, a) subproducto de madera, b) polietileno de alta densidad .....	26
Figura 10. Diagrama de flujo de análisis proximal del subproducto de madera ....	27
Figura 11. Análisis granulométrico subproducto de madera, a) tamizador de mallas, b) subproducto de madera en malla Tyler .....	29
Figura 12. Determinación de humedad del subproducto de madera en contenedores de aluminio a 60 °C.....	29
Figura 13. Imágenes del procedimiento de la determinación de cenizas a) muestras de subproducto madera residuo de madera en crisoles cerámicos pre incinerados en parrilla de resistencia eléctrica, b) muestras pre incineradas en deshumidificador, c) calcinación de las muestras en la mufla.....	30

Figura 14. Imágenes de la determinación de proteínas, a) digestión de residuo de madera en solución con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> concentrado, b) equipo de destilación y c) equipo de titulación.....	31
Figura 15. Diagrama de flujo para la aplicación de los tratamientos de modificación superficial.....	32
Figura 16. Tratamiento superficial subproducto de madera, a) colocación de la solución de NaOH a 2%, b) agitación de la solución a temperatura ambiente y c) secado de la muestra.....	33
Figura 17. Imágenes del tratamiento superficial con quitosano, a) subproducto de madera en matraz Erlenmeyer en expuesto en solución de quitosano disuelto en ácido acético, b) contenedor de aluminio con la muestra tratada para el secado.....	34
Figura 18. Imágenes del tratamiento con ácido esteárico, a) etanol al 1 % en agitación, b) subproducto de madera en solución de ácido esteárico disuelto en etanol al 1 % y c) subproducto de madera tratada en contenedor de aluminio.....	35
Figura 19. Diagrama de flujo para la producción de las mezclas de las formulaciones de los biocompuesto; subproducto de madera sin tratamientos CMP 7.5, subproducto de madera con tratamiento alcalino CMP NaOH, subproducto de madera con tratamiento de quitosano, subproducto de madera con tratamiento de ácido esteárico CMP ácido esteárico. ....	36
Figura 20. Imágenes de la preparación de las formulaciones, a) PEAD virgen y subproducto de madera, b) mezclado, c) compuestos después de ser agitados, d) tolva de alimentación del extrusor.....	37
Figura 21. Imágenes del procesamiento de los biocompuestos, a) extrusor monohusillo, b) tolva alimentada por subproducto de madera y PEAD, c)	

filamentos obtenidos de los biocompuesto y d) equipo de producción de pellets.....	38
Figura 22. Imágenes de la laminación de los biocompuestos, a) prensa térmica para el moldeo de los laminados, b) pellets de biocompuesto de madera plástica en molde de acero inoxidable, c) laminados del biocompuesto de madera plástica obtenidos.....	39
Figura 23. Imagen del microscopio óptico digital utilizada para el análisis de muestra de partículas de subproducto de madera.....	40
Figura 24. Equipo de medición de Color.....	41
Figura 25. Medición de la absorción de agua de los biocompuestos, a) muestra de biocompuesto de madera plástica en el contenedor con agua, b) muestras sumergidas en agua.....	42
Figura 26. Espectroscopia de infrarrojo con trasformada de fourier, a) Con el accesorio de reflexión total atenuada (ATR-FTIR), b) muestra de subproducto de madera previo a análisis.....	43
Figura 27. Propiedades mecánicas a tensión de los biocompuestos, a) máquina universal, b) probeta en fallo, c) probetas de biocompuestos de madera plástica con tratamientos de ácido esteárico, hidróxido de sodio y quitosano.....	44
Figura 28. Análisis granulométrico subproducto de madera versus el intervalo de tamices.....	46
Figura 29. Imágenes por microscopia óptica a 5x, de las partículas de madera: a) subproducto sin tratamiento malla 60, b) subproducto con tratamiento alcalino, c) subproducto con tratamiento con quitosano, d) subproducto con tratamiento con ácido esteárico.....	49

Figura 30. Imágenes por microscopía óptica a 5x, de los biocompuestos: a) PEAD, b) PEAD y subproducto madera con tratamiento sin tratamientos, b) PEAD y subproducto madera con tratamiento alcalino, c) PEAD y subproducto madera con tratamiento alcalino, d) PEAD y subproducto madera con tratamiento con quitosano, e) PEAD y subproducto madera con tratamiento con ácido esteárico.....	51
Figura 31. Curvas de absorción de agua de los biocompuestos.....	54
Figura 32. Espectroscopia de infrarrojo por reflexión total atenuada FTIR-ATR del PEAD y los biocompuestos formulados.....	57
Figura 33. Curva esfuerzo-deformación del PEAD y los biocompuestos con y sin tratamiento.....	59
Figura 34. Imágenes del microscopio electrónico de barrido. A) PEAD, b) biocompuesto con 7.5 % de subproducto de madera sin tratamientos, c) biocompuesto con tratamiento alcalino, d) biocompuesto con tratamiento de quitosano, e) biocompuesto con tratamiento de ácido esteárico.....	62

## INDICE DE TABLAS

Tabla I. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en maderas suaves y duras (Singh et al., 2014) .....	9
Tabla II. Propiedades mecánicas, térmicas del polietileno de baja densidad y de alta densidad (Askeland, 2017; Kurtz, 2016) .....	15
Tabla III. Formulaciones del biocompuesto de PEAD y partículas de subproducto de madera.....	37
Tabla IV. Análisis proximal del subproducto de madera.....	47
Tabla V. Valores de los parámetros de color del biocompuesto.....	53
Tabla VI. Valores de los parámetros mecánicos a tensión del PEAD y los biocompuestos formulados.....	59

## RESUMEN

Hoy en día, la gran acumulación de los desechos derivados de los plásticos se ha convertido en un serio problema. El uso de biopolímeros puede ser una opción posible de solución; sin embargo, sus propiedades no son comparables a la de los polímeros derivados del petróleo. Por consecuencia, la adición de fibras o partículas naturales a matrices poliméricas mejoran algunas propiedades. Sin embargo, estas fibras o partículas requieren de diferentes tratamientos superficiales, para mejorar su interacción con la matriz polimérica. Hoy en la actualidad, existen residuos y subproductos industriales y agroindustriales que no son aprovechados; uno de éstos es el subproducto de madera (aserrín de pino). El objetivo de esta investigación fue comprobar si el subproducto de madera, sometido a diferentes tratamientos superficiales, podría mejorar las propiedades mecánicas cuando son incorporadas a la matriz de polietileno de alta densidad (PEAD). Se realizó el análisis proximal del subproducto de madera, encontrándose que la humedad fue de 20.07%, contenido de proteínas de 0.889% y de cenizas de 4.46%. Los tratamientos superficiales al subproducto de madera fueron alcalinos (hidróxido de sodio al 2% por 2 h con una relación 25 mL/g); posteriormente, un tratamiento con quitosano en solución (ácido acético al 2% por 3 h con una relación sólido:líquido 1:6) y el tratamiento con ácido esteárico en solución (etanol al 1% por 3 h con una relación sólido:líquido 1:5). Estos tratamientos fueron aplicados al subproducto de madera modificando la superficie; además permitieron la limpieza del material de impurezas (tierra y suciedad) y removieron algunos componentes propios del subproducto de madera (ceras, sílice, gomas, hemicelulosa y lignina). El método de procesamiento fue por extrusión y posteriormente termoformados con 7.5% de subproducto de madera. Las imágenes MEB de los biocompuestos confirma la modificación de la superficie de las partículas de madera de mejora la unión interfacial. Las propiedades mecánicas a tensión presentaron una disminución en el % a la elongación a la ruptura, respecto al PEAD, y un aumento en el módulo elástico de las formulaciones. Los tratamientos superficiales con quitosano y ácido esteárico aportaron grupos  $\text{OH}$  que interactuaron con las cadenas de PEAD.

## ABSTRACT

Today, the large accumulation of waste derived from plastics has become a serious problem. The use of biopolymers could be a possible solution option; however, their properties are not comparable to those of petroleum-derived polymers. Consequently, the addition of natural fibers or particles to polymer shades improves some properties. However, these fibers or particles require different surface treatments to improve their interaction with the polymer matrix. Nowadays, there are industrial and agro-industrial waste and by-products that are not used; one of these is wood byproduct (pine sawdust). The objective of this research was to verify whether the wood by-product, subjected to different surface treatments, could improve the mechanical properties when incorporated into the high-density polyethylene (HDPE) matrix. The proximal analysis of the wood byproduct was carried out, finding that the moisture content was 20.07%, protein content was 0.889%, and ash content of 4.46%. The surface treatments of the wood by-product were alkaline (2% sodium hydroxide solution for 2 h with a ratio of 25 mL/g); Subsequently, a treatment with chitosan in solution (2% acetic acid for 3 h with a 1:6 solid:liquid ratio) and treatment with stearic acid in solution (1% ethanol for 3 h at a 1:5 solid:liquid ratio). These treatments were applied to the wood by-product, modifying its surface. They also allowed the material to be cleaned of impurities (earth and dirt) and removed some components of the wood by-product (waxes, silica, gums, hemicellulose, and lignin). The processing method was by extrusion and then thermoformed with 7.5% wood by-product. SEM images of the biocomposites confirmed the surface modification of the wood particles to improve interfacial bonding. The tensile mechanical properties showed a decrease in the % elongation at break, with respect to HDPE, and an increase in the elastic modulus of the formulations. The surface treatments with chitosan and stearic acid provided -OH groups that interacted with the HDPE chains.

## **I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## 1.1 Introducción

Los polímeros de origen sintéticos se consideran uno de los grandes avances del siglo XX, debido a la gran versatilidad de las posibles aplicaciones que pueden aportar en la vida diaria. En la actualidad, los biopolímeros son obtenidos principalmente del petróleo y son usados para diversas aplicaciones (López et al., 2011). Sin embargo, la alta resistencia a la corrosión, al agua y a la descomposición bacteriana, los convierte en residuos difíciles de eliminar y consecuentemente, en un grave problema ambiental. El reciclado no es la solución para todos los plásticos. Por lo anterior, a lo largo de los años se han buscado alternativas para resolver estos problemas ambientales.

Los polímeros naturales o biopolímeros como la celulosa son considerados una buena alternativa a la solución del problema, ya que en su mayor parte proceden de recursos renovables, se convierten en una interesante alternativa para la industria de los plásticos (Chávez et al., 2013). Estos biopolímeros pueden incorporarse en matrices termoplásticas como el PEAD (Polietileno de alta densidad) y procesarse mediante las mismas técnicas convencionales, tales como extrusión, inyección o soplado (Villada et al., 2007). Así, los polímeros basados en subproductos mezclados con plásticos sintéticos o fibras naturales producen materiales compuestos de alto valor agregado.

Las mezclas de los polímeros con fibras naturales son tema de interés actual, para muchos investigadores tanto a nivel académico, como a nivel industrial. La mayor parte de la investigación reciente está relacionada con los materiales compuestos de poliolefinas y fibras lignocelulosas (Gopakumar et al., 2012; Wu et al., 2013). Paul et al. (2008) mostraron la importancia de la adhesión entre las fases en las propiedades mecánicas de los materiales reforzados con fibras cortas de plátano. En las últimas décadas, varios autores han reportado las propiedades fisicoquímicas de compuestos basados en polímero biodegradables y biopolímeros de fuentes renovables

Aunque se ha reportado la mejora de las propiedades fisicoquímicas en los biocompuestos reforzados con fibras naturales; no todas las fibras utilizan agentes de acoplamiento que ayudan a mejorar la interacción entre las fibras y la matriz polimérica creando diferentes reacciones. Por otro lado, estos agentes acoplantes puede ser tóxicos y contaminantes para el medio ambiente; por lo que se busca alternativas para el uso de éstos. Las opciones que se han tomado para descartar estos químicos, es modificar las superficies de las fibras mediante diversos tratamientos, que puede ser tratamiento biológico, químicos físicos, fisicoquímica, y mecánicos. Aunque cada uno de estos tiene sus ventajas y desventajas, como conocer el tratamiento a utilizar y las fibras a modificar, ya que hay una gran variedad de fibras procedentes de subproductos industriales y agroindustriales que pueden ser utilizados.

El subproducto de madera, como el aserrín, es uno de los residuos agroindustriales más abundantes a nivel mundial. Eso se debe a que la madera de pino es unas de las especies más cultivadas en el mundo y su producción anual en México se estima en alrededor de 2.8 millones de metros cúbicos de desechos forestales, principalmente en forma de aserrín, leñas, virutas y cortezas (Fregoso et al., 2017). Estos pueden representar 40 a 48% del volumen total que ingresa a un aserradero (Haro et al., 2015). El aprovechar estos residuos constituye una necesidad para disminuir los impactos ambientales que generan.

Se ha reportado el uso y la investigación de biocompuestos de madera plástica, a partir de mezclas de plásticos reciclados y vírgenes (polietileno, polipropileno y poliestireno) con partículas, fibras o polvos de madera de aserrín, extruidos o moldeados. Los cuales han mostrado un creciente interés en el diseño y producción de nuevos productos que se transforman en una alternativa para reciclar plásticos y aprovechar el aserrín que se da como desecho del proceso de madera en industrias mueblerías (Yeh et al., 2009). El objetivo del presente trabajo es fabricar un biocompuesto de polietileno de alta densidad y partículas de subproducto de madera de pino, obtenido mediante un proceso de extrusión y termocompresión; así

como de evaluar el efecto de los tratamientos superficiales en las propiedades mecánicas de los biocompuestos obtenidos.

## **1.2 Justificación**

El problema ambiental ocasionado por los plásticos derivados del petróleo está alcanzando grandes dimensiones, se ha buscado diferentes alternativas para reducir su consumo; así como, el uso de otros materiales como los biopolímeros. Sin embargo, éstos solo presentan algunas propiedades que son capaces de competir al mismo nivel del polímero derivados del petróleo. Por lo que la alternativa, es incorporar residuos agroindustriales, como los subproductos de la madera, a matrices termoplásticas como el PEAD para producir biocompuestos. Los biocompuestos permiten que los materiales no sean 100% plástico, sino que una fracción de volumen es fuente natural (subproducto agroindustrial). Para mejorar las propiedades fisicoquímicas de un biocompuesto, es necesario realizar tratamientos superficiales al residuo agroindustrial que permitan una mejor interacción entre la matriz y la fibra o partícula natural, esto con el fin de mejorar su compatibilidad. Estos tratamientos superficiales pretenden modificar la estructura de los compuestos lignocelulósicos, mediante procesos como la hidrólisis; así como de proveer otras características a la superficie del subproducto agroindustrial. En este sentido, este trabajo reporta el tratamiento superficial de subproductos de madera, mediante la hidrólisis alcalina, la impregnación de quitosano y de ácido esteárico, ambos en solución. Estos tratamientos tienen la finalidad de obtener grupos funcionales libres que puedan interaccionar con las cadenas de PEAD.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Elaborar y caracterizar biocompuestos a partir de PEAD y subproducto de madera con diferentes tratamientos superficiales, con la finalidad de mejorar sus propiedades fisicoquímicas.

### **1.3.2 Objetivos Particulares**

1. Caracterizar el subproducto de madera de pino, mediante su análisis proximal y granulométrico.
2. Procesar biocompuestos basados en subproducto de madera y PEAD por extrusión.
3. Procesar biocompuestos por el método de termocompresión para la obtención de laminados de biocompuesto.
4. Evaluar el efecto del tratamiento superficial al subproducto de madera en las propiedades fisicoquímicas del biocompuesto obtenido.

## **II. ANTECEDENTES**

## **2.1 Generación de Residuos Sólidos a Nivel Internacional**

Para 2030, se espera que el mundo genere 2.590 millones de toneladas de residuos anualmente. Para 2050, la generación de residuos en todo el mundo espera que alcance los 3.400 millones de toneladas. Cuyo origen está distribuido en tres regiones principales; Asia oriental, Europa, Asia central, América del Norte. Así mismo, América Latina y el Caribe es una región conformada por 42 países, contribuyó con la generación de residuos sólidos, (Kaza et al., 2018).

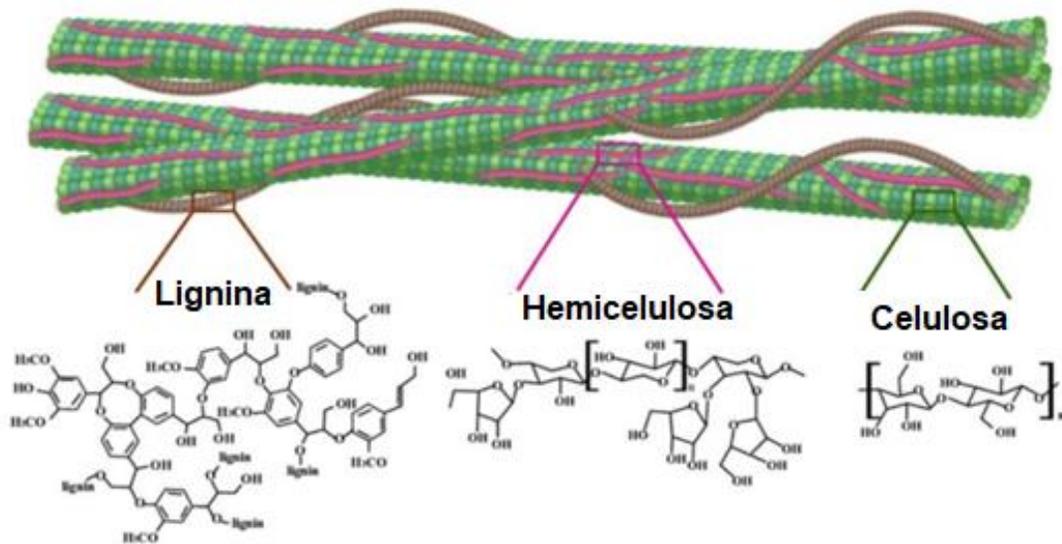
## **2.2 Residuo de la Madera**

La madera es la fuente de lignocelulosa renovable más abundante. Consiste principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Los porcentajes de estos componentes dependen de varios factores, tanto ambientales como de origen o incluso la edad de la especie (Zoia et al., 2011). También contiene cantidades variables de componentes orgánicos no estructurales de bajo peso molecular llamados extractivos y componentes minerales (Simões et al., 2014).

### **2.2.1 Lignocelulosa**

La biomasa lignocelulosa, es una de las fuentes de carbono renovable con mayor abundancia en la tierra (Azizah et al., 2020). Este es el componente principal de la estructura de las plantas, y está compuesto por tres biopolímeros, que son celulosa y hemicelulosa, y un polímero aromático, que es la lignina. Estos se encuentran organizados estructuralmente y entrelazados entre sí, dificultando la accesibilidad a cada uno de los diferentes componentes (Isikgo et al., 2015; Azizah et al., 2020). El material de lignocelulósico se encuentra principalmente constituido por tejidos vegetales, cuyas células presentan una pared celular compuesta por un entramado de microfibras de celulosa, formando capas recubiertas de hemicelulosa sobre las cuales se deposita la lignina (Figura 1). En la pared celular de la planta, la lignina

actúa como un pegamento celular entre las fibras de celulosa y se une covalentemente con la hemicelulosa, mejorando así su fuerza y rigidez. Además, al ser de naturaleza aromática y relativamente hidrófoba, la lignina actúa como un agente antimicrobiano e impermeabilizante (Hatti-kau et al., 2013; Olajuyigbe et al., 2018; Azizah et al., 2020).



**Figura 1.** Representación esquemática de fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina de la pared celular vegetal (Arnoldi et al., 2020).

### 2.3 Madera

La madera es un material que se encuentra como principal contenido del tronco de un árbol. Los árboles se caracterizan por tener troncos que crecen cada año y que están compuestos por fibras de celulosa unidas con lignina. La madera es un material muy resistente y con abundancia natural; por lo que es utilizada ampliamente por los humanos desde tiempos muy remotos. La madera es un material compuesto de origen natural y es uno de los materiales más comunes. A pesar de que no se trata de un material de “alta tecnología”, estamos prácticamente rodeados de madera en nuestros hogares, y la valoramos por su belleza y durabilidad. Además, es un material resistente y ligero que sigue predominando en gran parte de la industria de la construcción (Askeland, 2017).

### 2.3.1 Clasificación de la Madera

La madera se clasifica en dura o blanda según su estructura física y el tipo de planta, de la cual procede no solo se refiere a la facilidad con la que se puede procesar o manejar. La madera dura proviene de plantas angiospermas entre ellas se encuentra la especie del encino; la madera suave proviene de plantas gimnospermas. La composición química de la madera varía de acuerdo con el tipo de madera a partir de la cual es generado. En la Tabla I muestra algunos porcentajes reportados de composición de madera (Singh et al., 2011).

Las maderas duras provienen de árboles como roble, fresno, olmo, haya, abedul, nogal y arce. En estos árboles, las celdas alargadas son relativamente cortas, con un diámetro de menos de 0.1 mm y una longitud de menos de 1 mm. Dentro de la madera existen poros longitudinales, o vasos, que transportan el agua por todo el árbol.

Las maderas blandas son las coníferas, árboles perennes como el pino, el abeto rojo, el pinabete, el abeto blanco y el cedro, que tienen estructuras similares. En las maderas blandas las celdas tienden a ser algo más largas que en las maderas duras. El centro hueco de las celdas es el responsable de transportar el agua. En general, la densidad de las maderas blandas tiende a ser inferior a la de las maderas duras, debido a un mayor porcentaje de espacios huecos (Askeland, 2017).

**Tabla I.** Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en maderas suaves y duras (Singh et al., 2011).

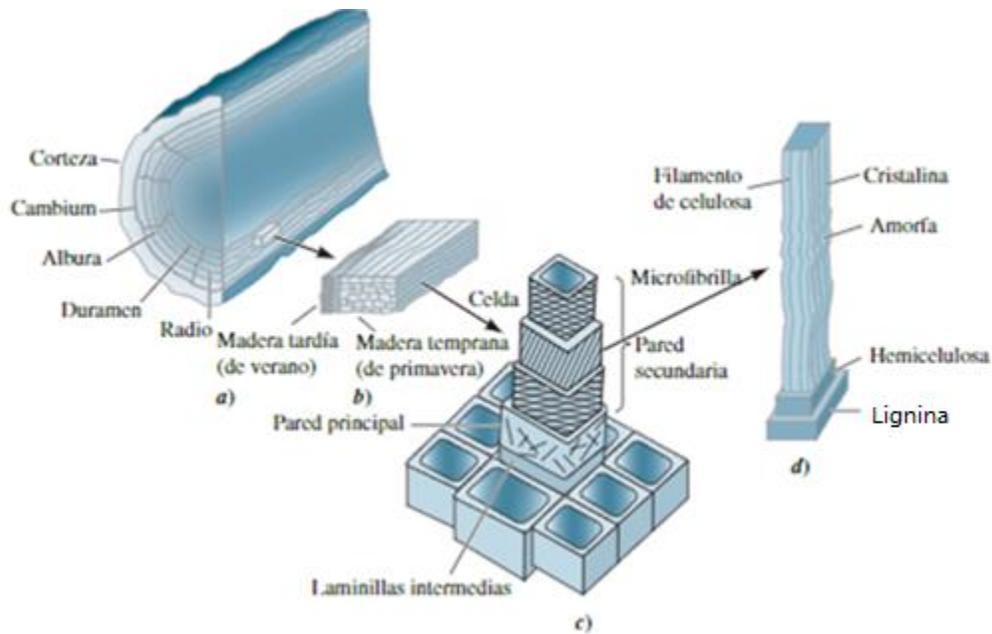
<b>Tipo de madera</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Celulosa (%)</b>	<b>Hemicelulosa (%)</b>
<b>Maderas suaves</b>	<b>25-35</b>	<b>40-50</b>	<b>25-35</b>
<b>Maderas duras</b>	<b>18-30</b>	<b>48-55</b>	<b>24-40</b>

### **2.3.2 Estructura de la Madera**

La madera se puede considerarse como un material compuesto complejo natural, reforzado con fibras y formado de células poliméricas largas, tubulares y alineadas en una dirección dentro de una matriz polimérica. Además, los tubos poliméricos están formados por paquetes de fibras de celulosa parcialmente cristalina, alineados en varias direcciones en relación con el eje de los tubos. Esta disposición brinda excelentes propiedades a la tensión en la dirección longitudinal (Askeland, 2017).

### **2.3.3 Estructura Fibrosa**

El componente básico de la madera es la celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) organizada, con las regiones cristalinas separadas por pequeños tramos de celulosa amorfa. Un paquete de cadenas de celulosa está recubierto por una capa de cadenas de la hemicelulosa amorfa, con cadenas aleatoriamente orientadas. Por último, la hemicelulosa está cubierta de lignina. Todo el paquete formado por cadenas de celulosa, cadenas de hemicelulosa y lignina se conoce como microfibrillas; esta puede alcanzar una longitud prácticamente infinita. La estructura de la madera se presenta en la (Figura 2). La madera está compuesta de las siguientes partes: a) macroestructura, que incluye una estructura, en capas bordeadas por anillos de crecimiento anual, b) detalle de la estructura de la celda dentro de un anillo de crecimiento anual, c) estructura de una celda, que incluye varias capas formadas por microfibrillas de fibras celulósicas, de fibras de la hemicelulosa y lignina, y d) cadenas de celulosa alineadas, parcialmente cristalinas, existen en las microfibrillas (Askeland, 2017).



**Figura 2.** Composición de la madera (Askeland, 2017).

### 2.3.4 Estructura de las Celdas

Un árbol está compuesto de celdas alargadas, con frecuencia con una proporción dimensional de 100 o mayor, que constituye alrededor del 95% del material sólido de la madera. Las células huecas están formadas por varias capas construidas a partir de las microfibrillas. La primera pared, o la pared principal de la celda, contiene microfibrillas de orientación aleatoria. Conforme la pared la celda se hace más gruesa, se forma tres capas adicionales distintas. La pared exterior e interior contiene microfibrillas orientadas en dos direcciones no paralelas a la celda. La pared intermedia es la de mayor espesor, contiene microfibrillas alineadas en una sola dirección, por lo general formando un ángulo no paralelo al eje de la celda (Askeland. 2017).

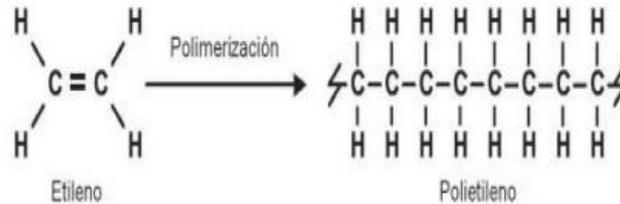


Los polímeros estándar, son materiales con alto volumen de consumo y bajo costo, los polímeros de este grupo, tienen bajas temperaturas de transición vítrea, de manera que su temperatura de servicio se encuentra a la temperatura ambiente. Los polímeros comerciales se usan mayoritariamente en embalaje y construcción. Los polímeros de ingeniería son más costosos que los comerciales. Además, presentan temperaturas de transición vítrea más altas que los polímeros comerciales, tienen buena resistencia, rigidez y tenacidad, y a menudo se usan con rellenos para mejorar sus propiedades. Los polímeros especializados o de alto desempeño, tienen costos más altos y bajo volumen de consumo en comparación con los plásticos comerciales. Poseen buenas propiedades como los polímeros de ingeniería y, se caracterizan por su excelente rendimiento en altas temperaturas (>200°C) (Gilbert, 2017). Los termoplásticos se usan en aplicaciones que van desde utensilios desechables, vestimenta, embalajes y construcción hasta ingeniería, medicina o la industria aeroespacial (Zhu et al., 2016).

#### **2.4.1 Polietileno de Alta Densidad**

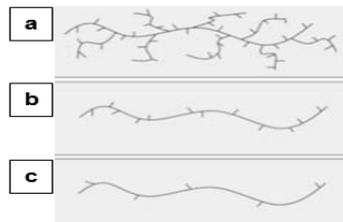
El polietileno es un polímero sintético termoplástico, que se obtiene por polimerización del etileno. Este material se caracteriza por ser parcialmente cristalino y amorfo, de color blanquecino y translúcido. Los diversos tipos de polietileno que se encuentran en el mercado, son el resultado de las diferentes condiciones de operación, llevadas a cabo en la reacción de polimerización (Roca, 2015). Se puede clasificar al polietileno en tres tipos según su densidad: baja, mediana o alta. El tipo de polietileno que es de incumbencia en este proyecto es el de alta densidad (PEAD), el cual está presente en una gran diversidad de aplicaciones y se caracteriza por ser muy versátil y rígido. Al momento de ser transformado, el PEAD se puede transformar por diversos métodos: inyección, soplado, extrusión, y termoformado (Ecoplas, 2017). El PEAD tiene muchas aplicaciones en la industria actual. Es utilizado para la fabricación de recipientes, tapas y cierres; otra porción del PEAD se destina para la producción de utensilios domésticos y juguetes; y también tiene otros usos como lo son, la producción de

tuberías y conductos construcción, aeroespacial y automotriz. Además, podemos mencionar: envases de aceite lubricante, disolventes orgánicos y combustibles, botellas, bolsas de plástico entre otros. El polietileno se produce a partir del monómero de etileno, como se observa en la (Figura 4), el etileno es un gas derivado del petróleo, que se alimenta a un reactor con catalizadores y otros reactivos para la polimerización (Ojeda, 2011).



**Figura 4.** Estructura química del monómero de etileno (Salme et al., 2015).

En el polietileno, el átomo de carbono en vez de tener un hidrógeno unido a éstos, tiene ramificaciones de cadenas de etileno (Figura 5); a esto se le llama polietileno ramificado o de baja densidad Figura 5 (a) (PEBD o LDPE por sus siglas en inglés). Cuando no se tiene ramificación, se le llama polietileno lineal o de baja densidad (Figura 5 (b)) (LPEBD o LLDPE por sus siglas en inglés). El PEAD Figura c) (por sus siglas en inglés HDPE), presenta una densidad de 0.941 a 0.965 g/cm<sup>3</sup>. El polietileno PE tiene un costo considerablemente menor que el PEAD (Geyer, 2017). En la Tabla II Se presentan las propiedades mecánicas del PEBD y PEAD.



**Figura 5.** Estructura de, a) Polietileno de baja densidad, b) Polietileno lineal de baja densidad, c) Polietileno de alta densidad. (Askeland, 2017).

**Tabla II.** Propiedades mecánicas, térmicas del polietileno de baja densidad (PEBD) y de alta densidad (PEAD) (Askeland, 2017; Kurtz, 2016).

Propiedad	PEBD	PEAD
Resistencia a la tensión (MPa)	21	22-38
% alargamiento	800	103-500
Modulo elástico (MPa)	276	630-1241
Punto de fusión (°C)	98 - 115	130 - 137
Temperatura de transición vítrea (T <sub>v</sub> )	-90 a -25	-110
Temperatura de procesamiento (°C)	149 - 232	177 - 260

## 2.5 Concepto de Materiales Compuestos

Los materiales compuestos, se pueden definir como la mezcla de dos o más materiales que permanecen en fases separadas y que se encuentran mezclados, comportándose como un solo material, cuyas propiedades suelen ser, generalmente superiores al de los componentes por separado (Nikzad, et al., 2011). Dentro de estos se encuentran los biocompuestos, los cuales, se caracterizan porque sus componentes son de distinta naturaleza en alguna de sus propiedades. Los biocompuestos, constan fundamentalmente, de una matriz o fase continua, plástica, metálica o cerámica, y un relleno o refuerzo de material biológico, compuesto por partículas de pequeño tamaño o fibras de elevada relación longitud/diámetro. Es decir, la producción de materiales compuestos está relacionada con tres elementos básicos: matriz, refuerzo e interface.

### 2.5.1 Biocompuestos

Los biocompuestos, constan fundamentalmente de una matriz o fase continua, que puede ser plástica, metálica o cerámica; y un relleno o refuerzo de material

biológico, compuestos por partículas de pequeño tamaño o fibras de elevada relación longitud/diámetro. Es decir, la fabricación de materiales compuesto está relacionada con tres elementos básicos: matriz, refuerzo e interface. El principal atractivo que los materiales compuestos están teniendo hoy en día, es el uso de matrices poliméricas biodegradables, con lo cual estos biocompuestos al concluir su ciclo de uso, puede ser desechados para biodegradarse, es decir no causa daños al medio ambiente y exhiben propiedades mecánicas específicas aceptables (Goutianos et al., 2006; Ku et al., 2011). El uso de desechos agroindustriales ricos en lignocelulosa tales como la madera, aserrín, cáscara de coco, nuez, pistache, etc.; como material de relleno en biocompuestos ha aumentado recientemente. De tal forma, que se sustituyen las fibras sintéticas y se tiene como resultado un material de baja densidad, con buen aislamiento térmico, excelentes propiedades mecánicas, disponibilidad ilimitada, bajo precio y eliminación al final de su vida útil (Yokoyama et al 2009). Sin embargo, se menciona que existe una limitante en este caso, y es que presencia los grupos hidroxilo en las moléculas de lignocelulosa provocan una difícil interacción interracial, entre el relleno natural y la matriz polimérica; la cual ocasiona una disminución en las propiedades mecánicas de los biocompuestos elaborados (Sobczak et al., 2012).

## **2.6 Reforzamiento con Fibras Celulósicas a Polímeros**

Las fibras se pueden clasificar en naturales y sintéticas. Las naturales suelen ser las de origen vegetal, animal y/o mineral (Mokhothu et al., 2015). Las fibras sintéticas provenientes básicamente de petróleo o gas natural, y son fruto de la investigación del ser humano. El uso de fibras naturales para reforzar matrices poliméricas ha crecido en los últimos años. Las fibras biológicas o también conocidas como fibras vegetales se encuentran en las raíces, tallos, hojas, frutos y semillas. Comercialmente las fibras vegetales o fibras naturales, son clasificadas como suaves y duras (Monhanty et al., 2005). Numerosos estudios se han realizado en torno a la elaboración de nuevos materiales con una matriz polimérica reforzada con fibras naturales de origen vegetal (Shekar et al., 2018). Desde hace dos

décadas, los compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales han sido utilizados con resultados favorables; como la obtención con conglomerados para pisos en la industria de la construcción, o con partes no estructurales, como tableros de la industria automotriz.

## **2.7 Importancia de las Fuentes de Biopolímeros en el Medio Ambiente**

Los residuos sólidos (basura), constituyen uno de los grandes problemas ambientales con diferentes impactos a nivel global y local. La gestión de los residuos va más allá de su disposición; por tanto, es necesario analizar las diferentes variables, de manera que se pueda comprender la complejidad que implican los nuevos retos ambientales. Mientras las concentraciones humanas eran reducidas y los residuos eran en su gran mayoría de origen orgánico, los residuos no constituían un problema relevante (Melosi, 2005). Con el aumento de las concentraciones humanas, se fueron acumulando grandes volúmenes de residuos plásticos, cuya difícil descomposición resulta en un daño al medio ambiente, pese a no ser considerados como residuos peligrosos, los residuos plásticos tienen implicaciones ambientales significativas que suelen pasar desapercibidas, y forman parte de una problemática de gran impacto y escala. El plástico es un material de innegable utilidad, presente en infinidad de productos de uso cotidiano. Sin embargo, su alto consumo y la poca cultura del uso y desecho hacen que la generación de residuos ocurra de manera masiva y continua (Platt, 2015). En México, según el Centro Empresarial del Plástico la producción de plásticos es de 5.3 millones de toneladas, de los cuales el 50% es destinado para envases. De acuerdo con la Asociación Nacional de Industrias del Plástico, México genera 3.8 millones de toneladas de basura plástica al año. Además, los plásticos tienen un extenso tiempo de degradación, permaneciendo por largos periodos y afectando de diferentes maneras los lugares donde quedan dispuestos (Asociación Nacional de Industrias del Plástico 2015).

## 2.8 Biocompuesto de Madera Plástica

Los compuestos de madera plástica, es un material multifase que consiste en dos materiales, un material matriz y una fase de refuerzo. en el caso de los biocompuestos de madera plástica generalmente se usa madera como refuerzo en forma de aserrín y una matriz termoplástica (Ramesh et al., 2018) y fibras (Zhou et al., 2019; Hyvärinen et al., 2019). Los biocompuestos de madera plástica (BCMP) son materiales amigables con el ambientalmente, debido a que la fuente del material puede ser materiales vírgenes o reciclados, que permiten reducir los costos de manufactura, energía y el consumo de materiales vírgenes (Hyvärinen et al., 2019). Los biocompuestos basados en madera y plástico, son materiales compuestos con buenas propiedades físicas, que emplean como aglutinante resina habitual (polímeros sintéticos) y mezclándolo con celulosa de madera u otras fuentes de celulosa vegetal (Jiang et al., 2018; Ge et al., 2018). El uso de los biocompuesto de madera plástica ha crecido rápidamente, debido al incremento en aplicaciones en la construcción, componentes automotrices, industria del mueble y diversos bienes industriales y del consumidor (Najafi. 2013; Azwa et al., 2013). Los materiales han atraído diferentes investigaciones, debido a su bajo costo de producción, densidad del material y propiedades mecánicas apropiadas para aplicaciones generales (Fornasieri et al., 2011; Kazemi et al 2013).

Se han desarrollado biocompuestos de madera plástica, elaborados a partir de mezclas de polipropileno (Turku et al., 2017; Taufiq et al., 2018; Vedrtnam et at., 2019; Lin et al., 2018), fenol-formaldehído (Melosi. 2005), polietileno de baja densidad (Toghyani et at., 2019; Youssef et at., 2019), policloruro de vinilo (Jiang et al., 2018), policloruro de vinilo con quitosano, polietileno de alta densidad (Matthews. 2018), polibutileno succinato (Petchwattana, 2017), polihidroxialcanoato (Azwa et al., 2013), y plástico reciclado (Turku et at., 2017). Algunas de las ventajas asociadas con el uso de fibras naturales como refuerzo, incluyen esfuerzo mecánico específico alto, propiedades aislantes térmicas, biodegradabilidad, compostabilidad (Jiang et al., 2020). Mientras que sus limitantes incluyen la incompatibilidad de las fibras con las matrices poliméricas (Azwa et al., 2013); así como la tendencia a

formar agregados durante el proceso y el alto contenido de grupos hidroxilo favorece a la absorción de humedad (Hariprasad, 2020).

El sector de los biocompuestos de madera plástica ha tenido un constante crecimiento dentro de la industria del plástico. Los biocompuestos suelen ser obtenidos a partir de desechos de madera como bambú, pino, paja y otras fibras a base de celulosa, mezclados con plásticos comunes. El agente de acoplamiento tiene un papel importante en la producción de estos BCMP, junto con lubricantes y estabilizadores que se agregan para permitir una buena adhesión y procesamiento a estos compuestos (Matthews et al., 2018; Petchwattana et al., 2017; Jiang et al., 2020).

## **2.9 Tratamiento Superficial a Subproducto de Madera**

Dos de los principales inconvenientes de los compuestos reforzados con fibras naturales es la incompatibilidad entre interfaces estrechas y débiles; otro es la dispersión no uniforme de la fibra con la matriz. Para superar estos inconvenientes, la superficie de partículas o fibras se puede someter a un tratamiento alcalino o mercerización; que es uno de los tratamientos químicos más utilizados, cuando se desea reforzar termoplásticos y termoestables. Después del tratamiento con álcali, algunos componentes de los materiales de refuerzo se eliminan, como son la hemicelulosa y la lignina. Aumentando la rugosidad de la superficie, que resulta en un mejor anclaje mecánico y aumentando la cantidad de celulosa expuesta en la fibra superficie, aumentando así el número de posibles reacciones sitios. Además, la deslignificación funciona como fibrilación, dejando muchas cavidades y espacios intermedios entre las microfibrillas de celulosa (Brostow et al., 2016; Sommerhuber et al., 2015; Klyosov, 2007).

Debido a la incompatibilidad entre el refuerzo de madera y la matriz polimérica en el desarrollo de biocompuestos de madera plástica, se han desarrollado modificaciones químicas a la superficie de la madera para mejorar su compatibilidad con la matriz polimérica como son: acetilación, acrilación, benzoilación,

cianoetilación, metilación, silanización, tratamiento con peróxido, hidrofobización e incorporación de agentes de acoplamiento (Sombatsompop et al., 2003). Estas modificaciones permiten convertir la superficie hidrofílica de la madera en más hidrofóbica, con la finalidad de disminuir la tensión superficial, como consecuencia mejora la humectación y adhesión en la interfaz (Shah et al 2005). Sin embargo, las altas toxicidades de estos tratamientos representan una contaminación y una producción, dejando una huella de contaminación no sustentable para el medio ambiente.

### **2.9.1 Tratamiento Alcalino**

La alcalinización o mercerización, es un método común para el tratamiento físico de fibras naturales superficies. En este método, las fibras lignocelulósicas se sumergen en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH), por un periodo de tiempo. La solución de NaOH disuelve la lignina, las ceras y los aceites de la superficie de la fibra y deja una superficie celulósica limpia y porosa. Este tratamiento, conduce a una mayor especificidad propiedades mecánicas, ya que la celulosa tiene propiedades mecánicas mucho más altas en comparación con lignina. También aumenta el área de superficie específica, que conduce a una mejor interacción con la matriz (Kazemi et al., 2013). La modificación importante realizada por el tratamiento alcalino es la ruptura del hidrógeno, unión en la estructura de la red, lo que aumenta la rugosidad de la superficie. Además, el NaOH acuoso en la fibra natural promueve la ionización del grupo hidroxilo al alcóxido (Nozari et al., 2013). El tratamiento alcalino aumenta la rugosidad de la superficie, lo que resulta en un mejor enclavamiento mecánico y la cantidad de celulosa expuesta sobre la superficie de la fibra. Esto aumenta el número de posibles sitios de reacción y permite una mejor humectación de las fibras.

A pesar de que la utilización y aplicación de compuestos rellenos de aserrín están aumentando, su rendimiento es limitado por su naturaleza hidrofílica característica de la madera y que conlleva a problemas de refuerzo entre aserrín y polímero (Idrus

et al., 2011). El tratamiento alcalino del aserrín gana positiva retroalimentación de la interfaz de matriz de relleno e identificado para mejorar la adhesión también sus propiedades mecánicas (Idrus et al., 2011; Mohan et al., 2012; Kabir, 2012; Kalia et al., 2009; Rahman et al., 2012). Varios reportes de la literatura indican que, el tratamiento alcalino permite una buena adherencia de la matriz y del relleno, permitiendo buenas propiedades mecánicas en los materiales compuestos; por lo que se popularizó este tratamiento químico para el aserrín (Kim, 2012; Ahmada 2008; Singh, 2011). El biocompuesto de madera plástica generalmente se utiliza en aplicaciones de alto impacto que incluyen la aeroespacial, esparcimiento, construcción, deporte y automotriz (Malkapuram et al., 2009). Sin embargo, incluso hay varios estudios que discutieron el comportamiento mecánico de compuestos de madera/polímero (Ndiaye et al., 2013; Bledzki, 2003). Estos estudiaron las propiedades mecánicas y la absorción de agua de madera/PEAD compuesto, después de la mercerización de la superficie de la fibra y descubrió que tratar el aserrín en un 2% NaOH, la resistencia a la tensión aumentó en un 10.8% (Nozari et al., 2013).

### **2.9.2 Tratamiento Superficial con Quitosano**

Se ha reportado que el quitosano con sus excelentes propiedades mecánicas, térmicas, antibacterianas y actividades biológicas, ha tenido una serie de aplicaciones exitosas en diferentes tipos de compuestos (Maldas et al., 1989; Martinez et al., 2010; Amri et al., 2013; Cheung et al., 2007; Lu et al., 2010; Vasile et al., 2013). En los últimos años, se han preparado mezclas de quitosano con diferentes polímeros como almidón, alcohol polivinílico, celulosa y sus derivados (Vasile et al., 2013). Se ha reportado, que la amina natural en el quitosano (amino-polisacárido natural más abundante), tiene una función similar a la de los agentes de acoplamiento químico-con-grupos amino. Por lo tanto, existe un gran potencial para que el quitosano se desarrolle como un excelente agente de bioacoplamiento con su enorme cantidad, que no presenta riesgo de toxicidad, características

ecológicas y bajo costo en comparación con muchos otros agentes de acoplamiento químicos sintéticos (Shah et al., 2005).

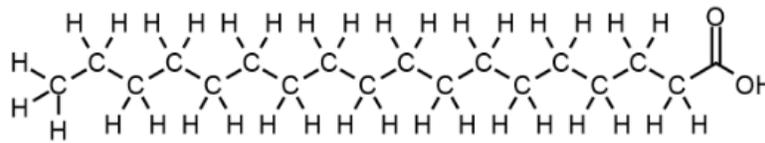
### **2.9.3 Tiramiento Superficial con Ácido Esteárico**

El ácido esteárico es un ácido graso saturado con una cadena de 18 átomos de carbonos (Figura 6), es un ácido octadecanoico. Es un sólido ceroso blando con la fórmula  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$ . El ácido esteárico es un ácido graso frecuente en la naturaleza y se encuentra en muchas grasas animales y vegetales, pero suele ser más rico en grasas animales que en grasas vegetales (Loften et al., 2014). El ácido esteárico se puede aplicar como un aditivo de bajo peso molecular con cadena alifática larga. Se usa a menudo para el tratamiento superficial de rellenos en la producción de compuestos con PP (Zuiderduin et al., 2003; Kim et al., 2004; Avella et al., 2006; Kiattipanich et al., 2007). En el caso del uso de fibras en la producción de materiales compuestos, la humectabilidad debe mejorar la capacidad de adherencia de las fibras y la matriz polimérica y componentes (Kim, 2012).

Varios investigadores, como Paul et al. (2008) y Zafeiropoulos et al. (2002) han estudiado el uso de ácido esteárico ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) en solución de etanol para el tratamiento de fibras naturales. Sin embargo, se han señalado algunas desventajas de esta técnica, incluido el hecho de que elimina los componentes no cristalinos de las fibras, cambiando la topografía superficial de las fibras de celulosa. Además, han reportado que el tratamiento con ácido esteárico disminuye el contenido de humedad de la fibra y mejora las características mecánicas de los materiales compuestos. Se descubrió que el ácido esteárico tenía dos funciones: mejora la compatibilidad entre la fibra y la matriz polimérica, y funcionar como un lubricante que eleva el índice de fluidez (Kim, 2012).

Kokta et al. (1990) señalan que el grupo carboxilo puede reaccionar con los grupos hidroxilo de la madera y la larga cadena de hidrocarburo (C-C) tienen el potencial de formar fuertes interacciones con la matriz polimérica. Estos autores estudiaron

compuestos de madera y PVC, donde observaron un aumento de la resistencia y la energía de ruptura de los compuestos.



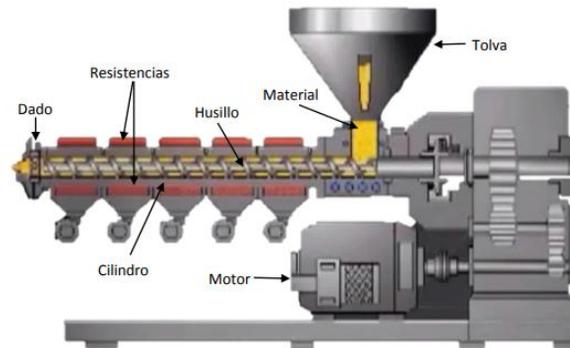
**Figura 6.** Estructura del ácido esteárico (Kokta et al., 1990).

## 2.10 Procesamiento de Biocompuestos de Madera Plástica

### 2.10.1 Extrusión

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de la transformación de plásticos y además es utilizado para composición, es decir, para mezclar y formular compuestos de plástico y producir materia prima como, por ejemplo, gránulos de concentrado o de compuesto (Ferreira, 2013). Los materiales utilizados en el proceso de extrusión son por lo general termoplásticos, éstos pueden ser en forma de polvos, hojuelas, pellets o combinaciones de estas formas. El extrusor consiste en un tornillo (husillo) rotatorio dentro de un barril (cilindro) de diámetro constante que es calentado con resistencias (Figura 7). La función del husillo es bombear el polímero fundido y mezclado, de manera que pasa a través de un dado. Los ingredientes se colocan en la zona de alimentación, por medio de una tolva y pasan por una zona de dosificación por medio de un dado calentado el cual tiene la forma deseada en la sección de corte del producto. La extrusión de perfiles, filamentos, tubos y hojas se facilita por un sistema de arrastre y soporte, y los productos se pueden cortar en longitudes finitas o enrollar en tambores o tubos. Existen diferentes tipos de sistemas de extrusión que se utilizan principalmente en la fabricación de biocompuestos de madera plástica: (1) tornillo único, (2) tornillo doble cortante, (3) tornillo doble contra rotatorio (Gardner et al., 2015). El proceso de extrusión de biocompuestos de madera plástica se basa en el secado de aserrín

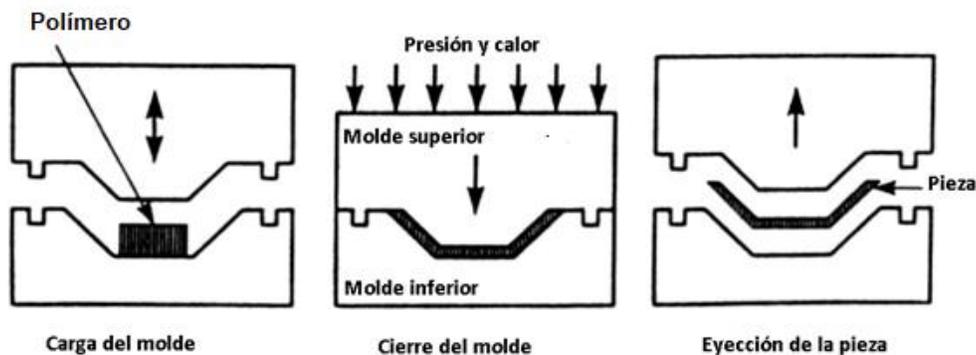
de madera (aserrín pino) para alcanzar un contenido de humedad mínimo (Bengtsson et al., 2005).



**Figura 7.** Equipo de extrusor de polímeros (Bengtsson et al., 2005).

### 2.10.2 Moldeo por compresión

En la técnica de moldeo por compresión, los gránulos del polímero se calientan en un molde abierto (Figura 8). Cuando el polímero se convierte en una masa viscosa, el molde se cierra mediante la aplicación de presión y el exceso del polímero es expulsado entre las mitades del molde, luego el molde se deja enfriar para extraer la pieza formada. Es una técnica relativamente sencilla y barata; sin embargo, requiere mayor mano de obra y tiempo que el moldeo por inyección. El proceso de moldeo por compresión se ha utilizado para producir biocompuestos de madera plástica a partir de aserrín de madera y PP (Johnson et al., 2008).



**Figura 8.** Proceso de termocompresión de un polímero (Johnson et al., 2008).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

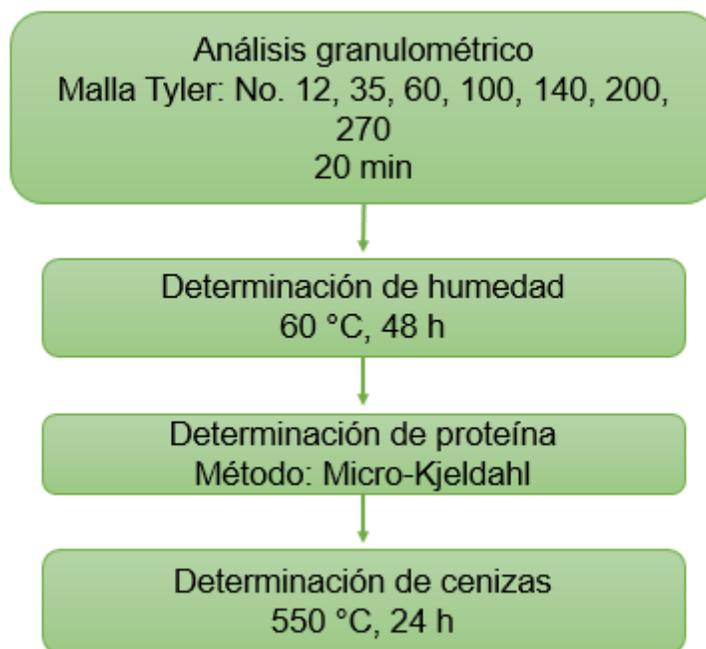
### 3.1. Material

Se utilizó el subproducto de madera procedente de una empresa (Tarimas del Noroeste, S.A. de C.V.) de la ciudad de Hermosillo, Sonora (Figura 9(a)). Como matriz termoplástica se utilizó polietileno de alta densidad (PEAD) de la marca ExxonMobil (Paxon™) (Figura 9(b)). El quitosano y el (Sigma-Aldrich, Corp.) y el ácido esteárico (Droguería Cosmopolita, S.A.), fueron utilizados como reactivos para el tratamiento superficial al subproducto de madera. Se emplearon como solventes químicos ácido acético y el alcohol etílico (etanol) de la empresa Fagalab S.A. (Culiacán, Sin. México).



**Figura 9.** imagen de materiales, a) Subproducto de madera, b) Polietileno de alta densidad.

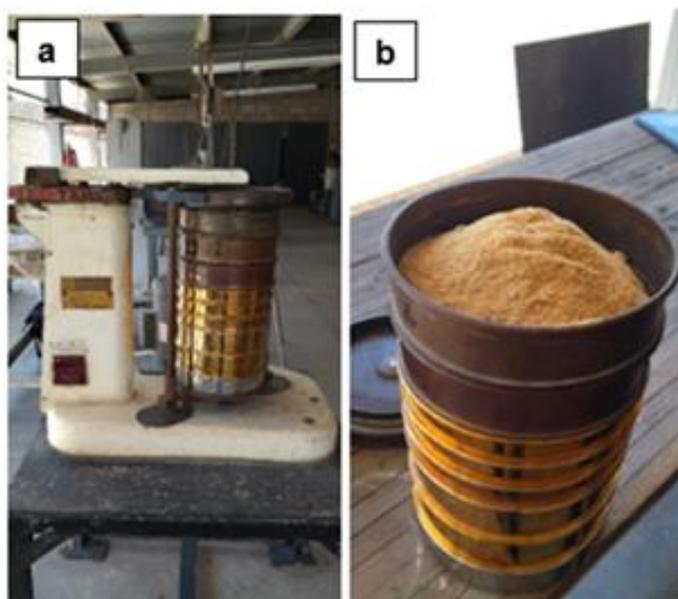
## 3.2 Caracterización del Subproducto de Madera



**Figura 10.** Diagrama de flujo de análisis proximal del subproducto de madera.

### 3.2.1 Análisis Granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico al subproducto de madera en un equipo modelo Tamizadora Ws Tyler Rotap Rx-29-16m (Figura 10). Se utilizaron las mallas Tyler No. 12, 35, 60, 100, 140, 200 y 270. La muestra de subproducto de madera fue secada a 70°C por 24 h previo a su análisis. El residuo de madera se dejó en agitación durante 2 h a 50 rpm. Los porcentajes acumulados en las mallas se pesaron en una balanza analítica.



**Figura 11.** Análisis granulométrico subproducto de madera, a) Tamizador de mallas, b) Subproducto de madera en malla Tyler.

Según Fabiyi et al. (2010), partículas con tamaños de 100 a 600  $\mu\text{m}$  son las más reportadas para la elaboración de compuestos. Del análisis granulométrico se seleccionó las fracciones obtenidas de las mallas 35 y 60, las cuales corresponden a partículas de diámetro promedio de 250 a 420  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

### 3.2.2 Determinación de Humedad

Se pesó 1 g muestra y se colocó en un contenedor de aluminio previamente pesado y tarado y se dejaron secar a 60°C por 48 h, este procedimiento se realizó por triplicado (Figura 11). Posteriormente, se enfrió en un desecador a temperatura ambiente y se pesó en una balanza analítica. El porcentaje de humedad se calculó mediante la Ecuación 1.

$$\text{Humedad (\%)} = \left( \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$



**Figura 12.** Determinación de humedad del subproducto de madera en contenedores de aluminio a 60°C.

### 3.2.3 Determinación de Cenizas

Se agregó 1 g de residuo de madera a 3 crisoles de cerámica de 30 mL. Se dejaron a temperatura ambiente durante 24 h, posteriormente fueron calentados durante 2 h a 100°C. Se colocaron los tres crisoles sobre 3 placas de resistencia y se pre-incineraron. Después, los crisoles fueron colocadas en una mufla de incineración Thermolyne Sybron (Thermoscientific Inc.) a 550°C por 24 h (Figura 12). Una vez, concluida la incineración y que los crisoles estuvieron a temperatura ambiente, se pesó el producto y se obtuvo el % de cenizas mediante la Ecuación 2.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{P_i - P_f}{M} \times 100 \quad (2)$$

Dónde:  $P_i$ =peso del crisol más ceniza,  $P_f$ =peso del crisol,  $M$ =peso de la muestra.



**Figura 13.** Imágenes del procedimiento de la determinación de cenizas a) Muestras de subproducto madera residuo de madera en crisoles cerámicos pre incinerados en parrilla de resistencia eléctrica, b) Muestras pre incineradas en deshumidificador, c) Calcinación de las muestras en la mufla.

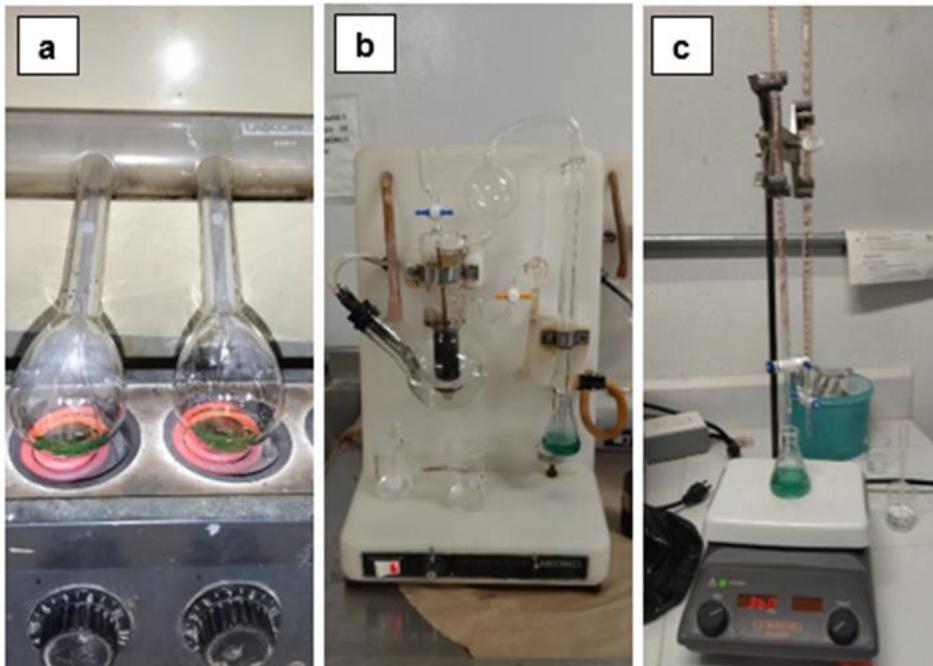
### 3.2.4 Determinación de Proteínas

Se utilizó el método de Micro-Kjeldahl para determinación de proteína y conocer el porcentaje de nitrógeno. Una muestra de 0.2 g de subproducto de madera, se colocó en un matraz, se agregó 5 mL de una solución de  $H_2SO_4$  concentrado más 2 g de catalizador  $K_2SO_4$ , se calentó a  $100^\circ C$  (Figura 13) hasta obtener un color turquesa y se deja enfriar. Posteriormente, se colocó la muestra en un destilador, se agregó 10 mL de solución de NaOH al 40% en intervalos de 15 min hasta neutralizar. Se prendió el destilador durante 5 min hasta el cambio de indicador color verde y la muestra se tituló con solución de HCL 0.1N. Se determinó el porcentaje de nitrógeno con la Ecuación 3. El porcentaje de proteínas se determinó con la Ecuación 4.

$$N (\%) = \frac{(\text{mL HCl} - \text{mL Blanco}) \times N \times 14.007}{\text{mg Muestra}} \times 100 \quad (3)$$

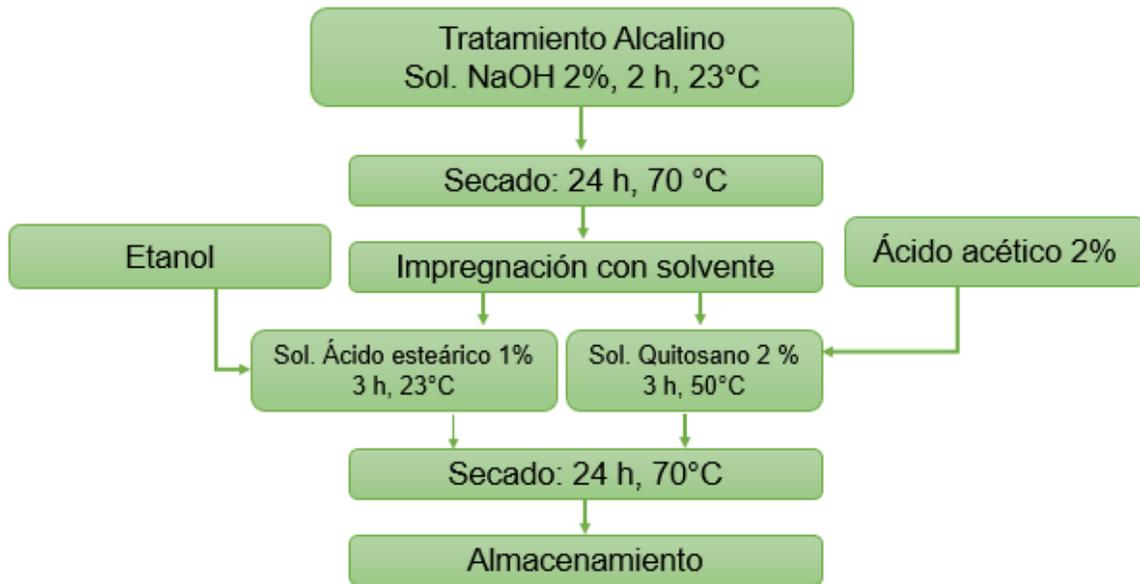
$$\text{Proteína (\%)} = \% N \times (\text{factor}) \quad (4)$$

Dónde: N (%)= nitrógeno total, mLHCl= volumen de HCl gastado en la muestra, mL Blanco= volumen HCl gastado en el blanco, N=normalidad del HCL, factor 14.007 = 14.007 mg que tiene 1 mmol de nitrógeno, mg Muestra= mg de muestra.



**Figura 14.** Imágenes de la determinación de proteínas, a) Digestión de residuo de madera en solución con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, b) Equipo de destilación y c) Equipo de titulación.

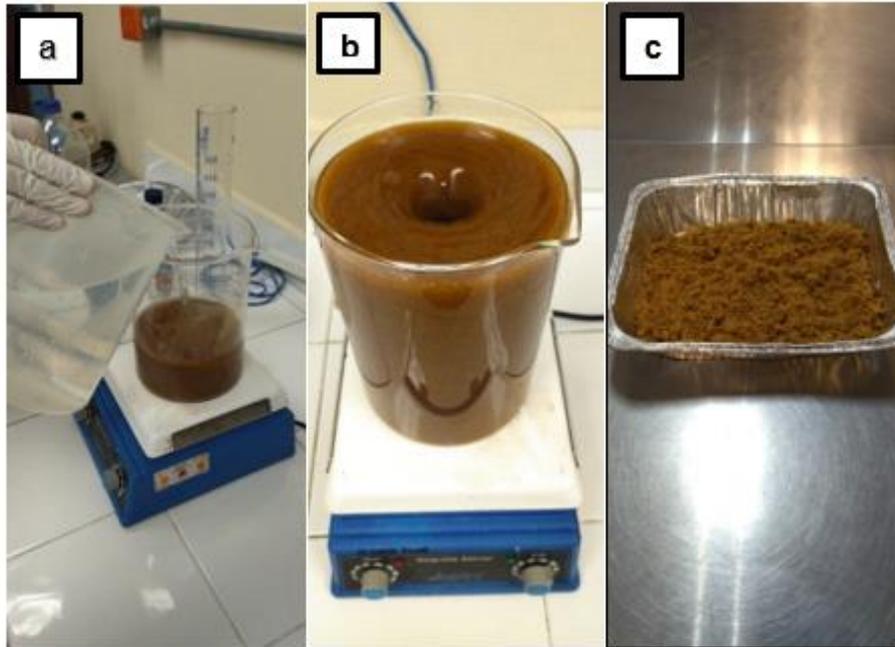
### 3.3 Modificación Superficial del Subproducto de Madera



**Figura 15.** Diagrama de flujo de los tratamientos de modificación superficial al subproducto de madera.

#### 3.3.1 Tratamiento Alcalino

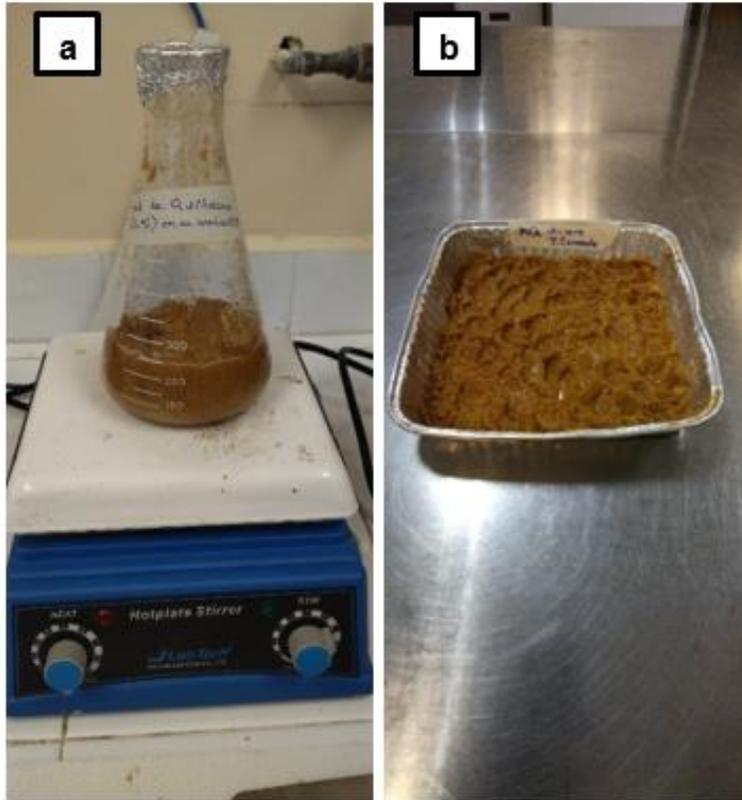
El tratamiento alcalino se llevó a cabo en un vaso de precipitado de 2 L (Nozari et al., 2013). Las condiciones fueron: relación líquida–sólido de 25 mL/g, y una concentración de la solución de NaOH al 2% en peso y el tiempo de exposición fue de 2 h (Figura 15(b)) a temperatura ambiente. La fase sólida se separa por medio de filtración en un embudo Büchner y se dieron lavados con agua destilada hasta obtener un pH de 7. La fase sólida se secó a 70°C por 24 h.



**Figura 16.** Tratamiento superficial subproducto de madera, a) colocación de la solución de NaOH a 2%, b) agitación de la solución a temperatura ambiente y c) secado de la muestra.

### 3.3.2 Tratamiento Superficial con Quitosano

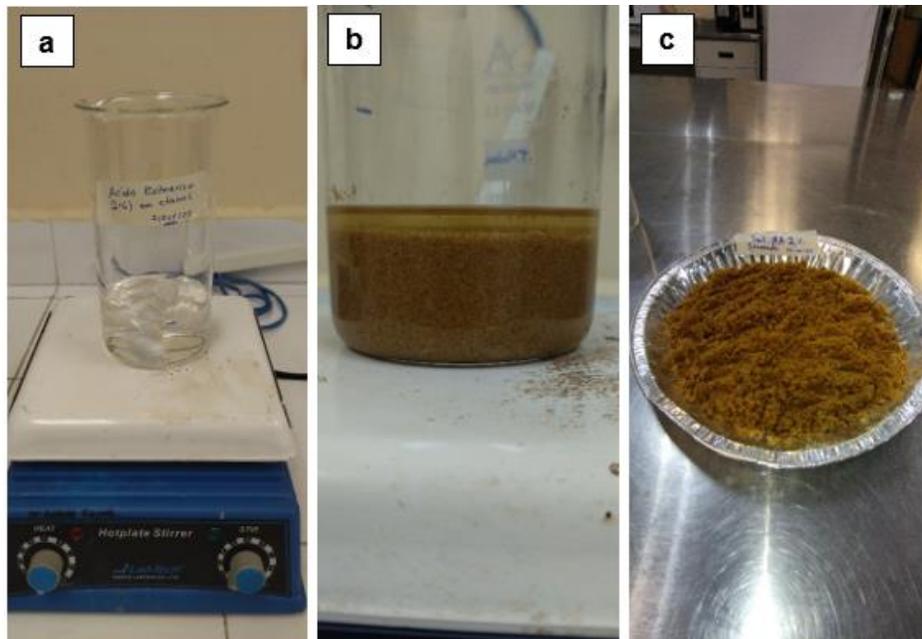
El tratamiento superficial con quitosano se llevó a cabo en un matraz Erlenmeyer de 500 mL (Vedrtam et al., 2019). Se utilizó el subproducto de madera con tratamiento alcalino previo y a esta muestra se añadió una solución de quitosano al 2% disuelto en ácido acético al 2%. La mezcla se realizó a una proporción sólido-líquido 1:6. Se dejó en agitación constante a 50°C durante 3 h (Figura 16(a)). La muestra se neutralizó con NaOH hasta obtener pH de 7. Se filtró y se dejó secar por 24 h a 70°C.



**Figura 17.** Imágenes del tratamiento superficial con quitosano, a) Subproducto de madera en matraz Erlenmeyer en expuesto en solución de quitosano disuelto en ácido acético, b) Contenedor de aluminio con la muestra tratada para el secado.

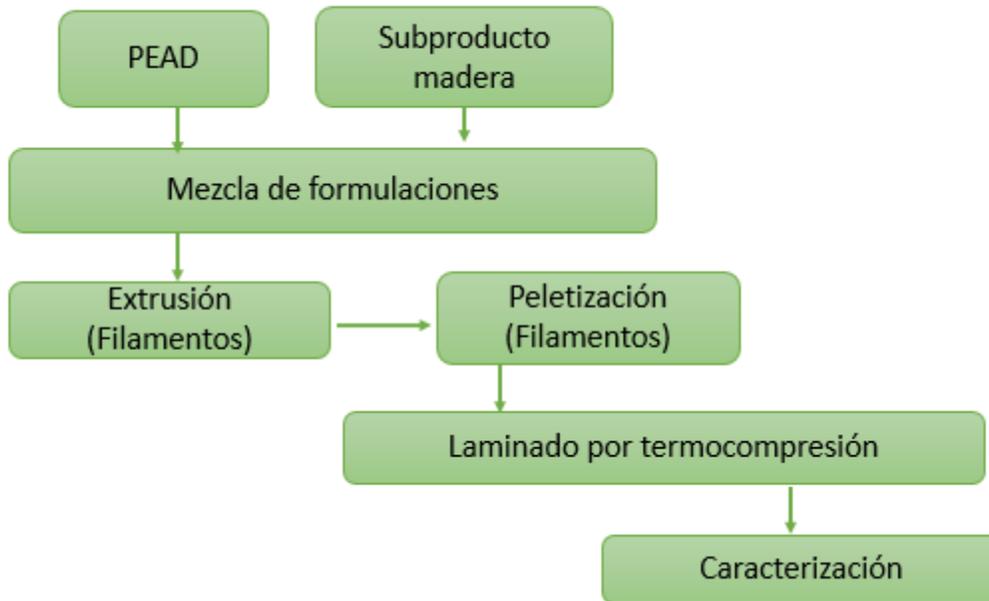
### 3.3.3 Tratamiento Ácido Esteárico

El tratamiento superficial con ácido esteárico se llevó a cabo en un vaso de precipitado de 500 mL (Aziz et al., 2021). Las condiciones fueron: una relación líquida: sólido 5:1, concentración de solución ácido esteárico disuelto en un etanol al 1% en peso y el tiempo de exposición fue de 3 h a 23°C (Figura 17(b)). La fase sólida se separó por medio de filtración en un embudo Büchner. Después la fase sólida se secó a 70°C. por 24 h.



**Figura 18.** Imágenes del tratamiento con ácido esteárico, a) etanol al 1% en agitación, b) subproducto de madera en solución de ácido esteárico disuelto en etanol al 1% y c) subproducto de madera tratada en contenedor de aluminio.

### 3.4 Procesamiento del Biocompuesto



**Figura 19.** Diagrama de flujo para la producción de las mezclas de las formulaciones de los biocompuesto; subproducto de madera sin tratamientos CMP 7.5, subproducto de madera con tratamiento alcalino CMP NaOH, subproducto de madera con tratamiento de quitosano, subproducto de madera con tratamiento de ácido esteárico CMP ácido esteárico.

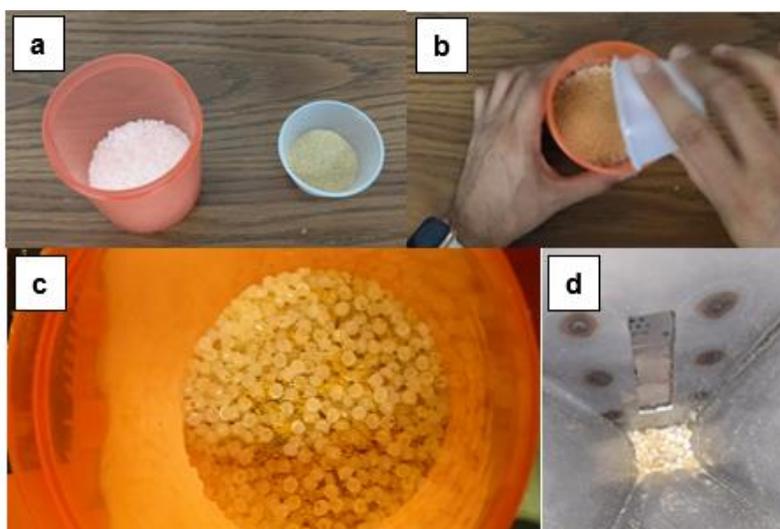
#### 3.4.1 Mezcla de Formulaciones del Biocompuesto

Los componentes de las diferentes formulaciones se mezclaron a mano en un contenedor de polietileno (Figuras 19(a) a 19(c)). Posteriormente, se alimentaron a la tolva del extrusor (Figura 19 (d)). Las formulaciones de PEAD y partículas de subproducto de madera sin tratamiento y con tratamiento se muestra en la Tabla III. Se realizaron formulaciones para el PEAD, así como las formulaciones con partículas de subproducto de madera sin tratamientos y para las partículas de subproducto de madera con tratamiento alcalino, las partículas con tratamiento con quitosano y las partículas con tratamiento de ácido esteárico.

La selección de la formulación PEAD (92.5%) y de subproducto de madera (7.5%) con los diferentes tratamientos superficiales fue resultado de un análisis preliminar de formulaciones realizado y cuyos resultados y análisis estadístico se presentan en el Anexo I.

**Tabla III.** Formulaciones del biocompuesto de PEAD y partículas de subproducto de madera.

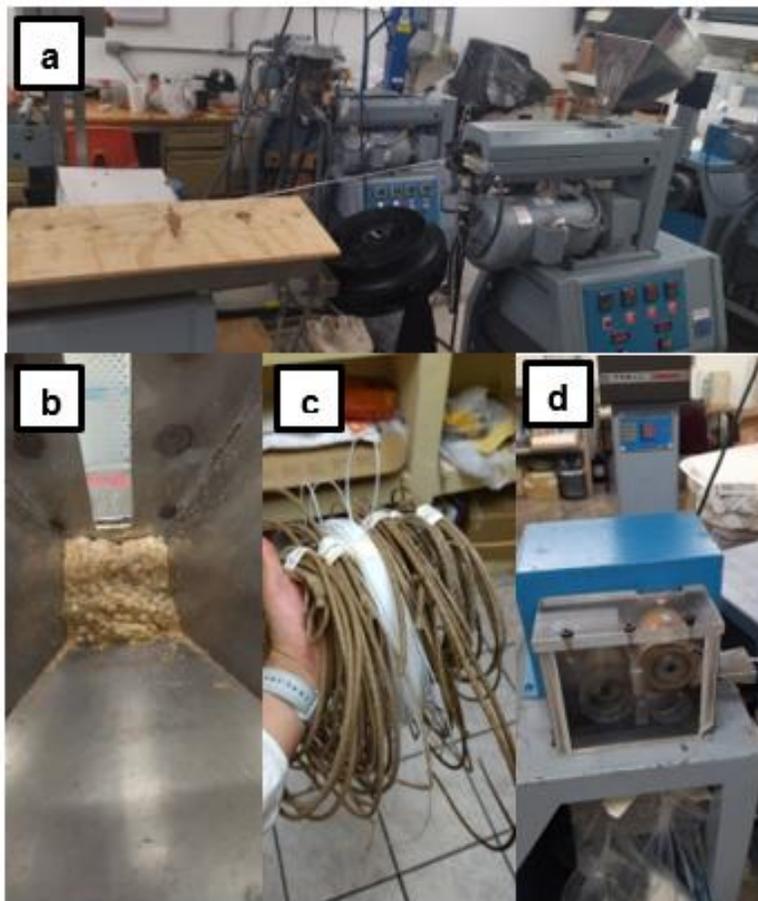
Formulación	PEAD (%p/p)	Subproducto de madera (%p/p)
PEAD	100	0
CMP 7.5	92.5	7.5
CMP-NaOH	92.5	7.5
CMP Quitosano	92.5	7.5
CMP Acido esteárico	92.5	7.5



**Figura 20.** Imágenes de la preparación de las formulaciones, a) PEAD virgen y subproducto de madera, b) Mezclado, c) Compuestos después de ser agitados, d) Tolva de alimentación del extrusor.

### 3.4.2 Extrusión del Biocompuesto

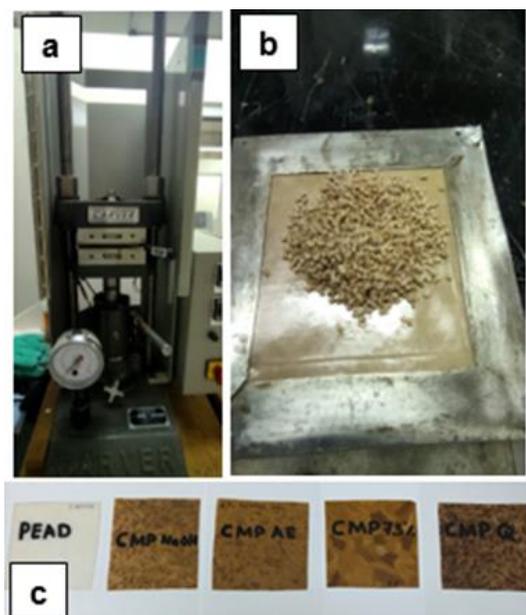
El procesamiento de los biocompuestos de madera plástica se realizó en un extrusor monohusillo con una L/D 15:1 y con cabeza mezcladora de la marca Beutelespacher (CDMX, México). El material fue procesado en el Laboratorio de Envases del Centro de Investigación de Alimentos y Desarrollo, A.C. Se utilizó dado para monofilamento y los filamentos elaborados se procesaron utilizando un perfil de temperaturas de zona 1: 140°C, zona 2: 160°C y zona 3: 175°C, a una velocidad de tornillo de 50 rpm y torque de 5. La Figura 20 presenta las imágenes del procesamiento por extrusión de los biocompuestos y los filamentos obtenidos.



**Figura 21.** Imágenes del procesamiento de los biocompuestos, a) Extrusor Monohusillo, b) Tolva alimentada por subproducto de madera y PEAD, c) filamentos obtenidos de los biocompuesto y d) Equipo de producción de pellets.

### 3.4.3 Termocompresión del Biocompuesto

Los laminados de los biocompuestos de madera plástica se realizaron en una prensa térmica CARVER modelo 4386 del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, de la Universidad de Sonora (Figura 21). Se agregaron 15 g de pellets del biocompuesto al molde de acero inoxidable y se procedió a su laminación con los siguientes tiempos: Del minuto 0 al 2 se colocó el molde con los pellets del biocompuesto en la placa inferior de la prensa a una temperatura de 160°C (320°F), para el calentamiento del molde. Del minuto 2 al 6 las placas de la prensa fueron aproximadas, sin ejercer presión. Del minuto 6 al 12 se incrementó la carga a 1,500 lb/min hasta llegar a 5,000 libras y se mantuvo la presión y temperatura constante. Del minuto 12 al 62 se enfrió el laminado y a presión constante con una corriente de aire de un ventilador hasta llegar a una temperatura de 70°C (158°F). Posteriormente, el molde se sumergió en agua a temperatura ambiente.

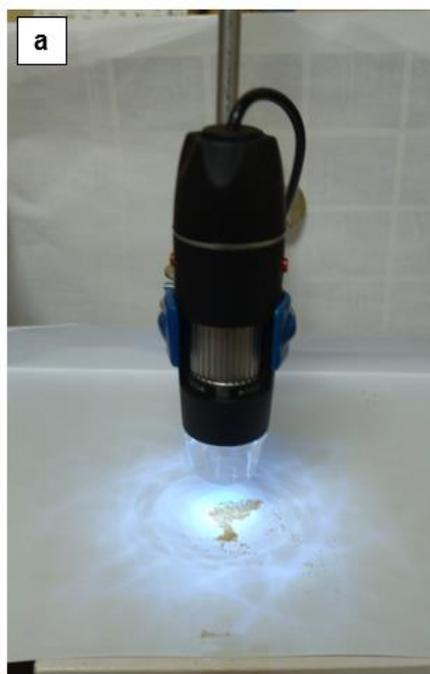


**Figura 22.** Imágenes de la laminación de los biocompuestos, a) Prensa térmica para el moldeo de los laminados, b) Pellets de biocompuesto de madera plástica en molde de acero inoxidable, c) Laminados del biocompuesto de madera plástica obtenidos.

### 3.5 Caracterización del Subproducto de Madera y del Biocompuesto

#### 3.5.1 Microscopía Óptica

Se realizaron estudios de microscopía óptica de las muestras del subproducto de madera con los tratamientos superficiales, así como a los biocompuestos. Se utilizó un microscopio óptico (M.O) modelo Bysameyee (Figura 22). Las imágenes capturadas con un lente óptico a la magnificación de 5x.



**Figura 23.** Imagen del microscopio óptico digital utilizada para el análisis de muestra de partículas de subproducto de madera.

#### 3.5.2 Determinación de Color

Se utilizó un colorímetro Konika Minolta CR-300 Series (Figura 23) calibrado con un estándar ( $Y = 92.4$ ,  $x = 0.02$ ,  $y = 1.6$ ), con la finalidad de comparar los cambios de color en los biocompuestos. Se midió el color en cada una de las muestras, la luminosidad fue determinada por  $L^*$  y las coordenadas de cromaticidad fueron determinadas por  $a^*$  (rojo-verde) y  $b^*$  (amarillo-azul). Las mediciones se realizaron colocando las muestras sobre el estándar. Las muestras fueron analizadas por 4

cuadruplicado obteniendo una media de estas. Las diferencias del color ( $\Delta E$ ) se calculó con la siguiente Ecuación 5.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2) + (\Delta a^2) + (\Delta b^2)} \quad (5)$$

Dónde:  $\Delta L = L - L_0$ ,  $\Delta a = a - a_0$ ,  $\Delta b = b - b_0$ , Siendo  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ , representan los valores del parámetro del color del estándar  $L^*$ ,  $a$  y  $b$ .



**Figura 24.** Equipo de medición de Color.

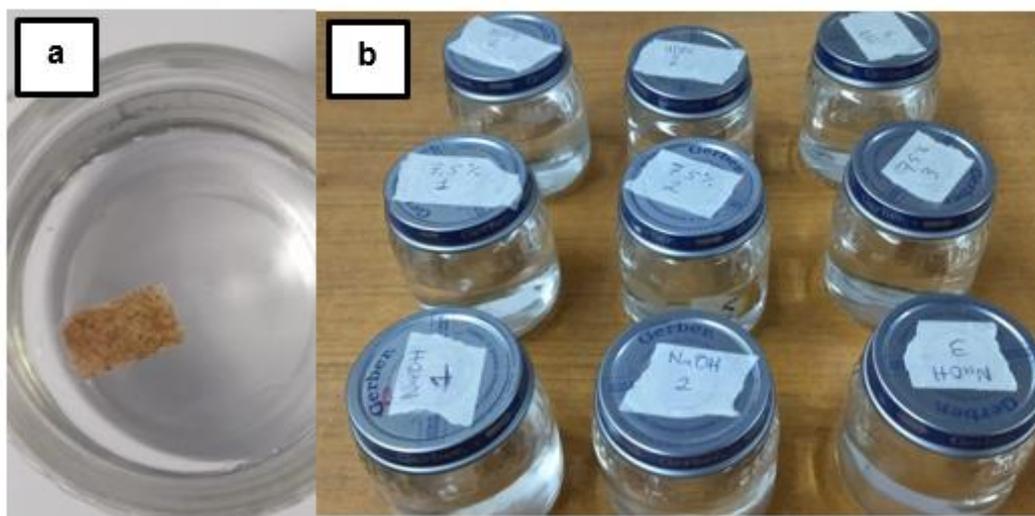
### 3.5.3 Absorción de Agua de los Biocompuestos

Se elaboraron muestras con dimensiones de 1.5 x 1 cm de los biocompuesto de madre platica obtenidos. Dichas muestras se colocaron a peso constante antes de sumergirse en recipientes hermético con 100 mL de agua potable (Figura 24), fueron removidas del baño y secadas cuidadosamente con papel absorbente, en diferentes

tiempos de 24, 48, y 120 h de inversión. El cálculo de la del porcentaje de absorción de agua (A (%)) en los biocompuestos se realizó mediante la Ecuación 6.

$$A (\%) = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100 \quad (6)$$

$m_t$ = peso medido a la muestra en diferentes intervalos de tiempo hasta alcanzar absorción máxima de agua,  $m_o$ = el peso inicial de la muestra.



**Figura 25.** Medición de la absorción de agua de los biocompuestos, a) Muestra de biocompuesto de madera plástica en el contenedor con agua, b) Muestras sumergidas en agua.

### 3.5.4 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier

Los espectros de infrarrojo con trasformada de Fourier se analizaron empleando el accesorio de reflexión total atenuada (ATR-FTIR) para los biocompuestos. Los espectros se obtuvieron a temperatura ambiente, empleando un espectrómetro marca Agilent modelo Cary 630 (Figura 25). El método empleado en el análisis fue en modo de absorbancia en los espectros de las partículas de subproducto de

madera y de los biocompuesto obtenidos. Se analizaron en el rango de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$  de resolución, se realizaron 64 barridos a cada una muestra analizada.

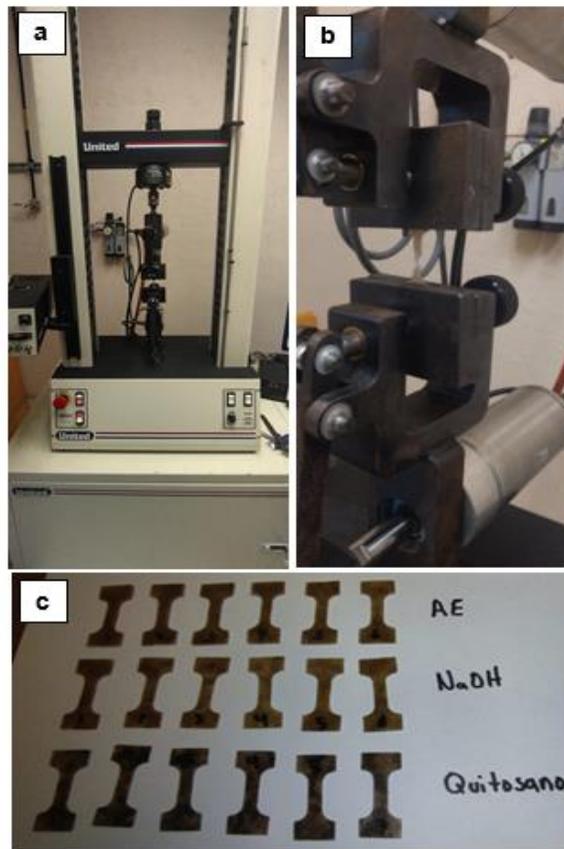


**Figura 26.** Espectroscopia de infrarrojo con trasformada de fourier, a) Con el accesorio de reflexión total atenuada (ATR-FTIR), b) Muestra de subproducto de madera previo a análisis.

### 3.5.5 Propiedades Mecánicas de los Biocompuestos

El equipo que se utilizó para la determinación de las propiedades de tensión de los biocompuestos de madera plástica, fue una máquina universal de pruebas mecánicas de la marca United modelo SSTM-5kn (EEUU) (Figura 26). La velocidad de separación de las mordazas fue de 5 mm/min. Las probetas para la prueba de tensión se elaboraron y ensayaron bajo las normas ASTM D-638. Se cortaron probetas de 20 x 1 mm y se le midió el espesor para calcular el área de la sección transversal de la probeta. En esta prueba de tensión se obtuvieron los datos para realizar las gráficas de esfuerzo versus deformación de las muestras ensayadas, a

partir de las cuales se realizaron los cálculos para la determinación de resistencia a la tensión, elongación a la ruptura y módulo de elasticidad.



**Figura 27.** Propiedades mecánicas a tensión de los biocompuestos, a) Máquina universal, b) Probeta en fallo, c) Probetas de biocompuestos de madera plástica con tratamientos de ácido esteárico, hidróxido de sodio y quitosano.

### 3.6 Microscopia Electrónica de Barrido MEB

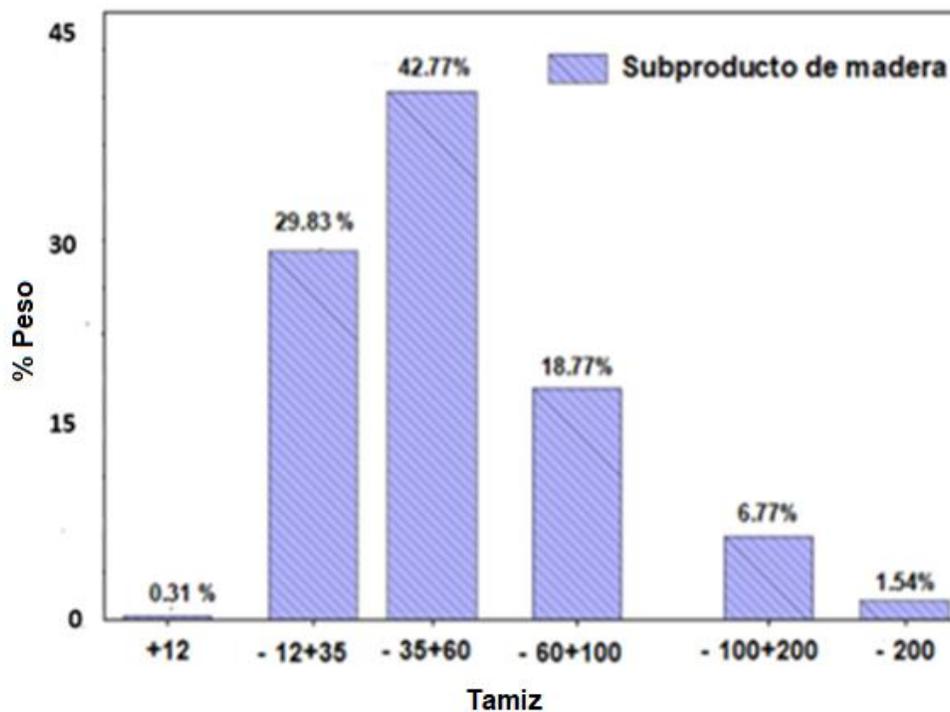
Se realizaron estudios morfológicos de la superficie de la fractura de los ensayos de tensión de los biocompuestos obtenidos, mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL Ltd. modelo JSM760 1F. Las muestras fueron sometidas a un proceso de recubrimiento de Au-Pd previo a su análisis.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4.1 Caracterización del Subproducto de Madera

### 4.1.1 Análisis Granulométrico Subproducto de Madera sin Tratamientos

En la Figura 27 se presentan los resultados del análisis granulométrico del subproducto de madera utilizando los tamices +12, +35, +60, +100, +200 y +270. Podemos observar que el tamiz con malla mayor de +12 tiene un 0.31% en peso de material retenido; en contraste, lo que pasó al tamaño de malla de 200 (-200) fue de 1.54%. En el tamiz +35 se retiene el 29.85% de subproducto, este porcentaje aumenta hasta un máximo de 42.77% en el tamiz +60; alcanzando un acumulado positivo del 72.93%. En el tamiz +100, el material retenido disminuye al 18.77%; pero ya obtuvo un acumulado del 91.69% de subproducto de madera.



**Figura 28.** Análisis granulométrico subproducto de madera versus el intervalo de tamices.

Podemos concluir que los porcentajes mayores de subproducto de madera retenido se encuentran entre los tamices +35 y +100; por lo que las partículas se encuentran en el rango de 420 a 149  $\mu\text{m}$ . El estudio nos indica que el subproducto de madera obtenido, esta mayormente conformado con partículas acumuladas en la malla 60 con tamaños de 250  $\mu\text{m}$ , que representa el 42.77% como se puede observar en las Figuras 28 de esta investigación.

#### 4.1.2 Análisis Proximal del Subproducto de Madera

#### 4.1.3 Contenido de Humedad, Cenizas y Proteínas

Se caracterizó el subproducto de madera y se determinó el contenido de humedad, cenizas y proteínas. Los resultados promedio de los componentes efectuados por triplicado y la desviación estándar para esta variedad se presentan en la Tabla IV.

**Tabla IV.** Análisis proximal del subproducto de madera.

<b>Componente</b>	<b>Valor (%)*</b>
<b>Humedad</b>	<b>20.07 <math>\pm</math> 0.05</b>
<b>Cenizas</b>	<b>4.46 <math>\pm</math> 0.015</b>
<b>Proteína</b>	<b>0.889 <math>\pm</math> 0.14</b>

\* Valor promedio  $\pm$  desviación estándar

El porcentaje de humedad del subproducto de madera fue de 20.07% (Tabla IV). Este resultado se encuentra dentro del rango (10 a 60%) reportado por Vassilev et al. (2010) para subproductos de aserrín y virutas de maderas de pino. El porcentaje de cenizas del subproducto de madera fue de 4.46% (Tabla iv). Este resultado puede estar relacionado con el aumento de elementos inorgánicos naturales que

están presentes en el subproducto de la madera. No obstante, hay autores que reportan que el porcentaje de cenizas puede incrementarse debido a que durante el proceso de generación de este subproducto minerales (metales) suelen adherirse durante el manejo de corte y procesamiento (Oberberger et al., 2010), utilizando sierras y cuchillas (Van et al., 2006). El contenido de proteínas del subproducto de madera fue de 0.889% (Tabla iv). Este resultado está en el rango reportado por Oke et al. (2007) el cual fue menor al 1% para madera de pino.

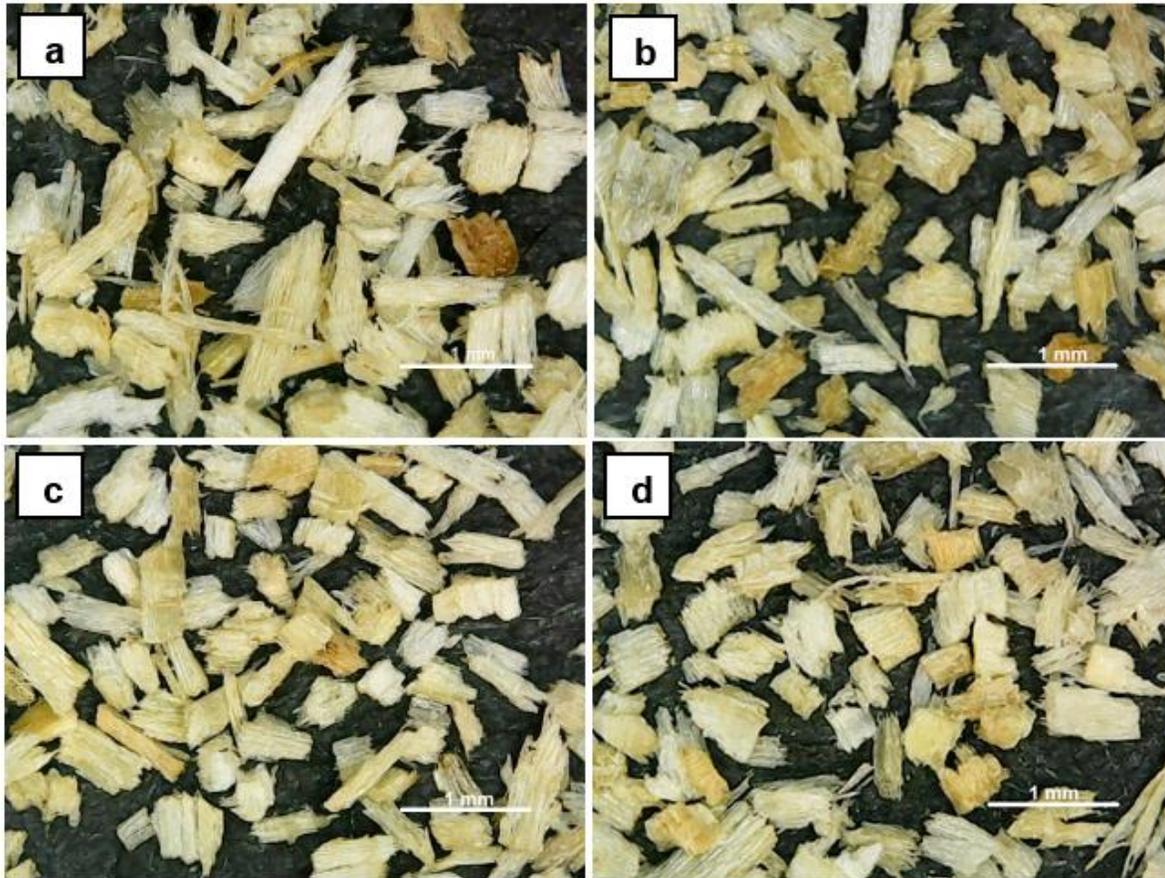
## **4.2 Microscopia Óptica del Subproducto de Madera y Biocompuestos**

### **4.2.1 Subproducto de Madera**

Las imágenes de microscopia óptica a 5x de magnificación se presentan en la Figura 28. Se observan las partículas del subproducto de madera de la malla +60 sin tratamientos Figura 27 (a), el tamaño promedio del acumulado en la malla 60 de partículas ronda, según el análisis granulométrico, entre 250  $\mu\text{m}$  de diámetro y hasta 1,000  $\mu\text{m}$  de longitud según se observa en la escala. Se observan algunas partículas de color oscuro, lo cual indica porciones de ramas incluidas en la madera del tallo (Félix et al., 2020). Las imágenes de las partículas de madera con tratamiento alcalino presentan geometrías más definidas en comparación con las partículas sin tratamiento; además, la porosidad en las mismas es más evidente. La imagen de las partículas con tratamiento alcalino y con quitosano en la Figura 27 (c), de igual forma se observan partículas con geometrías más definidas en comparación de las imágenes de las partículas sin tratamiento. Además, se puede llegar a observar un cambio significativo en el color en las partículas, el cual puede cuantificarse con valores obtenidos en el análisis de calor del biocompuestos con y sin tratamiento y que se presentaran más adelante.

Las imágenes de las partículas de subproducto de madera con tratamiento alcalino y con ácido esteárico de la Figura 27 (d), se puede observar partículas similares a la imagen de las muestras sin tratamiento, la morfología de las partículas es menos definida en comparación con los dos tratamientos previos. Con base en las

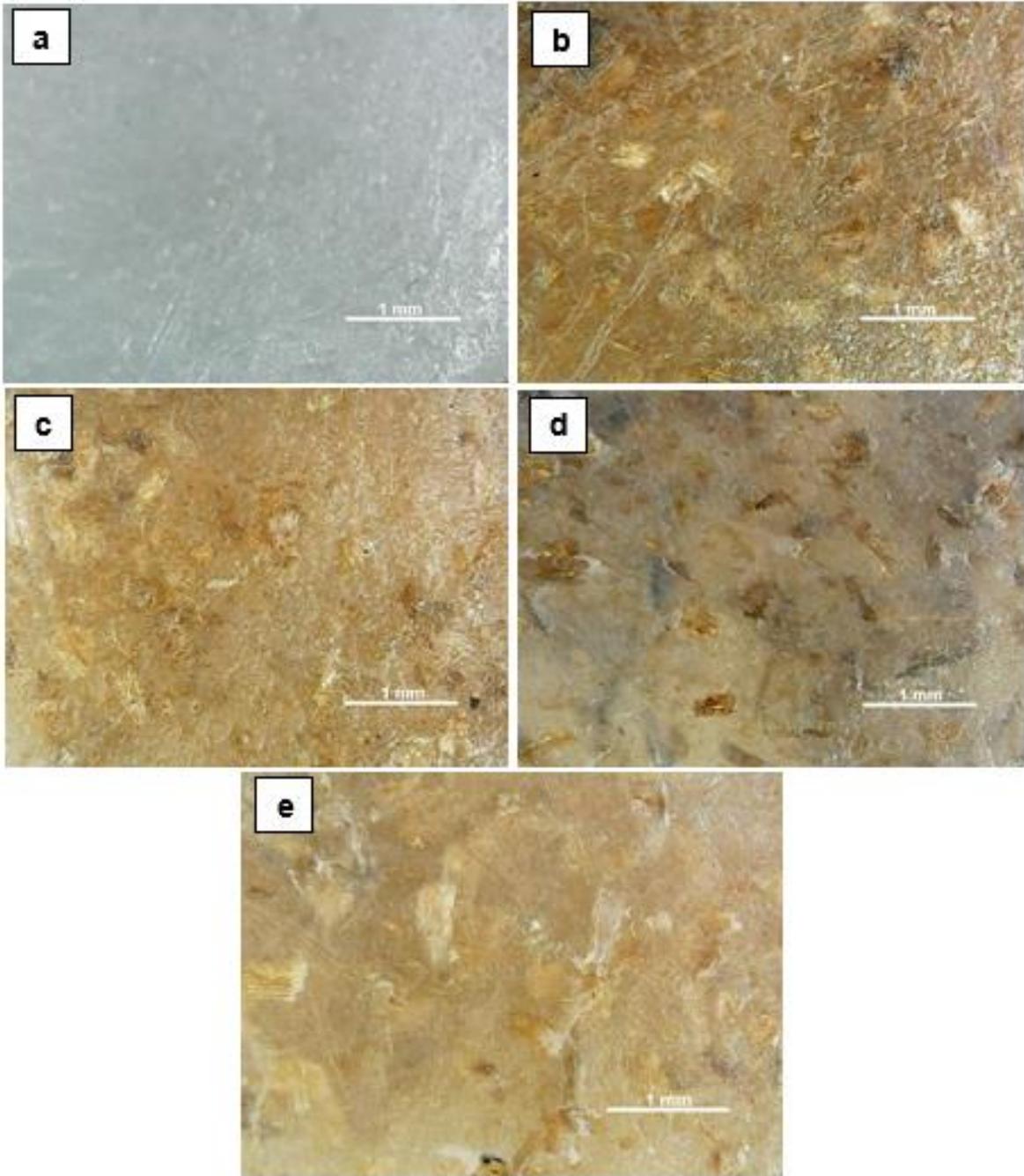
observaciones anteriores, se puede observar que el tratamiento alcalino en subproducto de madera presentó una disminución en el tamaño de partículas, lo cual se atribuye a la solubilización de la lignina, ceras, hemicelulosa y otros componentes hidrosolubles (Zhao, 2008).



**Figura 29.** Imágenes por microscopía óptica a 5x, de las partículas de madera: a) Subproducto sin tratamiento malla 60, b) Subproducto con tratamiento alcalino, c) Subproducto con tratamiento con quitosano, d) Subproducto con tratamiento con ácido esteárico.

### 4.2.2 Biocompuestos

Las imágenes de microscopía óptica a 5x de magnificación de los biocompuestos formulados se presentan en la Figura 29. En esta figura se observa la imagen del PEAD virgen (Figura 29(a)); así como la morfología de la superficie del biocompuesto laminado con partículas del subproducto de madera sin y con tratamientos superficiales. Se puede apreciar en términos generales, que las características superficiales son de tipo rugo en los laminados. Las imágenes de los biocompuestos con subproducto de madera sin tratamiento (Figura 29(b)) presentan una tonalidad más oscura. Este cambio de color en el biocompuesto ha sido cuantificado en el análisis de colorimetría y donde se observa una evidente disminución en su luminosidad. Como se mencionó anteriormente, el tamaño promedio de las partículas en la malla 60 se halla entre 250  $\mu\text{m}$  de diámetro y hasta 1000  $\mu\text{m}$  de longitud, respecto a la escala de la imagen. Se puede observar que las partículas de madera de color oscuro incluidas en la madera del tallo o ramas se encuentran embebidas en la matriz de PEAD (Félix et al., 2010). Las imágenes de los biocompuestos con subproducto de madera con tratamiento alcalino (Figura 29(c)) se observa una disminución en la rugosidad y en el color una mejor homogenización. El biocompuestos con subproducto con tratamiento de quitosano (Figura 29(d)) se observó disminución de rugosidad y el color presentó un aumento con tonalidades oscuras de las partículas embebidas en la matriz. En la Figura 29(e) se observa una disminución significativa en el color y mejor homogeneidad de los biocompuestos.



**Figura 30.** Imágenes por microscopía óptica a 5x, del PEAD y los biocompuestos:  
a) PEAD, b) PEAD y subproducto madera sin tratamientos, c) PEAD y subproducto madera con tratamiento alcalino, d) PEAD y subproducto madera con tratamiento con quitosano, e) PEAD y subproducto madera con tratamiento con ácido esteárico.

En conclusión, podemos observar que la imagen del biocompuesto con tratamiento alcalino (Figura 29(b)) y con quitosano (Figura 29(d)) presentaron un cambio significativo en el color del biocompuesto, siendo este más oscuro. Los biocompuestos obtenidos, en términos generales, se observan distintas tonalidades del color amarillo. Dado que ambos componentes del compuesto del biocompuesto son propensos a verse afectados por la temperatura de procesamiento y la degradación térmica. Por otro lado, la exposición a condiciones exteriores (intemperismo natural) puede provocar cambios en la superficie de los biocompuestos (color y calidad) y pérdida de propiedades mecánicas como ha sido reportado en la literatura (Fabiya et al., 2008; Fabiya et al., 2010).

### **4.3 Colorimetría de los Biocompuestos**

En la Tabla V se presentan los valores de luminosidad, donde se observa que conforme se agrega 7.5% de subproducto de madera disminuye la luminosidad. En efecto, también sucedió en los tratamientos (CMP-NaOH, CMP-Quitosano, CMP-Acido esteárico). Lo anterior indica que las muestras PEAD presenta un valor de luminosidad del doble, en comparación con el obtenido por los biocompuestos con subproducto de madera con tratamiento superficial. Por otro lado, se observa que la coloración de  $a^*$  (variación de verde a rojo), fue diferente entre tratamientos y la matriz de PEAD; pero no significativamente diferente entre los tratamientos. De igual manera, los valores de  $b^*$  (azul a amarillo), presentaron el doble de los valores de  $a^*$ ; variando solamente entre tratamientos y el PEAD, pero no entre tratamientos. Por último, el ángulo hue o el ángulo de tono ( $^{\circ}$ HUE) es un parámetro importante en el análisis de color e indica la posición de color del material en la esfera de color. Este parámetro de color mostró que los valores de los biocompuestos CM-7.5, CMP-NaOH, CMP-Acido esteárico, se encuentran en posiciones muy distintivas en cada uno de los tratamientos. El cambio de color de los biocompuesto depende varios factores tanto como de la especie de madera que se está utilizando, y el punto de degradación de la madera (Berns, 2019).

**Tabla V.** Valores de los parámetros de color del biocompuesto.

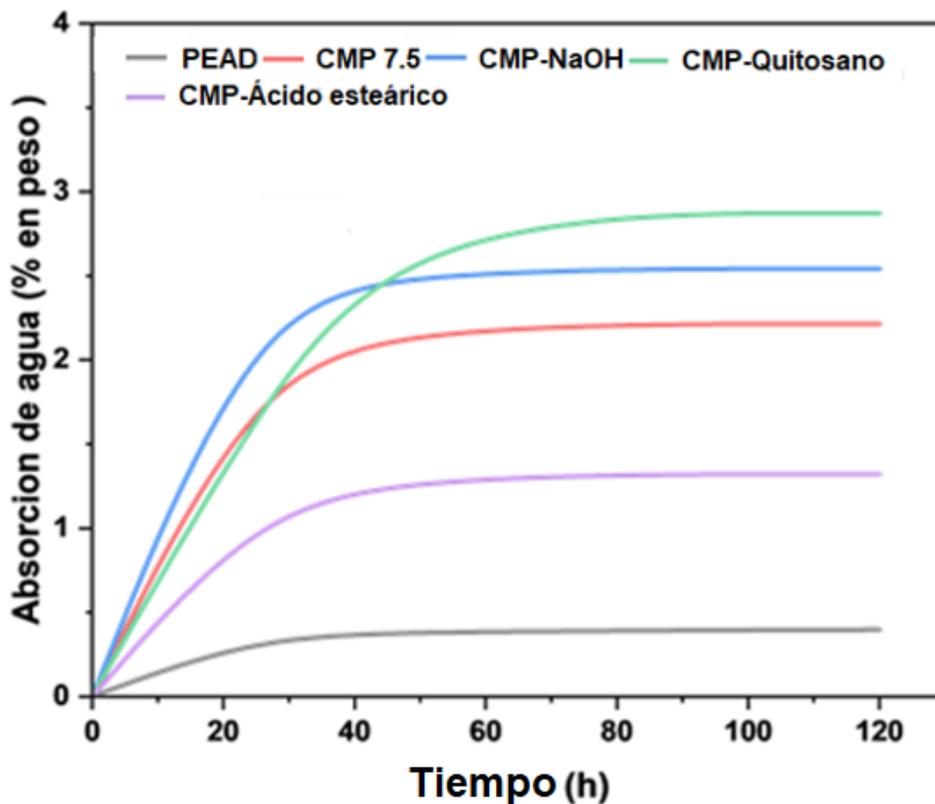
<b>Muestra</b>	<b><i>L</i>*</b>	<b><i>a</i>*</b>	<b><i>b</i>*</b>	<b>°<i>HUE</i>*</b>
<b>PEAD</b>	<b>81.69 ± 0.85<sup>a</sup></b>	<b>1.21 ± 0.061<sup>a</sup></b>	<b>3.83 ± 0.49<sup>a</sup></b>	<b>107.64 ± 1.11<sup>c</sup></b>
<b>CMP 7.5 %</b>	<b>44.09 ± 0.82<sup>b</sup></b>	<b>12.69 ± 0.63<sup>d</sup></b>	<b>22.19 ± 1.87<sup>c</sup></b>	<b>60.10 ± 3.13<sup>a</sup></b>
<b>CMP-NaOH</b>	<b>47.69 ± 0.58<sup>b</sup></b>	<b>10.28 ± 0.55<sup>c</sup></b>	<b>20.45 ± 1.95<sup>c</sup></b>	<b>63.18 ± 2.84<sup>a</sup></b>
<b>CMP- Quitosano</b>	<b>44.38 ± 0.55<sup>b</sup></b>	<b>9.24 ± 0.47<sup>b</sup></b>	<b>14.50 ± 0.72<sup>b</sup></b>	<b>77.23 ± 1.09<sup>b</sup></b>
<b>CMP-Ácido esteárico</b>	<b>46.10 ± 0.35<sup>b</sup></b>	<b>11.93 ± 0.29<sup>d</sup></b>	<b>21.57 ± 0.41<sup>c</sup></b>	<b>61.2 ± 0.27<sup>a</sup></b>

Cada valor representa la media de 4 réplicas ± desviación estándar. Medias con diferente literal en la misma columna indica diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

#### **4.4 Absorción de Agua de los Biocompuestos**

Se evaluó la capacidad de absorción de agua de los biocompuesto obtenidos mediante la construcción de curvas de absorción, las cuales se muestran en la Figura 30. Se puede observar que los biocompuesto adicionados con 7.5% en peso de subproducto de madera sin tratamiento, así como aquellos con tratamiento de ácido esteárico presentan una baja capacidad de absorción de agua; siendo éstos últimos los que menor absorción de agua presentaron (<1.5%), mientras que la matriz de PEAD es de 0.34%. En contraste, los biocompuestos con tratamiento alcalino y con tratamiento de quitosano, estos tienen un incremento en la capacidad de absorción de agua, alcanzando valores del 2.5% y 2.8%, respectivamente. El biocompuesto que presentó mayor capacidad de absorción de agua fue el formulado con subproducto de madera con tratamiento de quitosano. Esta mayor capacidad de absorción de agua puede atribuirse a que el residuo de madera por su conformación estructural, este posee microporos y cavidades donde puede alojarse mayor cantidad de agua (Patil et al., 2000; Pfister et al., 2010).

Además, los biocompuestos que contienen el subproducto de madera sin tratamiento y con tratamiento alcalino presentan una clara tendencia a absorber el agua más rápido (valor de la pendiente). Esta mayor velocidad de absorción permitió que los biocompuestos de madera plástica alcancen la máxima absorción de agua, aproximadamente entre 45 y 60 h. Esta característica de los biocompuestos anteriores, se pueden explicar a la naturaleza del subproducto de madera y al tratamiento superficial recibido; así como a la presencia de grupos hidroxilos y carboxilo que tiene carácter hidrofílico que les imparte el tratamiento (Li et al., 2008). Los biocompuesto con tratamiento con ácido esteárico presentan una baja absorción de agua; eso se atribuye a que la matriz polimérica recubre las partículas de subproducto de madera de una forma homogénea e impermeable (Alemdar et al., 2009; Hosseinaei et al., 2012).

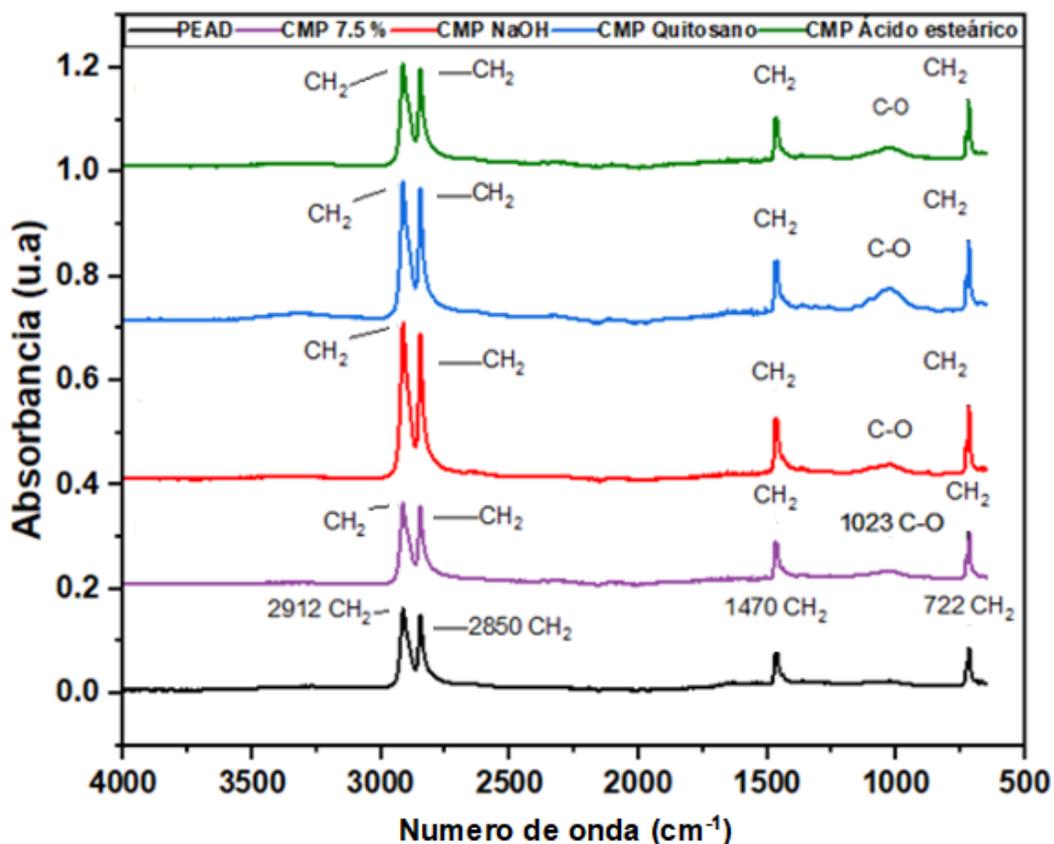


**Figura 31.** Curvas de absorción de agua de los biocompuestos.

#### 4.5 Espectroscopia por Reflexión Total Atenuada (FTIR-ATR) de los Biocompuestos

Los resultados de la espectroscopia FTIR-ATR se muestra en la Figura 31 para el PEAD y los biocompuestos sin y con tratamientos realizados, en el rango de número de onda entre 4000 y 500  $\text{cm}^{-1}$ . Los espectros muestran señales muy similares, independientemente del tratamiento que se haya realizado a las partículas, difiriendo solamente en la intensidad de las señales. Si bien sabemos, que el uso del FTIR permite advertir las interacciones de los grupos funcionales presentes en el PEAD y el subproducto de madera; en estos espectros se observan 5 señales características que se pueden considera como principales. La muestra control de PEAD virgen se caracterizó por presentar las 4 bandas de absorción correspondientes al grupo funcional alifático ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ ) que confirman la presencia de PEAD. Las dos bandas de absorción son de alta intensidad, localizados entre 2980 y 2750  $\text{cm}^{-1}$ , y dos bandas de absorción de baja intensidad, una de ellas entre 1480 y 1420  $\text{cm}^{-1}$ , y la otra entre 740 y 700  $\text{cm}^{-1}$  (Gulmine et al., 2002). La Figura 31 se observó en la banda de absorción del biocompuesto CMP-7.5, que al agregar 7.5% de subproducto de madera sin tratamientos, no se observa una gran diferencia significativa en la intensidad de las bandas características del PEAD en los grupos funcionales alifáticos ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ ) entre 2980 y 2750  $\text{cm}^{-1}$  y entre 1480 y 1420  $\text{cm}^{-1}$ , estiramiento del enlace (C-H) vibración y ( $\text{CH}_2$ ) vibración de flexión de enlace del PEAD y un aumento de intensidad del grupo metileno lineal ( $\text{CH}_2$ ) en 740 y 700  $\text{cm}^{-1}$  (Smith, 1999). Sin embargo, se observan en los espectros de los biocompuestos sin y con tratamiento la intensificación de algunas señales que corresponden a la celulosa incorporada a la matriz de PEAD, como la presente a 1470  $\text{cm}^{-1}$  que se atribuye al grupo metileno ( $-\text{CH}_2-$ ) presente las cadenas de la celulosa (Hospodarova et al., 2018). La señal presente a 1023  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al grupo funcional hidroxilo ( $-\text{OH}$ ) de la celulosa, mientras que la señal a 722  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a los enlaces carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ) del ión carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) de la celulosa (Popescu et al., 2011).

la banda de absorción del biocompuesto CMP-NaOH se observó que, al aplicar el tratamiento alcalino a las partículas de subproducto de madera, se denota un aumento significativo en la intensidad de las bandas de absorción características al PEAD. Se observó un aumento en la banda de absorción presente a  $1023\text{ cm}^{-1}$  respecto a la muestra CMP 7.5, que corresponde al grupo funcional hidroxilo (-OH) de la celulosa y a  $722\text{ cm}^{-1}$  enlaces carbonilo (C=O) la celulosa (Popescu et al., 2011). La Figura 31 presentan el espectro del biocompuesto CMP-Quitosano, este espectro muestra un aumento significativo en la intensidad de las bandas de absorción del grupo alifático (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) entre  $2980\text{-}2750\text{ cm}^{-1}$ , mayor que la muestra control PEAD y el biocompuesto sin tratamientos (CMP-7.5), y ligeramente menor que el biocompuesto con tratamiento alcalino (CMP-NaOH). Se observó un aumento en la intensidad de la banda de absorción entre  $740\text{ y }700\text{ cm}^{-1}$ , señales de las cadenas de carbonos (-C-C-) se observó un aumento significativo en la intensidad de señal a  $1023\text{ cm}^{-1}$  pertenecientes a los enlaces éter (carbono y oxígeno) (-C-O-) en la celulosa como con la deformación de (C-O) en la lignina. (Essabir et al., 2016). La Figura 31 se observa el espectro de absorción del biocompuesto CMP-Acido esteárico, un aumento significativo en la intensidad de las bandas de absorción del grupo alifático (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) entre  $2980\text{-}2750\text{ cm}^{-1}$ , mayor que la muestra control PEAD y la muestra sin tratamientos CMP-7.5, disminuyendo en comparación de la muestra con tratamiento alcalino (CMP-NaOH) y con quitosano (CMP-Quitosano). También se observó un aumento en la intensidad de la banda de absorción, entre  $1480\text{ y }1420\text{ cm}^{-1}$  mayor que la muestra control PEAD y la muestra sin tratamiento CMP-7.5. la banda de absorción en  $1023\text{ cm}^{-1}$  (C-O) característica de celulosa y alcoholes primarios de lignina.



**Figura 32.** Espectroscopia de infrarrojo por reflexión total atenuada FTIR-ATR del PEAD y los biocompuestos formulados.

En conclusión, el PEAD al estar en mayor proporción puede envolver (recubrir) a las partículas de madera, por lo que los grupos hidroxilo se enmascaran gradualmente aumentando las proporciones de polietileno (Sunilkumar et al., 2012; Islam et al., 2012). Se podría suponer razonablemente, que tiene lugar una disminución de los grupos hidroxilo presentes en la celulosa de las partículas de madera, ante la mayor proporción de los grupos metilo y metileno presentes en las cadenas de polietileno; sin embargo, los mismos hallazgos han sido reportados en los estudios de la literatura (Baldock, 2002).

#### **4.6 Propiedades Mecánicas de los Biocompuestos**

Previo a los preliminares obtenidos del ensayo de tensión (ANEXO I) de los biocompuesto a concentraciones de 0, 2.5, 5, 7.5, 10% en peso de subproducto de madera sin tratamientos, se determinó que la formulación con un porcentaje de subproducto de madera de 7.5 % se emplearía para la fabricación de los biocompuestos. Dado que esta formulación presentó el mayor módulo de elasticidad mayor respecto a las formulaciones evaluadas. En el análisis de varianza de una vía se utilizó la prueba de comparación múltiple Tukey-Kramer para contrastación de los resultados y argumentar la decisión. A continuación, en la Tabla 6 se presentan los resultados de las pruebas mecánicas a tensión de la muestra control PEAD y los biocompuestos con 7.5% p/p de subproducto de madera sin y con tratamientos. A los biocompuestos se les determinaron los siguientes parámetros mecánicos: porcentaje de elongación a la ruptura, esfuerzo máximo, y el módulo elástico. En la Figura 32 se observa la curva de esfuerzo-deformación del PEAD (figura insertada) y de los biocompuestos obtenidos. La curva de esfuerzo-deformación de la muestra control PEAD se observa un porcentaje de elongación de 480%. El esfuerzo máximo fue de 23.54 MPa) y un módulo elástico de 580 MPa, estos valores están dentro de los rangos reportados por Askeland (2017) y Kurtz (2016).

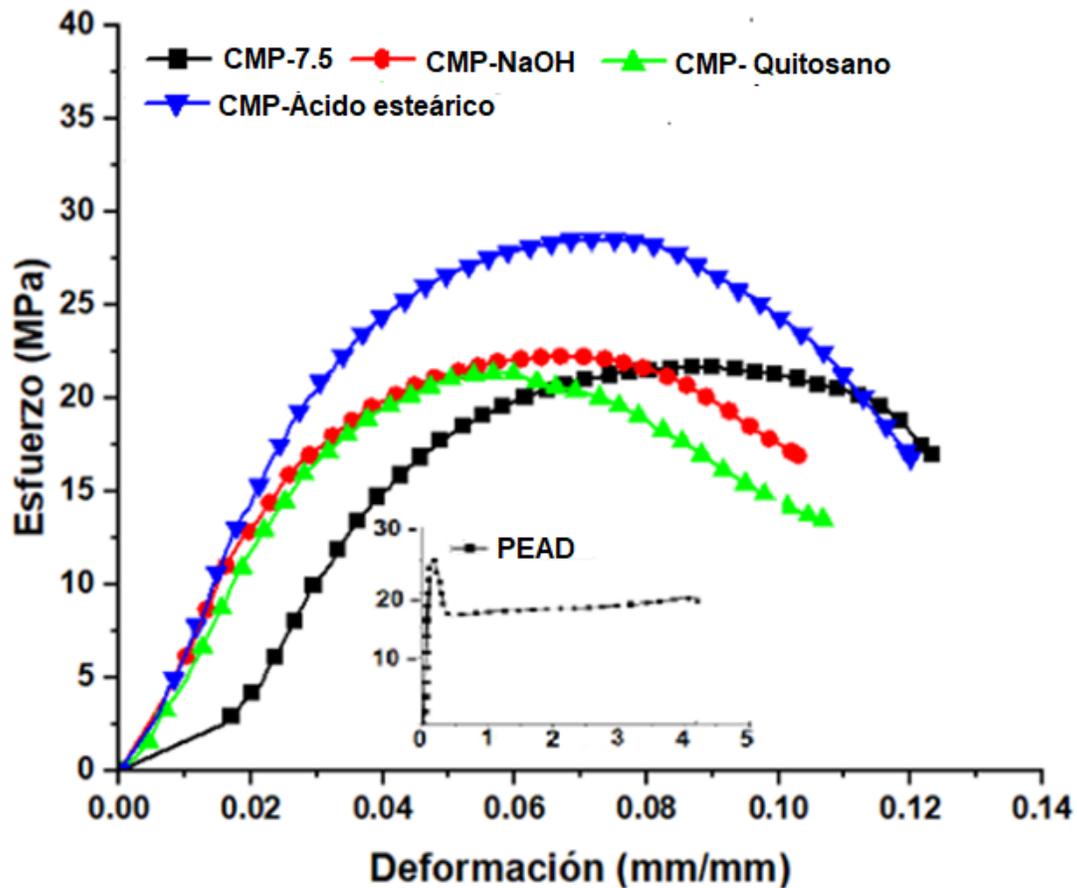


Figura 33. Curva esfuerzo-deformación del PEAD y los biocompuestos con y sin tratamiento.

Tabla VI. Valores de los parámetros mecánicos a tensión del PEAD y los biocompuestos formulados.

Muestra	Elongación a la ruptura (%)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
PEAD	485 <sup>a</sup>	23.54 ± 0.39 <sup>ab</sup>	580.20 ± 26.73 <sup>a</sup>
CMP 7.5	12.32 <sup>b</sup>	21.69 ± 0.49 <sup>a</sup>	635.45 ± 27.08 <sup>ab</sup>
CMP-NaOH	10.29 <sup>b</sup>	22.22 ± 4.45 <sup>a</sup>	791.85 ± 116.14 <sup>bc</sup>
CMP-Quitosano	10.67 <sup>b</sup>	21.65 ± 1.65 <sup>a</sup>	699.15 ± 37.64 <sup>abc</sup>
CMP-Ácido esteárico	12 <sup>b</sup>	28.52 ± 1.83 <sup>b</sup>	882.20 ± 127.14 <sup>c</sup>

Cada valor representa la media de 4 réplicas  $\pm$  desviación estándar. Medias con diferente literal en la misma columna indica diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Se observó que al agregar 7.5% de subproducto de madera sin tratamiento el porcentaje de elongación a la ruptura disminuye a 12%. La muestra CMP-NaOH y CMP-Quitosano presentaron valores muy similares en el porcentaje de elongación a la ruptura de aproximadamente el 10%. El biocompuesto con tratamiento de ácido esteárico (CMP-Acido esteárico) presentó un porcentaje de elongación a la ruptura de 12% de deformación plástica, similar al de los biocompuestos CMP-7.5. La disminución en el porcentaje a la elongación a la ruptura de los biocompuestos obtenidos, se debe a la interrupción de la propagación de la deformación plástica de las cadenas de polietileno al encontrar una partícula de madera.

Se observó que al añadir el 7.5% de subproducto de madera a la matriz de PEAD, el esfuerzo máximo disminuye a 21.69 MPa. Los biocompuestos con tratamiento de Quitosano (CMP-Quitosano) presentaron un esfuerzo máximo de 21.65 MPa muy similar al biocompuesto CMP-7.5. La muestra con tratamiento alcalino presentó un esfuerzo máximo de 22.22 MPa, que a diferencia del biocompuesto CMP-Acido esteárico que presentó un aumento significativo del esfuerzo máximo. El aumento del esfuerzo máximo cuando se trata con NaOH se debe a la eliminación de impurezas que se eliminó de la superficie del relleno subproducto de madera, como lignina, hemicelulosa, grasas y ceras, revelando así grupo funcional químicamente reactivo como  $-OH$  según Syafri et al. (2011).

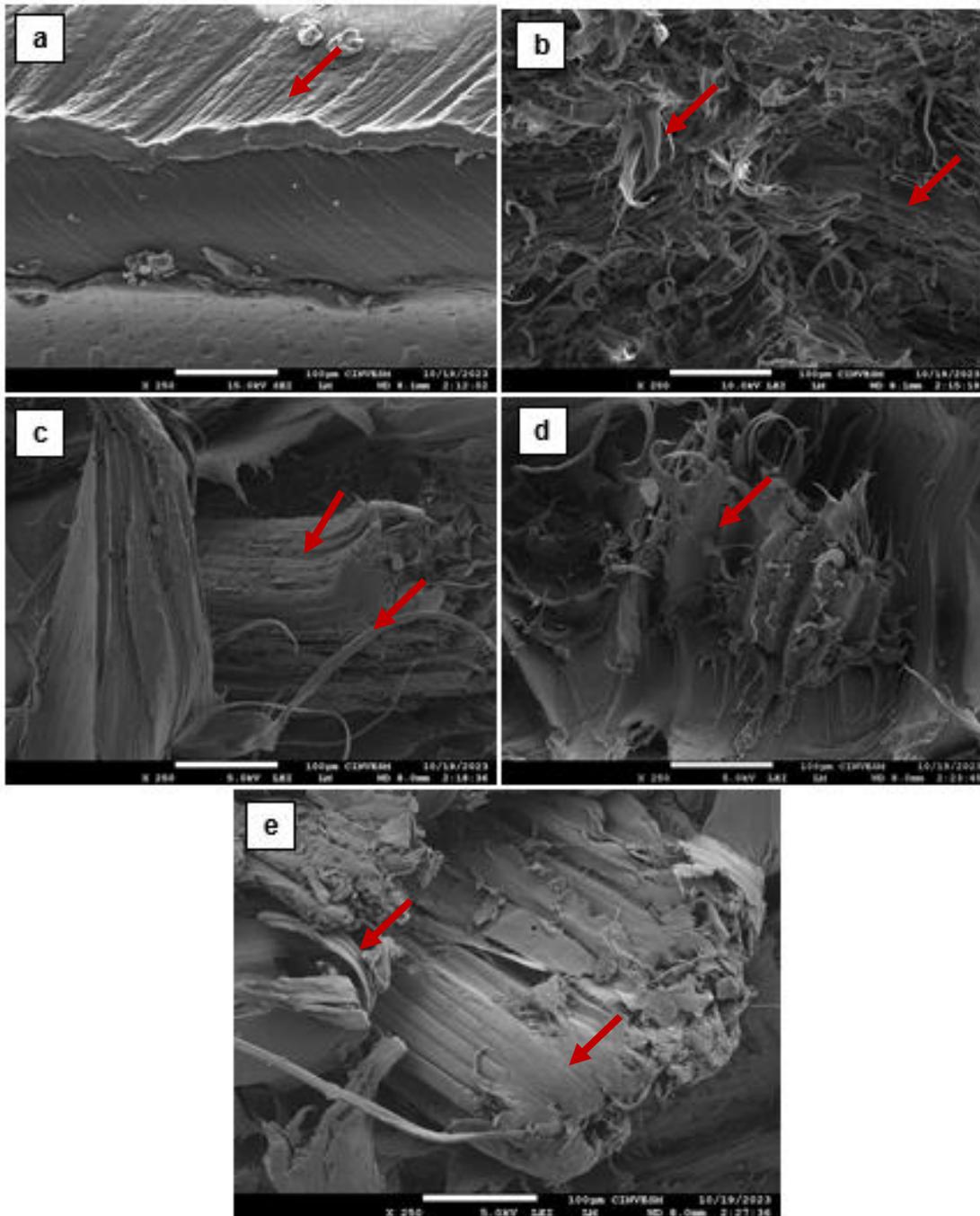
Por otra parte, el módulo elástico aumentó en todos los biocompuestos formulados, el biocompuesto CMP 7.5 alcanza un valor promedio de 635.45 MPa, que supera al módulo elástico del PEAD. La muestra con tratamiento alcalino (CMP-NaOH), presentó un módulo elástico de 791.85 MPa y es el segundo valor más alto entre los biocompuestos. Al observar los resultados de la muestra con tratamiento de quitosano (CMP-Quitosano) este presentó un módulo elástico menor que el biocompuesto de CMP-NaOH. Los biocompuestos con tratamiento de ácido esteárico (CMP-Acido esteárico) presentaron un incremento significativo en el módulo elástico. Esto puede deberse a la superficie lisa lo que permite que las fibras

de madera presenten más adherencia y se distribuyan de manera más uniforme a través de la matriz de PEAD, reteniendo así la dureza de la matriz polimérica de manera más efectiva (Gallagher et al., 2013). El aumento en el esfuerzo máximo y el módulo de los biocompuestos tratados podría ser una indicación de una mejora en la unión fibra-matriz impidiendo la propagación de fallas y grietas críticas, lo que resulta en altas resistencias a la tracción transversal según Liebig et al. (2016).

#### **4.7 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)**

La Figura 33 se muestran las microestructuras de la superficie de fractura de las probetas ensayadas a tensión. Se examinó utilizando la superficie de fractura de los biocompuestos de PEAD y subproducto de madera. En la Figura 33(a) se observa la micrografía del control PEAD, en la cual se tiene evidencia de la formación de cuello y cristalización (formación de fase cristalina). La formación de cuello puede ser estable en los polímeros amorfos, debido a que la alineación local endurece la región de sección reducida como lo menciona (Askeland, 2017). La Figura 33(b), revela que al agregar 7.5% de subproducto de madera sin tratamientos, se pueden ver numerosas cavidades y fibras de PEAD. La presencia de estas cavidades y fibras arrancadas confirma una pobre unión interfacial entre el subproducto de madera y el polímero matriz. La Figura 33(c) se observa en la micrografía del biocompuesto con tratamiento alcalino, en la cual existen claras cavidades donde coexisten la matriz y las fibras, lo que indica una buena adhesión. También es posible se puede notar que las fibras de madera se unen a la matriz y, por lo tanto, se desprenden de la matriz durante la fractura. En la Figura 33(d), observa la micrografía del biocompuesto con tratamiento de quitosano revela las microfibrillas de la matriz, lo que indica que la adhesión entre subproducto y polímero tiene buena adhesión. Eso indica que la propagación de la fractura fue intervenida por las partículas envueltas en la matriz. La Figura 33(d) y 33(e) también muestra la madera está envuelta en la matriz que podría aumentar la resistencia de los compuestos debido al entrelazado mecánico. La dispersión de las fibras de madera en la matriz de PEAD es no es uniforme en comparación con la matriz de PEAD. La estructura

interfacial que se formará en la superficie de la fibra de madera en Figura 33(e) formando esta interfase flexible que puede interrumpir la desunión y la propagación de grietas entre las interfaces fibra/matriz, como informó Nakai et al. (2011).



**Figura 34.** Imágenes del microscopio electrónico de barrido. a) PEAD, b) biocompuesto con 7.5% de subproducto de madera sin tratamiento, c)

biocompuesto con tratamiento alcalino, d) biocompuesto con tratamiento de quitosano y e) biocompuesto con tratamiento de ácido esteárico.

Las imágenes MEB revelaron que no hay una brecha clara entre los restos de madera y la matriz de PEAD, lo que indica una buena unión de la interface polímero-fibra. También se observa una grieta en la Figura 33(e), la cual atraviesa la fibra de madera, lo que podría ser una indicación de transferencia de tensión de la matriz más débil a la fibra de madera más fuerte. La unión interfacial entre el relleno y la matriz de PEAD mejora debido al mecanismo de esterificación, y la fractura se produjo en el propio relleno. Esto significa que la tensión se propaga bien entre el relleno y el polímero matriz, lo que da como resultado una resistencia un módulo mejorado en respuesta a la tensión, como lo señala Balsuriya et al. (2002).

## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

Se procesaron biocompuestos exitosamente mediante la técnica de extrusión compuestos de subproducto de madera y PEAD virgen.

El subproducto de madera presentó un mayor porcentaje acumulado en la malla 60, con un tamaño de partícula de 250  $\mu\text{m}$ . El subproducto de madera presentó una composición de humedad del 20%, 0.08% de proteínas y 4.0% cenizas.

Las imágenes obtenidas del microscopio óptico del subproducto de madera sin tratamientos y con tratamientos se observaron una reducción en el tamaño de las partículas de madera con tratamientos.

Los tratamientos superficiales realizados a las partículas conllevaron a un cambio de color evidente en la superficie de los biocompuestos laminados. El laminado con tratamiento de quitosano presentó una tonalidad distinta a diferencia de los otros laminados con subproducto sin tratamiento, con tratamiento alcalino y ácido esteárico.

La absorción de agua en los biocompuesto con subproducto de madera con tratamiento alcalino y ácido esteárico tienen una baja capacidad de absorción de agua; mientras que la matriz de PEAD es prácticamente nula (0.34 %).

Los resultados del espectro infrarrojo, confirma que el PEAD al estar en mayor proporción. Se podría suponer razonablemente, que tiene lugar a una disminución de los grupos hidroxilo presentes en la celulosa de las partículas de madera, ante la mayor proporción de los grupos metilo y metileno presentes en las cadenas de polietileno.

Las imágenes MEB de las superficies de fractura de los biocompuestos obtenidos a partir de subproducto de madera y PEAD con y sin tratamiento superficial confirma la modificación de la superficie de las partículas de subproducto de madera mejora la unión interfacial.

Los resultados de las propiedades mecánicas a tensión presentaron un aumento en el módulo de elasticidad de los biocompuestos formulados. El porcentaje de

elongación de la muestra control PEAD fue mayor en comparación con la de los biocompuestos formulados. El esfuerzo máximo de la muestra control PEAD fue de 23 MPa, mientras que el biocompuesto con tratamiento de ácido esteárico presentó un incremento significativo (28 MPa).

La producción de biocompuesto a partir de subproductos de madera y PEAD para aplicaciones específicas es una alternativa altamente atractiva para su aplicación industrial; ya que es un material compuesto derivado de subproductos naturales presentando un valor agregado al mismo.

### **5.1.2 Recomendaciones**

Se recomienda continuar con el estudio del sistema en base a los siguientes puntos:

1. Estudiar el impacto del agua como medio solvente en el efecto en las propiedades mecánicas.
2. Estudiar el impacto de las propiedades mecánicas, aumentando el porcentaje de subproducto de madera y variando la concentración de NaOH en el tratamiento alcalino.
3. Evaluar el impacto de las propiedades mecánicas en el aumento del subproducto de madera utilizando quitosano y ácido esteárico sin utilizar ácido acético y etanol como solventes.
4. Estudiar el impacto de la degradación en las propiedades mecánicas.

## **VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Ahmada I., (2008). The effect of alkali treatment and filler size on the properties of sawdust/UPR composites based on recycled PET wastes. *Journal of applied polymer science*, 109(6): p. 3651-3658.
- Alemdar A., Oksman K., Sain M. (2009). The effect of decreased fiber size in wheat straw/polyvinyl alcohol composites. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3(1), 75-80.82
- Amri F, Husseinsyah S, Hussin K. (2013). Mechanical, morphological and thermal properties of chitosan filled polypropylene composites: the effect of binary modifying agents. *Composites Part A* 46:89–95.
- Arnoldi P., Veiga S.O., Polikarpov S., L., (2020). Enzymes for lignocellulosic biomass polysaccharide valorization and production of nanomaterials, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 26, 100397, ISSN 2452-2236.
- Askeland, D. R. Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales México D.F.:* Cengage Learning. (7a ed.Cap. 18- 659.).
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico (2011). Recuperado el día 7 de abril del 2015 en [www.teorema.com.mx/residuos/mexico-genera-3-8-millones-de-toneladas-de-basura-plastica-al-ano-anipac/](http://www.teorema.com.mx/residuos/mexico-genera-3-8-millones-de-toneladas-de-basura-plastica-al-ano-anipac/).
- Avella M, Cosco S, Di Lorenzo ML., (2006). Nucleation activity of nanosized CaCO<sub>3</sub> on crystallization of isotactic polypropylene, in dependence on crystal modification, particle shape and coating. *Eur Polym J*; 42: 1548–1557.
- Aziz T, A. Ullah, H. Fan, M.I. Jamil, F.U. Khan, R. Ullah, B. Ullah, (2021). Recent progress in silane coupling agent with its emerging applications, *J. Polym. Environ.* 29 (11) 3427–3443.
- Azizah R. F., Abdullah T. A., Yusof, N., Ahmad N.S., MegatMohdNoor, J., Fazrena, N. (2020). Enzymatic and genetic characterization of lignin depolymerization by *Streptomyces* sp. S6 isolate from a tropical environment. *Scientific Reports*, Article number: 7813.

- Azwa Z, Yousif B, Manalo A, Karunasena W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Mater. Des.*; 47:424-42.
- Azwa Z, Yousif B, Manalo A, Karunasena W. A (2013). review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Mater. Des.*; 47:424-42.
- Baldock, J.A. (2002). Smernik, Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood, *Org. Geochem.*
- Banco Mundial. (2022). Informe sobre el desarrollo mundial y manejo de residuos solidos. Febrero 11, 2022 publicacion del banco mundial.
- Banco Mundial. (2022). Informe sobre el desarrollo mundial, manejo de residuos sólidos FEBRUARY 11, 2022 Publicaciones del Banco Mundial.
- Balsuriya P.W., Ye L, (2002). Mechanical properties of wood flake polyethylene composites II. Interface modification. *J Appl Polym Sci*; 83:2505–21.
- Bengtsson, M., Gatenholm, P., and Oksman, K. (2005). The Effect of Crosslinking on the Properties of Polyethylene/Wood Flour Composites. *Composites Science and Technology* 65(10): 1468-1479.
- Berns, R. S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. John Wiley & Sons
- Bledzki, A. Faruk O., (2003). Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effect ofFibre Geometry and Coupling Agent on Physico-Mechanical Properties. *Appl. Compos.Mater.* 10 365-379.
- Brostow W, T. Datashvili, Jiang P., Miller H., (2016). “Recycled HDPE reinforced with sol – gel silica modified wood sawdust,” *Eur. Polym. J.*, vol. 76, pp. 28–39
- Chavez P., Thiry J., Pestieau A, Evrard B. (2013). PAT tools for the control of co-extrusion implants manufacturing process. *International Journal of Pharmaceutics*, 458(1), 15-24.

- Cheung HY, Lau KT, Lu TP, Hui D. A (2007). critical review on polymer-based bioengineered materials for scaffold development. *Composites Part B*;38(3):291–300.
- ECOPLAS. (2017). Extraído en junio de 2020, de <https://ecoplas.org.ar/tipos-deplasticos-y-procesos/>.
- Essabir, H. Bensalah, M.O. Rodrigue, D. Bouhfid R., Qaiss, A. (2016). Structural, mechanical and thermal properties of bio-based hybrid composites from waste coir residues: Fibers and shell particles, *Mechanics of Materials*, Volume 93, Pages 134-144, ISSN 0167-6636,
- Fabiyi, J.S.; McDonald, A.G. (2010). Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. *Compos Part a Appl Sci* 41(10): 1434-1440. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.004>
- Fabiyi, J.S.; McDonald, A.G.; Wolcott, M.P.; Griffiths, P.R. (2008). Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. *Polym Degrad Stab* 93(8): 1405-1414. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.05.024>
- Farsi, M., (2000). Thermoplastic Matrix Reinforced with Natural Fibers: A Study on Interfacial Behavior. In *Some Critical Issues for Injection Molding*. pp. 225–247
- Felix, O., Philip G.C., (2020). Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. *Can. J. For. Res.* 50(5) 457 doi: [org/10.1139/cjfr-2019-0319](https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0319)
- Ferreira, J. D., (2013). Preparación y caracterización de compuestos de LDPE reforzados con polvo de corcho y hueso de olivo, para aplicaciones en construcción civil”.
- Fornasieri M., Alves JW, Muniz EC, Ruvolo-Filho A, Otaguro H, Rubira AF., (2011). Synthesis and characterization of polyurethane composites of wood waste and polyols from chemically recycled pet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.;42(2):189-95.

- Fregoso-M, J. N., Goche-, J. R., Rutiaga, J. G., González, R. F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 243-260.
- Gallagher L.W., Mcdonald A.G., (2013). El efecto de las fibras de madera del tamaño de una micra en compuestos de madera y plástico. *Maderas-Cienc. Tecnol.*;15: 357–374.doi: 10.4067/S0718-221X2013005000028.
- Gardner D. J., D. Murdock, (2016) Extrusion of Wood Plastic Composites, *Adv. Eng. Wood Compos. Cent.*, no. Astm, pp. 1–6,
- Gardner, D. J., Han, Y., and Wang, L. (2015). Wood-Plastic Composite Technology. *Current Forestry Reports* 1(3): 139-150. DOI: 10.1007/s40725-015-0016-6
- Ge S, Gu H, Ma J-j, Yang H-Q, Jiang S-c, Liu Z, et al. (2018) Potential use of different kinds of carbon in production of decayed wood plastic composite. *Arab. J. Chem.*;11(6):838-43.
- Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, L.L., (2017). “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Science Advances*, 3(7).
- Gilbert, M. (2017). *Plastics Materials: Introduction and Historical Development*. Brydson’s *Plastics Materials: Eighth Edition*, 1–18.
- Gopakumar S., McDonald A. Li H. (2012). Lignin valorization by forming toughened lignin-co-polymers: development of hyperbranched prepolymers for cross-linking Biomass and Bioenergy 47 99-108
- Goutianos, S.; Peijs, T.; Nystrom, B.; Skrifvars, M. (2006). Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Appl. Compos. Mater.*, 13, 199–215.
- Gulmine J. V., Janissek,P. R. H. Heise M., Akcelrud, L. (2002). “Polyethylene characterization by FTIR,” *Polymer Testing*, vol. 21, n. 5, pp. 557-563.

- Hariprasad K, Ravichandran K, Jayaseelan V, Muthuramalingam T. (2020). Acoustic and mechanical characterisation of polypropylene composites reinforced by natural fibres for automotive applications. *J. Mater. Res. Technol.*;9(6):14029-35.
- Haro Pacheco, A. J., Nájera Luna, J. A., Méndez González, J., Corral Rivas, S., Hernández Díaz, J. C., Carrillo Parra, A., & Cruz-Cobos, F. (2015). Factor de conversión de productos forestales en la industria de tarimas en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30), 90-105.
- Hatti kaul, R., & Ibrahim, V. (2013). Lignin degrading enzymes: an overview in Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Polymers, 167–192.
- Henriksson, G. (2008). Lignin. En G. Gellerstedt (Ed.), *The Ljungberg Textbook Wood Chemistry*. Estocolmo.
- Holbery, J., and Houston, D. (2006). Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications. *JOM* 58(11): 80-86. DOI: 10.1007/s11837-006-0234-2
- Hospodarova, V., Singovszka, E. and Stevulova, N. (2018). Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry*, 9, 303-310. <https://doi.org/10.4236/ajac.2018.96023>
- Hosseinaei O., Wang S., Taylor A., Kim J. (2012). Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood-plastic composites. *International Biodeterioration and Biodegradation* 71:29-35.
- Hyvärinen M, Ronkanen M, Kärki T. (2019). The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite. *Compos. Struct.*; 210:321-6.
- Idrus, M.M., Hamdan, S. Md. Md. Rezaur Rahman, Islam, S. (2011). Treated tropical wood sawdust-polypropylene polymer composite: Mechanical and morphological study. *J. Biomater. Nanobiotechnol.*, 2 435-436.

- Isikgor, F.H., & Becer, C.R. (2015). Ligno cellulosic biomass: a sustainable platform for the production of biobased chemicals and polymers. *Polym.Chem*,4497–4559.
- Islam, M.S. Hamdan, S. Hasan, M. Ahmed, A.S. M.R. (2012). Rahman, Effect of coupling reactions on the mechanical and biological properties of tropical wood polymer composites (WPC), *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 72 108–113.
- Jiang HH, Kamdem DP, Bezubic B, Ruede P. (2003). Mechanical properties of poly (vinyl chloride) /wood flour/glass fiber hybrid composites. *J Vinyl Addit Technol*;9(3):138–45.
- Jiang L, He C, Fu J, Wang L. (2018). Serviceability analysis of wood–plastic composites impregnated with paraffin-based Pickering emulsions in simulated sea water–acid rain conditions. *Polym. Test.*; 70:73-80.
- Jiang Y, Yarin AL, Pan Y. (2020). Printable highly transparent natural fiber composites. *Mater. Lett.*; 277:128290.
- Johnson, R. K., Zink-Sharp, A., Renneckar, S. H., and Glasser, W. G. (2008). Mechanical Properties of Wetlaid Lyocell and Hybrid Fiber-Reinforced Composites with Polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(3): 470-477.
- Kabir, M (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Compos. Part B: Eng.*, 43 2883-2892.
- Kalia, S. B. Kaith, and I. Kaur, (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites a review. *Pol. Eng. Sci.* 49 1253-1272.
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.
- Kazemi, Y., Cloutier, A. & Rodrigue, D., (2013). Mechanical and Morphological Properties of Wood Plastic Composites Based on Municipal Plastic Waste. *polymer composite*, pp.487–493.

- Kiattipanich, N. N. Kreua-Ongarjnukool, T. Pongpayoon, C. Phalakornkule, (2007). Properties of polypropylene composites reinforced with stearic acid treated sugarcane fiber, *J. Polym. Eng.* 27 (6–7) 411–428.
- Kim B. (2012). Pretreatment of cellulosic waste sawdust into reducing sugars using mercerization and etherification. *BioResources* 7(4): p. 5152-5166.
- Kim K, White JL, Shim S, et al. (2004). Effects of stearic aluid coated talc, CaCO<sub>3</sub>, and mixed talc/CaCO<sub>3</sub> particles on the rheological properties of polypropylene compounds. *J Appl Polym Sci*; 93: 2105–2113.
- Kim, S.-K. E. (2010). *Chitin, Chitosan, Oligosaccharides and Their Derivatives: Biological Activities and Applications* (1st ed.). CRC Press.
- Klyosov, A. A. (2007). *Wood-Plastic Composites*. WILEY-INTERSCIENCE A JOHN WILEY & SONS, INC.,
- Kokta BV, Maldas D, Daneault C, Beland P. (1990). Composites of polyvinyl chloride– wood fibers. I: effect of isocyanate as a bonding agent. *Polym-Plast Technol*;29(1–2):87–118.
- Ku, H.; Wang, H.; Pattarachaiyakoop, N.; Trada, M. A (2011). Review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Compos. Part B Eng.*, 42, 856–873.
- Kurtz, S.M. (2016). *Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, 3rd ed.; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands. pp. 1–6, ISBN 9780323354011.
- Laurent, M., Matuana, L.M S. Jin, N.M. (2011). Stark, Ultraviolet weathering of HDPE/ wood-flour composites coextruded with a clear HDPE cap layer.
- Li Y., Hu C., Yu Y. (2008). Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites* 39, 570-578.

- Liebig, W.V.; Leopold, C.; Hobbiebrunken, T.; Fiedler, B. (2016). New test approach to determine the transverse tensile strength of CFRP with regard to the size effect. *Compos. Commun.* 1, 54–59.
- Lin X, Zhang Z, Zhang Z, Sun J, Wang Q, Pittman CU. (2018). Catalytic fast pyrolysis of a woodplastic composite with metal oxides as catalysts. *Waste Manage.* 2018; 79:38-47.
- Loften, JR., Linn, JG; Drackley, JK; Jenkins, TC; Söderholm, CG; Kertz, AF (2014). Revisión invitada: metabolismo del ácido palmítico y esteárico en vacas lecheras lactantes. *Revista de ciencia láctea.* 97 (8): 4661–4674.doi:10.3168/jds.2014-7919. ISSN 0022-0302.
- Lopez J., Vilaplana J. Jiménez A. (2011). Study of the influence of heating rate in degradation parameters of common polymers *Recent Research Developments in Macromolecules Research* 39, 454-458
- Lu XL, Qiu ZY, Wan Y, Hu ZL, Zhao YX. (2010) Preparation and characterization of conducting polycaprolactone/chitosan/polypyrrole composites. *Composites Part A*;41(10):1516–23.
- Lu, JZ, Wu QL, Negulescu IL. (2002). The influence of maleation on polymer adsorption and fixation, wood surface wettability, and interfacial bonding strength in wood–PVC composites. *Wood Fiber Sci*;34(3):434–59.
- Maldas D, Kokta BV. (1989) Improving adhesion of wood fiber with polystyrene by the chemical treatment of fiber with a coupling agent and the influence on the mechanical properties of composites. *J Adhes Sci Technol*;3(1):529–39.
- Malkapuram, R. V. Kumar, and Y.S. Negi, (2009) Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *J. Reinforced Plast. Compos.*28 1169-1189.
- Martinez AP, Cortez MO, Ezquera JM, Graciano AZ, Rodriguez F, Castillo MM., (2010). Chitosan composite films: thermal, structural, mechanical and antifungal properties. *Carbohydr Polym*;82(2):305–15.

- Matthews S, Toghyani AE, Ovaska S-S, Hyvärinen M, Tanninen P, Leminen V, et al. (2018) Role of moisture on press formed products made of Wood Plastic Composites. *Procedia Manuf.*; 17:1090-6.
- Melosi M. (2005). *Garbage in the cities*. USA: University of Pittsburgh Press.
- Mohan T, and K. Kanny, (2012) Chemical treatment of sisal fiber using alkali and clay method. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.* 43:1989-1998.
- Mokhothu, T.H.; John, M.J. (2015) Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. *Carbohydr. Polym.* 131, 337–354
- Monhanty, A. K., Misra, M., and L. T. (2005) Drzal, Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview, *Compos. Interf.* 8, 313–343
- Najafi S. K., (2013) Use of recycled plastics in wood plastic composites A review, *Waste Manag.*, vol. 33, no. 9, pp. 1898–1905.
- Nakai A, Ohtani A, Ohki T, Osada T, Iwamoto M, Hamada H, Takeda N. (2011.). Mechanical Properties of FlatBraided Composite with Flexible Interphase. *Proceeding of 18th International Conference on Composite Materials*
- Ndiaye, D. M. Gueye, and B. Diop, (2013) Characterization, Physical and Mechanical Properties of Polypropylene/Wood-Flour Composites. *Arabian J. Sci. Eng.* 38 59-68.
- Nikzad, M. Masood, S.H. Sbarski, I. (2011) Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling, *Mater. Design*, 32 3448-3456. doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.056
- Nozari, O., Madanipour, M., Farsi, M., Tabei, A., (2013). Mechanical Properties and water uptake of Nanoclay / Wood Flour / LDPE Composite After Fiber Surface Mercerization. *Cellulose Chemistry and Technology*, 47, pp.295–301.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook 1st ed.*. London-Washington DC: Earthscan

- Ojeda, M (2011), Extraído en marzo de 2020, de tecnología de los plásticos polietileno de altadensidad <https://ecoplas.org.ar/tipos-deplasticos-y-procesos>.
- Oke DB and Oke MO (2007). Effects of feeding graded levels of sawdust obtained from Daniellia ogea tree on the performance and carcass characteristics of broiler chickens. *Research Journal of Poultry Sciences*,1(1): 12-15.
- Olajuyigbe, F.M., Fatokun, C.O., & Oyelere, O.M. (2018). Biodelignification of some agroresidues by *Stenotrophomonas* CFB09 and enhanced production of ligninolytic enzymes. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*,120–130.
- Pandey, K.K. A (1999). study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *J. Appl. Polym. Sci.*, 71(12), 1969–1975.
- Patil Y., Gajre B., Dusane D., Chavan S., Mishra S. (2000). Effect of maleic anhydride treatment on steam and water absorption of wood polymer composites prepared from wheat straw, cane bagasse, and teak wood sawdust using novolac as matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(13), 2963-7.
- Paul S. Boudenne A., Ibos L., Candau Y., Kurubilla J., Thomas S. (2008). Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite *Composites*, 39(9), 1582-1588
- Petchwattana N, Sanetuntikul J, Sriromreun P, Narupai B. (2017) Wood Plastic Composites Prepared from Biodegradable Poly (butylene succinate) and Burma Padauk Sawdust (*Pterocarpus macrocarpus*): Water Absorption Kinetics and Sunlight Exposure Investigations. *J. Bionic Eng.*;14(4):781-90.
- Pfister D, Baker J, Henna P, Lu Y., Larock R. (2008). Preparation and properties of tung oil-based composites using spent germ as natural filler. *Journal of*
- Platt B. (2015). Biodegradable Plastics: ¿True or False? ¿Recuperado el 15 de abril del Good or Bad? 2015. En [www.sustainableplastics.org/spotlight/biodegradable-plastics-true-of-false-good-or-bad](http://www.sustainableplastics.org/spotlight/biodegradable-plastics-true-of-false-good-or-bad)

- Popescu, M.C., Popescu, C.M., Lisa, G. and Sakata, Z. (2011). Evaluation of Morphological and Chemical Aspects of Different Wood Species by Spectroscopy and Thermal Methods. *Journal of Molecular Structure*, 988, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.004>.
- Rahman, M.R., Islam, M.N., Huque, M.M., (2012) Influence of fiber treatment on the mechanical and morphological properties of sawdust reinforced polypropylene composites. *J. Pol. Environ.* 18 443-450.
- Ramesh RS, Sadashivappa K, Sharanaprabhu L. (2018) Physical and Mechanical Properties: Hot pressed Phenol Formaldehyde based Wood Plastic Composite. *Materials Today: Proceedings.*;5 :25331-40.
- Roca G. (2005). Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD). Trabajo Final. Universidad de San Carlos de Guatemala, pp. 2,81,82
- Salme, J, y M. Verónica, (2015) Diseño de una Planta Piloto para la Obtención de Granza de Madera Plástica a Partir de Polietileno Reciclado con Partículas Lignocelulósicas (Aserrín)
- Shah, B. L., Matuana, L. M., & Heiden, P. A. 2005. Novel coupling agents for PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 11(4), 160-165.
- Shekar, H.S.; Ramachandra, M. Green Composites (2018). A Review. *Mater. Today*, 5, 2518–2526
- Simões, C. L., Pinto, L. M. C., & Bernardo, C. a. (2014). Environmental and economic analysis of end of life management options for an HDPE product using a life cycle thinking approach. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 32(5), 414–22.
- Singh J. (2011) Comparative studies of physical characteristics of raw and modified sawdust for their use as adsorbents for removal of acid dye. *BioResources*. 6 2732-2743.

- Singh N., D. Hui, R. Singh, I. Ahuja, L. Feo y F. Fraternali, Recycling of plastic solid waste, (2017) A state of art review and future applications, Composites Part B: Engineering, vol. 115, pp. 409-422.
- Singh, J. (2011). Comparative studies of physical characteristics of raw and modified sawdust for their use as adsorbents for removal of acid dye. *BioResources*. 6 (2011) 2732-2743.
- Smith, B.C. (1998). *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203750841>.
- Sobczak, L.; Brüggemann, O.; Putz, R.F. (2012). Polyolefin composites with natural fibers and wood-modification of the fiber/filler–matrix interaction. *J. Appl. Polym. Sci.*, 127, 1–17.
- Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C., & Thongsang, S. (2003). Effect of 164 wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites. *Polymer International*, 52(12), 1847-1855.
- Sommerhuber P. F, J. Welling, and A. Krause, (2015) Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood – Plastic Composites, *Waste Manag.*, vol. 46, pp. 76–85,
- Sunilkumar, M. Francis, T. Thomas, E.. Sujith, A (2012). Low density polyethylene – chitosan composites: a study based on biodegradation, *Chem. Eng. J.* 204– 206 114–124
- Syafri R. I. Ahmad I. Abdullah Sains Malays. (2011) Effect of Rice Husk Surface Modification by LENR the on Mechanical Properties of NR/HDPE Reinforced Rice Husk Composite 40, 749–756.
- Taufiq MJ, Mansor MR, Mustafa Z. 2018. Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend. *Compos. Struct.*; 189:510-5.

- Toghyani A, Matthews S, Varis J. (2019). Effect of dwell time and press speed on the forming quality of the press formed wood plastic composite product. *Procedia CIRP*. 2019; 81:524-8
- Turku I, Keskiisaari A, Kärki T, Puurtinen A, Marttila P. 2017. Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. *Compos. Struct.*; 161:469-76.
- Van L.S., Jensen, P. A., Frandsen, F. J., Glarborg, P. (2006). Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. Part 1: Development and evaluation of quantification methods. *Energy & Fuels*, 20(3), 964–978.
- Vasile C, Darie RN, Cheaburu-Yilmaz CN, Pricope GM, Brac̃ic̃ M, Pamfil D., (2013). Low density polyethylene–chitosan composites. *Composites Part B*; 55:314–23.
- Vassilev, S. V., Baxter , D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
- Vedrtnam A, Kumar S, Chaturvedi S. 2019 Experimental study on mechanical behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering and ultraviolet radiation of woodplastic composites. *Composites Part B: Engineering.*; 176:107282.
- Vilchis D., J., Fernando, Tesis de Licenciatura 2006, Funcionalización y compatibilización de poliolefinas vía extrusión reactiva, Facultad de Química UNAM pág. 6-31
- Villada H., Acosta H. 2007. Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. *Temas Agrarios*, 12(2), 5-13.
- Wu T., Chien Y., Chen T., Wu J., (2013). The influence of hot-press temperature and cooling rate on thermal and physicomechanical properties of bamboo particle-poly(lactic) acid composites. *Holzforschung*, 67(3), 325-331.
- Yeh, Sh.; Agarwal, S.; Gupta, R. K. (2009). Wood–plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. *Composites Sc. and Tech.* 69(13): 2225-2230.
- Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B. 2009. Mechanical Characteristics of Aged Hinoki wood from Japanese Historical Buildings. *Compte*.

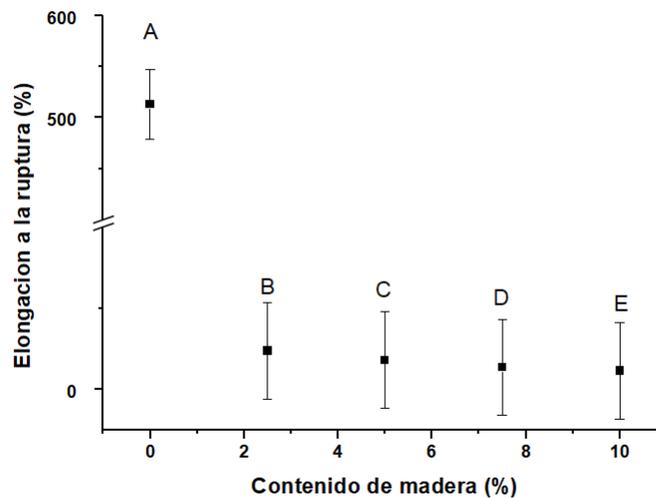
- Youssef AM, Hasanin MS, Abd El-Aziz ME, Darwesh OM. Green, (2019) economic, and partially biodegradable wood plastic composites via enzymatic surface modification of lignocellulosic fibers. *Heliyon.*;5(3): e01332.
- Zafeiropoulos, N.E. Williams, D.R. Baillie, C.A. Matthews, F.L. (2002). Engineering and characterisation of the interface in flax fiber/polypropylene composite materials. Part I. Development and investigation of surface treatments, *Compos. Appl. Sci. Manuf.* 33 (8) 1083–1093.
- Zhao, Y. (2008). "Enhanced enzymatic hydrolysis of spruce by alkaline pretreatment at low temperature". *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 99 N 6, pp. 1320-1328.
- Zhou Y, Stanchev P, Katsou E, Awad S, Fan M. A 2019. Circular Economy use of Recovered Sludge Cellulose in Wood Plastic Composite Production: Recycling and Eco-Efficiency Assessment. *Waste Manage*; 99:42-8.
- Zhu, Y., Romain, C., & Williams, C. K. (2016). Sustainable polymers from renewable resources. *Nature*, 540(7633), 354–362.
- Zoia, L., King, A. W. T., Argyropoulos, D. S. 2011. Molecular weight distributions and linkages in lignocellulosic materials derivatized from ionic liquid media. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 829–838.
- Zou, P. Xiong, H.G. S.W. (2008). Tang, *Carbohydr. Polym.*
- Zuiderduin WCJ, Westzaan C, Huetink J, (2003). Toughening of polypropylene with calcium carbonate particles. *Polymer*; 44: 261–275.

## **VII. ANEXOS**

## Análisis Estadístico Preliminar Ensayo de Tensión

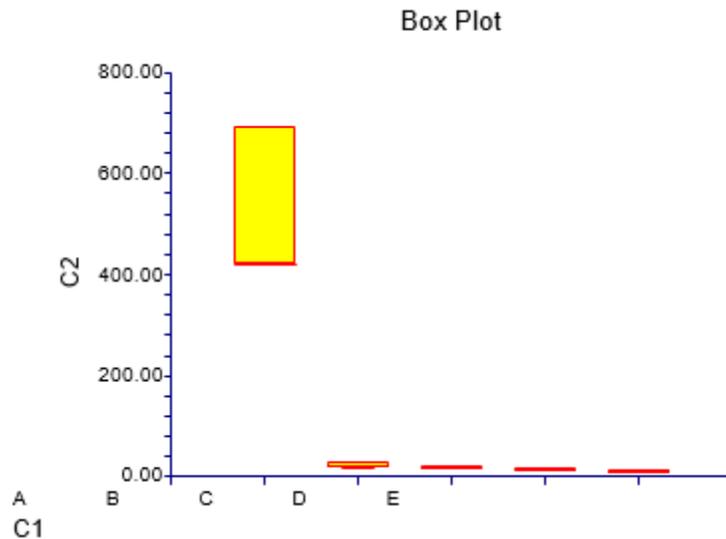
El análisis de varianza del resultado de las propiedades mecánicas a tensión de los biocompuesto con 0, 2, 5, 7.5, 10 % en peso de subproducto de madera sin tratamientos. Se realizó un análisis de varianza de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tensión. A partir de los resultados obtenidos se calculó, el porcentaje de elongación a la ruptura, el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad. En el análisis de varianza de una vía se utilizó la prueba de comparación múltiple Tukey-Kramer, para observar las diferencias significativas entre los grupos, de tratamientos (formulaciones) y la variable de respuesta analizada. A continuación, se presenta la gráfica de los valores promedio del porcentaje de elongación a la ruptura en función del contenido de la partícula de las partículas de madera.

### Elongación a la ruptura %



Tests of Assumptions Section			
	Test	Prob	Decision
Assumption	Value	Level	(0.05)
Skewness Normality of Residuals	3.2106	0.001325	Reject
Kurtosis Normality of Residuals	3.6000	0.000318	Reject

Omnibus Normality of Residuals	23.2676	0.000009	Reject
Modified-Levene Equal-Variance Test	1.5085	0.252955	Accept
Box Plot Section			



**Expected Mean Squares Section**

Source	Term	DF	Term	Denominator	Expected Mean Square
	A: C1	4	Yes	S(A)	$\frac{S+A}{S(A)}$
	S(A)	14	No		S(A)

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

**Analysis of Variance Table**

**Source**

Term	DF	Squares	Square	F-Ratio	Level	(Alpha=0.05)
A: C1	4	622448.9	155612.2	44.71	0.000000	1.000000
S(A)	14	48722.43	3480.174		*	
Total (Adjusted)	18	671171.3				
Total	19					

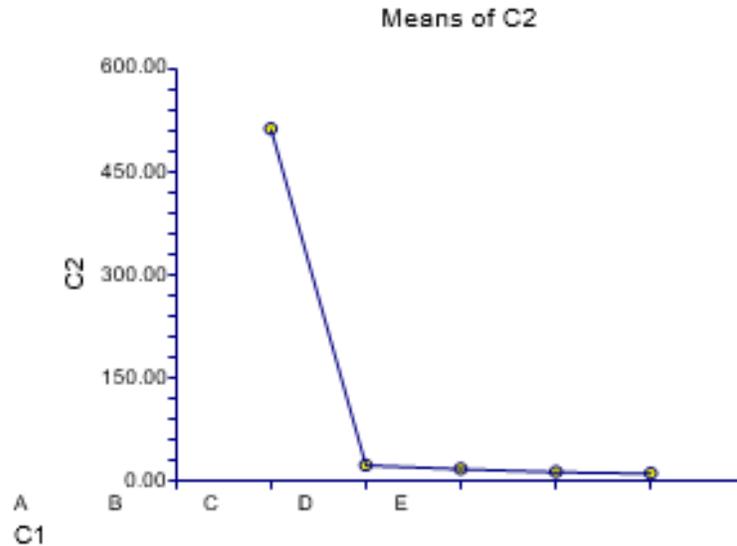
### Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on RanksHypotheses

**Ho: All medians are equal.**

**Ha: At least two medians are different.**

Test Results					
Method	DF	Chi-Square (H)	Prob Level	Decision(0.05)	
Not Corrected for Ties	4	15.58816	0.003625	Reject Ho	
Corrected for Ties	4	15.60184	0.003603	Reject Ho	
Number Sets of Ties	1				
Multiplicity Factor	6				
Group Detail					
Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A	3	54.00	18.00	2.6833	426
B	4	56.50	14.13	1.6500	24.15
C	4	41.50	10.38	0.1500	17.5
D	4	24.00	6.00	-1.6000	12.8035
E	4	14.00	3.50	-2.6000	11.285
Means and Effects Section					
Term	Count	Mean	Standard Error	Effect	
All	19	95.11826		30.52957	
A: C1A	3	513	34.05962	482.4704	
B	4	23.7	29.4965	-6.829566	
C	4	18.125	29.4965	-12.40457	
D	4	13.70425	29.4965	-16.82532	
E	4	11.5325	29.4965	-18.99707	

## Plots of Means Section



Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Respon  
se: C2  
Term  
A: C1

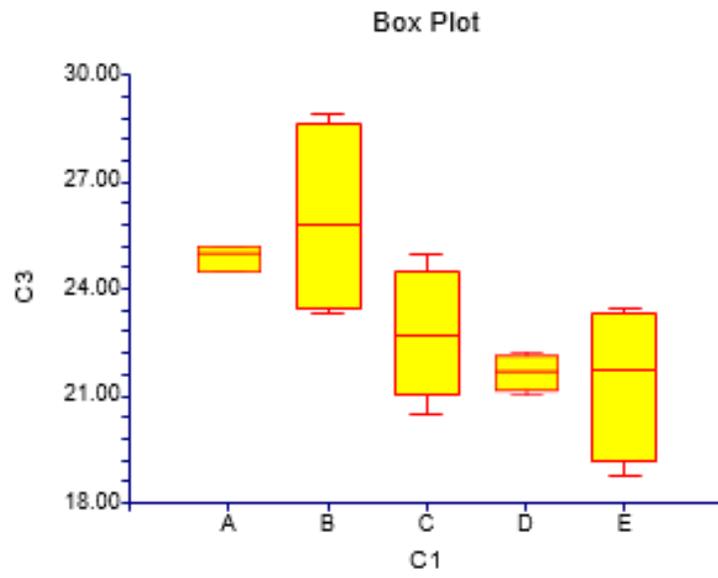
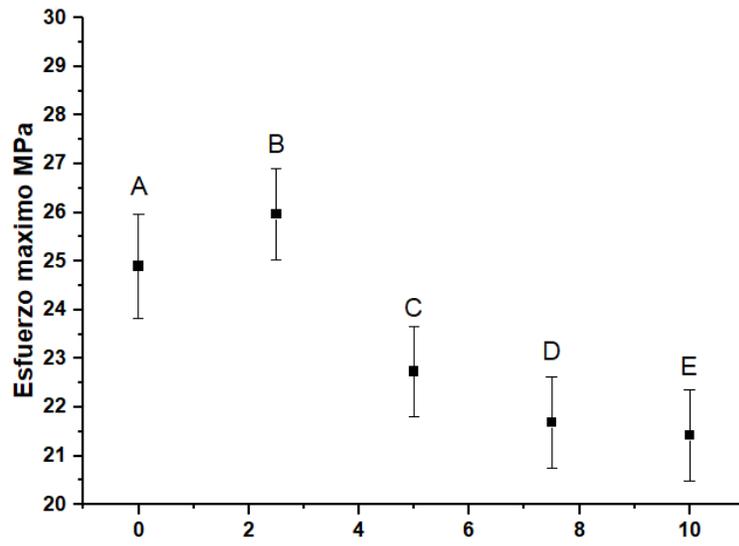
Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=14 MSE=3480.174 Critical Value=4.4066

Group	Count	Mean	Different From Groups
E	4	11.5325	A
D	4	13.70425	A
C	4	18.125	A
B	4	23.7	A
A	3	513	E, D, C, B

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

**Esfuerzo máximo**



**Expected Mean Squares Section**

Source	Term	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
	A: C1	4	Yes	S(A)	$\frac{S+sA}{4}$
	S(A)	14	No		S(A)

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

**Analysis of Variance Table**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Power (Alpha=0.05)
A: C1	4	61.87286	15.46821	4.45	0.015735*	0.828273
S(A)	14	48.63765	3.474118			
Total (Adjusted)	18	110.5105				
Total	19					

\* Term significant at alpha = 0.05

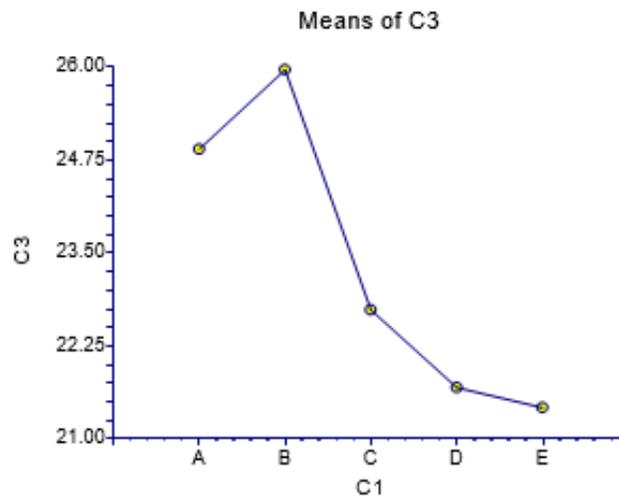
**Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks Hypotheses**

Ho: All medians are equal.

Ha: At least two medians are different

Test Results					
Method	DF	Chi-Square (H)	Prob Level	Decision(0.05)	
Not Corrected for Ties	4	11.05526	0.025950	Reject Ho	
Corrected for Ties	4	11.05526	0.025950	Reject Ho	
Number Sets of Ties	0				
Multiplicity Factor	0				
Group Detail					
Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A	3	47.00	15.67	1.9007	25.03
B	4	61.00	15.25	2.1000	25.8505
C	4	35.00	8.75	-0.5000	22.733
D	4	22.00	5.50	-1.8000	21.7335
E	4	25.00	6.25	-1.5000	21.73

Means and Effects Section				
			Standard Error	
Term	Count	Mean		Effect
A C 1 A	All	19	23.26031	6.142711
		3	24.9	1.076122
	B	4	25.9665	0.931949 3
	C	4	22.7347 5	0.931949 3
	D	4	21.6907 5	0.931949 3
E	4	21.4195	0.931949 3	15.27679



### Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: C3Term A: C1}

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=14 MSE=3.474118 Critical Value=4.4066

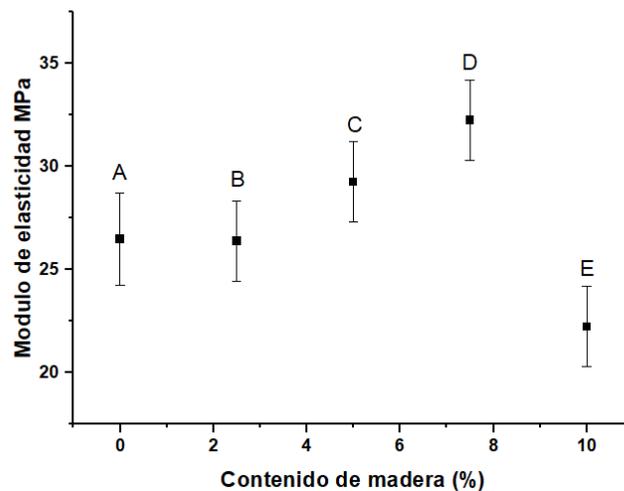
Group	Count	Mean	Different From Groups
E	4	21.4195	B

<b>D</b>	<b>4</b>	<b>21.69075</b>	<b>B</b>
<b>C</b>	<b>4</b>	<b>22.73475</b>	
<b>A</b>	<b>3</b>	<b>24.9</b>	
<b>B</b>	<b>4</b>	<b>25.9665</b>	<b>E, D</b>

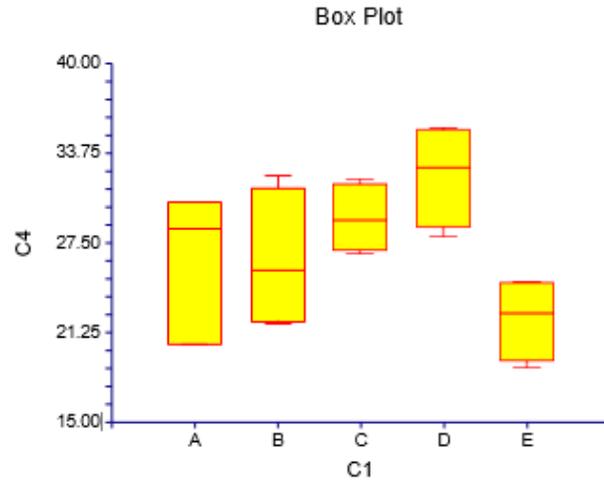
Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

### Módulo elástico



<b>Tests of Assumptions Section</b>			
<b>Assumption</b>	<b>Test Value</b>	<b>Prob Level</b>	<b>Decision (0.05)</b>
<b>Skewness Normality of Residuals</b>	<b>-0.3742</b>	<b>0.708237</b>	<b>Accept</b>
<b>Kurtosis Normality of Residuals</b>	<b>-1.6274</b>	<b>0.103655</b>	<b>Accept</b>
<b>Omnibus Normality of Residuals</b>	<b>2.7884</b>	<b>0.248028</b>	<b>Accept</b>
<b>Modified-Levene Equal-Variance Test</b>	<b>0.6435</b>	<b>0.640428</b>	<b>Accept</b>
<b>Box Plot Section</b>			



### Expected Mean Squares Section

Source	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
A: C1	4	Yes	S(A)	$\frac{S+sA}{S(A)}$
S(A)	14	No		$\frac{S(A)}{S(A)}$

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

### Analysis of Variance Table

Source	Sum of Squares	Mean Square	Prob	Power
A: C1	221.1228	55.2807	0.0307	0.738743
S(A)	212.0215	15.1443	95*	
Total (Adjusted)	433.1443			
Total				

\* Term significant at alpha = 0.05

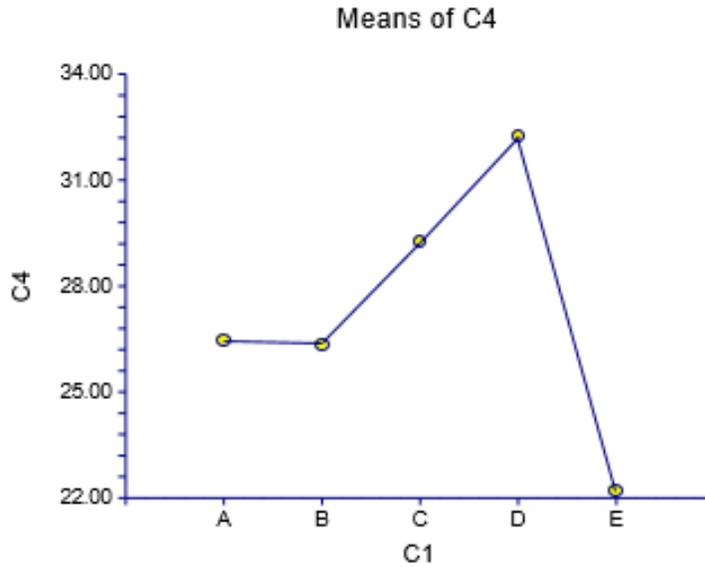
### Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks Hypotheses

Ho: All medians are equal.

Ha: At least two medians are different.

Test Results			Chi-Square	Prob	
Method		DF	(H)	Level	Decision(0.05)
Not Corrected for Ties		4	8.58421	0.072375	Accept Ho
Corrected for Ties		4	8.58421	0.072375	Accept Ho
Number Sets of Ties		0			
Multiplicity Factor		0			
Group Detail					
		Sum of	Mean		
Group	Count	Ranks	Rank	Z-Value	Median
A	3	26.00	8.67	-0.4472	28.61
B	4	38.00	9.50	-0.2000	25.6875
C	4	47.00	11.75	0.7000	29.16
D	4	62.00	15.50	2.2000	32.785
E	4	17.00	4.25	-2.3000	22.6655
Means and Effects Section					
				Standard	
Term	Count	Mean	Error	Effect	
All	19	27.36189		7.188851	
A: C1 A	3	26.47667	2.246804	19.28782	
B	4	26.3775	1.94579	19.18865	
C	4	29.2575	1.94579	22.06865	
D	4	32.24325	1.94579	25.0544	
E	4	22.23325	1.94579	15.0444	

## Plots of Means Section



### Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: C4 Term A: C1

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=14 MSE=15.14439 Critical Value=4.4066

Group	Count	Mean	Different From Groups
E	4	22.23325	D
B	4	26.3775	
A	3	26.47667	
C	4	29.2575	
D	4	32.24325	E

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

**Análisis varianza pruebas mecánicas a tensión de los biocompuestos con  
7.5 % en peso de subproducto de madera con tratamientos**

**One-Way Analysis of Variance Report**

Dataset     Untitled  
Response    Elongacion\_\_  
Factor       Muestra

**Residual Normality Assumption Tests**

---

<b>Test Name</b>	<b>Test Statistic</b>	<b>P-Value</b>	<b>Reject Normality at <math>\alpha = 0.2?</math></b>
Shapiro-Wilk	0.5462	0.00000	Yes
Anderson-Darling	4.3089	0.00000	Yes
D'Agostino Skewness	3.2156	0.00130	Yes
D'Agostino Kurtosis	3.6055	0.00031	Yes
D'Agostino Omnibus (Skewness and Kurtosis)	23.3397	0.00001	Yes

---

**Equality of Group Variances Assumption Tests**

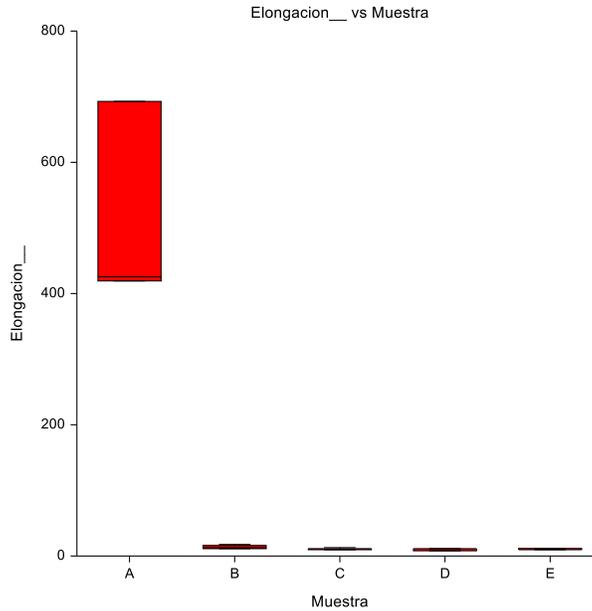
---

<b>Test Name</b>	<b>Test Statistic</b>	<b>P-Value</b>	<b>Reject Equal Variances at <math>\alpha = 0.2?</math></b>
Brown-Forsythe (Data - Medians)	1.5414	0.24411	No
Levene (Data - Means)	23.0511	0.00000	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	12.5507	0.01369	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	77.4204	0.00000	Yes

---

**Box Plot**

---



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Elongacion\_\_  
 Factor      Muestra

#### Expected Mean Squares

Model Term	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
A: Muestra	4	Yes	$\sigma^2$	$\sigma^2 + sA$
Error	14	No		$\sigma^2$

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

#### Analysis of Variance Table

Means Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	P-Value	Reject Equal at $\alpha = 0.05$ ?
Between (Muestra)	4	636111.8	159027.9	45.7609	0.00000	Yes
Within (Error)	14	48652.67	3475.19			
Adjusted Total	18	684764.4				
Total	19					

## One-Way Analysis of Variance Report

Dataset     Untitled  
 Response    Elongacion\_\_  
 Factor       Muestra

### Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

---

Hypotheses:   H0: All medians are equal.  
                   H1: At least two medians are different.

---

### Test Results

Method	DF	Chi <sup>2</sup> (H)	P-Value	Reject H0 at $\alpha = 0.05$ ?
Not Corrected for Ties	4	14.1197	0.00692	Yes
Corrected for Ties	4	14.1446	0.00685	Yes
Number of Sets of Ties	2			
Multiplicity Factor	12			

### Group Details

Group	Count	Ranks			Median
		Sum	Mean	Z-Value	
A	3	54.0	18.00	2.6833	426
B	4	56.0	14.00	1.6000	12.8035
C	4	38.5	9.63	-0.1500	11.05
D	4	24.0	6.00	-1.6000	10.7
E	4	17.5	4.38	-2.2500	9.95

---

### Normal Scores Tests

---

Hypotheses:   H0: All group data distributions are the same.  
                   H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

---

Test	DF	Chi <sup>2</sup> (H)	P-Value	Reject H0 at $\alpha = 0.05$ ?
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	4	13.5643	0.00882	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	4	13.7038	0.00830	Yes

---

## One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Elongacion\_\_  
 Factor      Muestra

### Descriptive Statistics

---

Group	Count (ni)	Mean	Effect	Median	Standard Deviation	Standard Error $\sqrt{(MSE/ni)}$
All	19	90.4509	111.5783			
<b>Muestra</b>						
A	3	513	401.4217	426	155.9134	34.03523
B	4	13.70425	-97.8741	12.8035	2.891406	29.47537
C	4	11.05	-100.5284	11.05	0.8582929	29.47537
D	4	10.1	-101.4783	10.7	1.416569	29.47537
E	4	10.0375	-101.5408	9.95	0.6725264	29.47537

---

### Storage Report

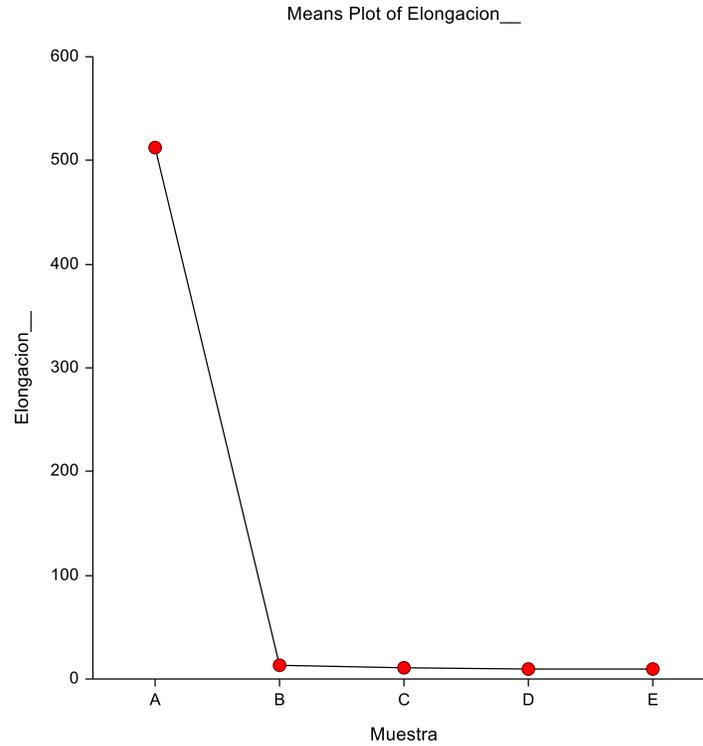
---

Stored Item	Column Number	Column Name
Means - Predicted Y	11	Elongacion__Meansx
Residuals	12	Elongacion__Residualsx

---

This report lists the columns in the dataset into which the various items were stored.

### Means Plot



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Elongacion\_\_  
 Factor      Muestra

#### Tukey-Kramer Multiple Comparison Test

Comparison Term: Muestra

Group	Count	Mean	Different From Groups
A	3	513	B, C, D, E
B	4	13.70425	A
C	4	11.05	A
D	4	10.1	A
E	4	10.0375	A

$\alpha = 0.05$ , Error Term = S(A), DF = 14, MSE = 3475.19, Critical Value = 4.4068

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

## One-Way Analysis of Variance Report

Dataset     Untitled  
Response    Esfuerzo  
Factor       Muestra

### Residual Normality Assumption Tests

---

Test Name	Test Statistic	P-Value	Reject Normality at $\alpha = 0.2?$
Shapiro-Wilk	0.8905	0.03286	Yes
Anderson-Darling	0.9629	0.01520	Yes
D'Agostino Skewness	0.9789	0.32763	No
D'Agostino Kurtosis	2.4254	0.01529	Yes
D'Agostino Omnibus (Skewness and Kurtosis)	6.8407	0.03270	Yes

---

### Equality of Group Variances Assumption Tests

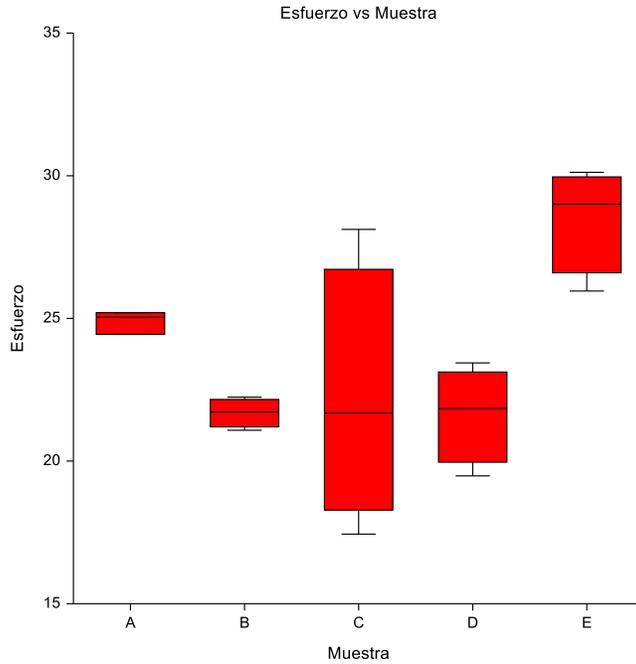
---

Test Name	Test Statistic	P-Value	Reject Equal Variances at $\alpha = 0.2?$
Brown-Forsythe (Data - Medians)	2.2650	0.11401	Yes
Levene (Data - Means)	2.4390	0.09566	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	6.3517	0.17438	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	14.4302	0.00604	Yes

---

### Box Plot

---



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Esfuerzo  
 Factor      Muestra

#### Expected Mean Squares

Model Term	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
A: Muestra	4	Yes	$\sigma^2$	$\sigma^2 + sA$
Error	14	No		$\sigma^2$

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

#### Analysis of Variance Table

Means Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	P-Value	Reject Equal at $\alpha = 0.05$ ?
Between (Muestra)	4	138.9892	34.7473	6.1634	0.00447	Yes
Within (Error)	14	78.92714	5.637653			
Adjusted Total	18	217.9163				

Total 19

---

### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset Untitled  
Response Esfuerzo  
Factor Muestra

#### Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

---

Hypotheses: H0: All medians are equal.  
H1: At least two medians are different.

---

#### Test Results

---

Method	DF	Chi <sup>2</sup> (H)	P-Value	Reject H0 at $\alpha = 0.05$ ?
Not Corrected for Ties	4	11.3921	0.02249	Yes
Corrected for Ties	4	11.3921	0.02249	Yes

Number of Sets of Ties 0  
Multiplicity Factor 0

#### Group Details

---

Group	Count	Ranks		Z-Value	Median
		Sum	Mean		
A	3	39	13.00	1.0062	25.03
B	4	25	6.25	-1.5000	21.7335
C	4	30	7.50	-1.0000	21.69
D	4	27	6.75	-1.3000	21.85
E	4	69	17.25	2.9000	29.01

---

#### Normal Scores Tests

---

Hypotheses: H0: All group data distributions are the same.  
H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

---

Test	DF	Chi <sup>2</sup> (H)	P-Value	Reject H0 at $\alpha = 0.05$ ?
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	4	10.8530	0.02827	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	4	10.9623	0.02699	Yes

## One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Esfuerzo  
 Factor      Muestra

### Descriptive Statistics

---

Group	Count (ni)	Mean	Effect	Median	Standard Deviation	Standard Error $\sqrt{(MSE/ni)}$
All	19	23.74121	23.79915			
<b>Muestra</b>						
A	3	24.9	1.10085	25.03	0.3915354	1.370846
B	4	21.69075	-2.1084	21.7335	0.4947871	1.187187
C	4	22.225	-1.57415	21.69	4.45548	1.187187
D	4	21.655	-2.14415	21.85	1.658322	1.187187
E	4	28.525	4.72585	29.01	1.833221	1.187187

---

### Storage Report

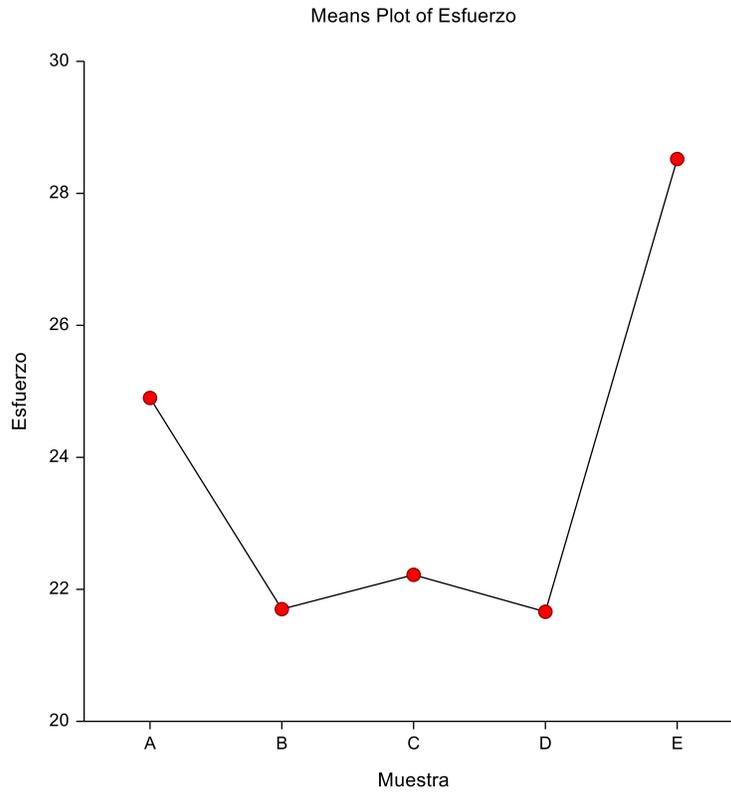
---

Stored Item	Column Number	Column Name
Means - Predicted Y	13	Esfuerzo_Meansx
Residuals	14	Esfuerzo_Residualsx

---

This report lists the columns in the dataset into which the various items were stored.

### Means Plot



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Esfuerzo  
 Factor      Muestra

#### Tukey-Kramer Multiple Comparison Test

Comparison Term: Muestra

Group	Count	Mean	Different From Groups
A	3	24.9	
B	4	21.69075	E
C	4	22.225	E
D	4	21.655	E
E	4	28.525	B, C, D

$\alpha = 0.05$ , Error Term = S(A), DF = 14, MSE = 5.637653, Critical Value = 4.4068

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

## One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
Response   Modulo  
Factor      Muestra

### Residual Normality Assumption Tests

---

Test Name	Test Statistic	P-Value	Reject Normality at $\alpha = 0.2?$
Shapiro-Wilk	0.9266	0.14976	Yes
Anderson-Darling	0.6775	0.07686	Yes
D'Agostino Skewness	-0.9312	0.35174	No
D'Agostino Kurtosis	1.3344	0.18207	Yes
D'Agostino Omnibus (Skewness and Kurtosis)	2.6479	0.26609	No

---

### Equality of Group Variances Assumption Tests

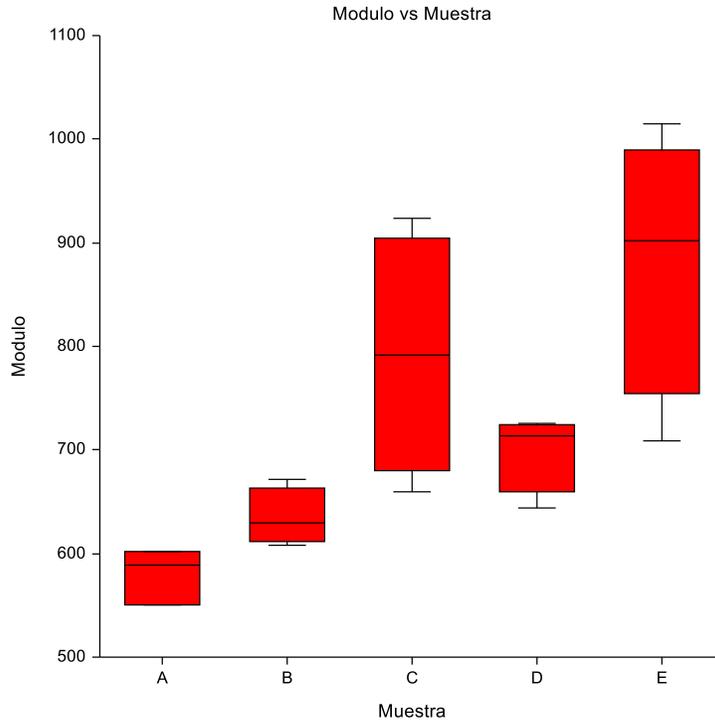
---

Test Name	Test Statistic	P-Value	Reject Equal Variances at $\alpha = 0.2?$
Brown-Forsythe (Data - Medians)	2.1798	0.12438	Yes
Levene (Data - Means)	2.7239	0.07227	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	7.9615	0.09300	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	10.0081	0.04029	Yes

---

### Box Plot

---



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Modulo  
 Factor      Muestra

#### Expected Mean Squares

Model Term	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
A: Muestra	4	Yes	$\sigma^2$	$\sigma^2 + sA$
Error	14	No		$\sigma^2$

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

#### Analysis of Variance Table

Means Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	P-Value	Reject Equal at $\alpha = 0.05$ ?
------------------	----	----------------	-------------	---------	---------	-----------------------------------



Test	DF	(H)	P-Value	at $\alpha = 0.05?$
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	4	13.8711	0.00772	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	4	13.9553	0.00744	Yes

### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
Response   Modulo  
Factor      Muestra

#### Descriptive Statistics

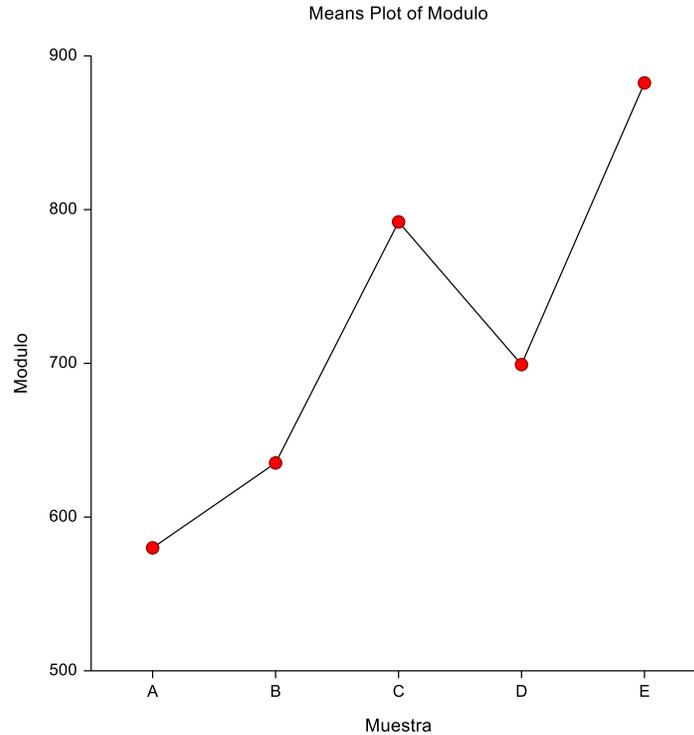
Group	Count (ni)	Mean	Effect	Median	Standard Deviation	Standard Error $\sqrt{(MSE/ni)}$
All	19	724.8879	717.657			
<b>Muestra</b>						
A	3	580.27	-137.387	588.44	26.73814	48.01939
B	4	634.8075	-82.8495	630.175	27.08077	41.58601
C	4	791.85	74.193	792.1	116.1411	41.58601
D	4	699.15	-18.507	713.45	37.6493	41.58601
E	4	882.2075	164.5505	902.515	127.145	41.58601

#### Storage Report

Stored Item	Column Number	Column Name
Means - Predicted Y	15	Modulo_Meansx
Residuals	16	Modulo_Residualsx

This report lists the columns in the dataset into which the various items were stored.

#### Means Plot



### One-Way Analysis of Variance Report

Dataset    Untitled  
 Response   Modulo  
 Factor      Muestra

#### Tukey-Kramer Multiple Comparison Test

---

Comparison Term: Muestra

---

Group	Count	Mean	Different From Groups
A	3	580.27	C, E
B	4	634.8075	E
C	4	791.85	A
D	4	699.15	
E	4	882.2075	A, B

---

$\alpha = 0.05$ , Error Term = S(A), DF = 14, MSE = 6917.586, Critical Value = 4.4068

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

## Análisis Estadístico de Colorimetría de los Biocompuestos

Nueva tabla: 09/11/2023 - 01:04:57 p. m. - [Versión: 30/04/2020]

### Análisis de la varianza

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
L*	20	0.98	0.98	4.42

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4208.60	4	1052.15	193.53	<0.0001
tratamiento	4208.60	4	1052.15	193.53	<0.0001
Error	81.55	15	5.44		
Total	4290.15	19			

### Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.09118

Error: 5.4367 gl: 15

tratamiento Medias n E.E.

C7.5	44.09	4	1.17	A
CNaQ	44.38	4	1.17	A
CNaA	46.10	4	1.17	A
CNa	47.65	4	1.17	A
PEAD	81.68	4	1.17	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Nueva tabla: 09/11/2023 - 01:06:59 p. m. - [Versión: 30/04/2020]

### Análisis de la varianza

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
a*	20	0.99	0.99	5.06

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	509.13	4	127.28	675.54	<0.0001
tratamiento	509.13	4	127.28	675.54	<0.0001
Error	2.83	15	0.19		
Total	511.96	19			

### Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.94779

Error: 0.1884 gl: 15

tratamiento Medias n E.E.

PEAD	-1.21	4	0.22	A
CNaQ	9.25	4	0.22	B
CNa	10.29	4	0.22	C
CNaA	11.93	4	0.22	D
C7.5	12.68	4	0.22	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

## Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
b*	20	0.97	0.97	7.74

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	952.80	4	238.20	146.02	<0.0001
tratamiento	952.80	4	238.20	146.02	<0.0001
Error	24.47	15	1.63		
Total	977.27	19			

**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.78876**

Error: 1.6312 gl: 15

tratamiento	Medias	n	E.E.	
PEAD	3.83	4	0.64	A
CNaQ	14.51	4	0.64	B
CNa	20.45	4	0.64	C
CNaA	21.57	4	0.64	C
C7.5	22.20	4	0.64	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

## Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Hue	20	0.99	0.99	2.56

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6462.34	4	1615.58	453.07	<0.0001
tratamiento	6462.34	4	1615.58	453.07	<0.0001
Error	53.49	15	3.57		
Total	6515.83	19			

**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.12321**

Error: 3.5659 gl: 15

tratamiento Medias n E.E.

C7.5	60.11	4	0.94	A
CNaA	61.24	4	0.94	A
CNa	63.18	4	0.94	A
CNaQ	77.24	4	0.94	B
PEAD	107.65	4	0.94	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )