



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE  
LA HOJA DE PLÁTANO MEDIANTE  
TRATAMIENTOS TÉRMICO-POLIMÉRICOS”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
LICENCIADA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA  
YARELY BARRETO PAZ

DIRECTOR DE TESIS  
M.C MIGUEL ALVARADO FLORES

CODIRECTOR DE TESIS  
DR. MARCO ANTONIO MORALES SÁNCHEZ

PUEBLA, PUE. NOVIEMBRE 2024

# Índice

Planteamiento del Problema	1
Justificación	2
Hipótesis	3
Objetivo General	3
Objetivos particulares	3
Capítulo 1.	
Antecedentes	4
1.1 Introducción	4
1.2 La hoja de plátano	5
1.2.1 Especies con aplicaciones similares a la musa paradisiaca	5
1.2.2 Usos y aplicaciones de la hoja de plátano	5
1.2.3 Composición química de la hoja de plátano	6
1.2.4 Ubicación geográfica de la hoja de plátano	9
1.3 Los almidones	10
1.3.1 Composición química de los almidones	10
1.3.2 Aplicaciones de los almidones	12
1.4 Tratamientos térmicos	14
1.5 La Industria Textil	15
1.5.1 Impacto ambiental de la industria textil	16
1.6 Telas no tejidas	17
1.7 Diseño de Experimentos	18
1.8 Técnicas de caracterización de materiales	19
1.8.1 Microscopía electrónica de barrido	19
1.8.2 Análisis Infrarrojo de Transformada de Fourier	20
1.8.3 Máquina Universal	20
1.8.3.1 Diagramas de Tensión deformación y Modulo de Young	21
Capítulo 2.	
Metodología	23
2.1 Etapa 1. Identificación de las Especies de platanares	24
2.2 Etapa 2. Selección de almidones	24
2.2.1 Obtención de almidón de yuca, papa y camote	25
2.3 Etapa 3. Diseño de formulaciones poliméricas	26
2.4 Etapa 4. Tratamiento térmico y polimérico de la hoja de plátano	27
2.5 Etapa 5. Evaluación del efecto del tratamiento polimérico a base de almidón mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA)	29

2.6 Etapa 6. Caracterización de la resistencia mecánica de las hojas de plátano con menor agrietamiento	32
2.7 Etapa 7. Variación de temperaturas del tratamiento térmico y su efecto en la resistencia mecánica	35
2.8 Etapa 8. Identificación de variaciones superficiales en la estructura de las hojas tratadas	36
2.9 Etapa 9. Caracterización de la resistencia mecánica de las hojas tratadas con recubrimiento polimérico y tratamiento térmico	37
Capítulo 3:	
Resultados	39
3.1 Identificación de las especies de platanares	39
3.2 Selección de almidones y diseño de formulaciones poliméricas	39
3.3 Tratamiento térmico y polimérico de la hoja de plátano	41
3.4 Evaluación del efecto del tratamiento polimérico a base de almidón mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA)	42
3.5 Caracterización de la Resistencia mecánica de la hoja de plátano y platanillo por máquina universal	49
3.6 FTIR almidón de maíz y yuca	51
3.7 Variación de temperaturas del tratamiento térmico y su efecto en la resistencia mecánica evaluados por máquina universal	53
3.8 Identificación de variaciones superficiales en la hoja mediante SEM	55
3.9 Caracterización de la hoja de plátano por aparato Stress-Strain	58
3.10 Obtención de la propuesta de tela no tejida hecha de hoja de plátano por tratamiento térmico-polimérico	67
Conclusiones	68
Referencia Bibliográficas	70

# Índice de Tablas y Figuras

Figura 1.1. Estructura química de un almidón (Asharuddin et al., 2018)	11
Figura 2.1. Estructura química del glicerol (Merck KGaA, 2024)	14
Figura 3.1 Metodología experimental de selección de materias primas y procedimiento de curado para la obtención de tela no tejida.	23
Figura 4.1 Hoja de plátano (musa paradisiaca)	24
Figura 4.2 Hoja de platanillo o bijao (Calathea lutea)	24
Figura 5.1 Proceso de obtención de almidones	26
Figura 6.1 Proceso de aplicación de tratamiento térmico y polimérico a la hoja de plátano.	28
Figura 7.1 Modelo general de procesos	29
Figura 8.1 Máquina Universal	34
Figura 9.1 Probetas para pruebas mecánicas.	34
Figura 10.1 Plancha de nano titanio para el asado de las hojas.	36
Figura 11.1 Microscopio electrónico de barrido	37
Figura 12. 1 Stress-Strain Aparatus®	38
Figura 13.1 Almidones en polvo	40
Figura 13.2 Apariencia física de los polímeros a base de almidón	40
Figura 14.1. Tratamientos Térmico-Poliméricos Etapa 4.	41
Figura 15.1 Cuantificación de grietas sobre la superficie de la hoja de plátano	42
Figura 16.1 Diagrama de cajas y bigotes	46
Figura 17.1 Prueba de Normalidad	47
Figura. 17.2 Prueba de Independencia	47
Figura. 17.3 Prueba de Varianza	48
Figura 18.0 Diagrama de cajas y bigotes de Resistencia a la tracción por máquina Universal	51
Figura 18.1 FTIR almidones de maíz y yuca (tapioca)	53
Figura 19.1 Cambio de color de la musa paradisiaca debido a la aplicación de tratamientos térmicos directos (asado)	55
Figura 20.1 SEM Hoja de plátano (musa paradisiaca)	57
Figura 20.2 SEM Hoja de platanillo (Calathea Lutea)	57
Figura 21.1 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 118°C y obtención de Modulo de Young	59
Figura 21.2 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 160°C y obtención de Modulo de Young	60
Figura. 21.3 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 245°C y obtención de Modulo de Young	61
Figura 22.1 Comportamiento de la Temperatura respecto a la tensión máxima y el módulo de elasticidad.	62

Figura 23.1 Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico-polimérico (directo y por PL4) y cálculo del Módulo de Young	64
Figura. 24.1 Diagrama de cajas y bigotes para el Stress máximo (Pa)	66
Figura. 24.2 Diagrama de cajas y bigotes para el Stress máximo (Pa)	66
Figura 25.1 Hoja de plátano con tratamiento térmico-polimérico como propuesta de tela no tejida para embalaje.	67
Tabla 1.1. Composición porcentual de amilosa y amilopectina de diferentes almidones.	12
Tabla 2.0. Tabla del ANOVA para el DCA.	31
Tabla 2.1 Resultados de Identificación y selección de especies a estudiar.	39
Tabla 3.1 Resultados del número de grietas presentes en la superficie de la hoja de plátano debidas a pruebas de elongación	42
Tabla. 4.1 Valores de posición para yij de las muestras.	43
Tabla. 4.2 Aleatorización en la cuantificación de grietas.	43
Tabla 5.1. ANOVA	44
Tabla 6.1 Método LSD	45
Tabla 7.1 Medias muestrales de los tratamientos.	46
Tabla 7.2. Residuales	46
Tabla 8.1 Pruebas de Resistencia mecánica debidas a la tracción por Máquina Universal.	50
Tabla 9.1 Variación de Temperaturas para tratamiento térmico por transferencia de calor directa (asado)	54
Tabla 10.1 Resultados de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo y Modulo de Young	62
Tabla 11.1 Resultados de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico-polimérico (directo y por PL2) y Módulo de Young	64



---

---

## Planteamiento del Problema

La industria textil responsable de obtener fibras naturales y sintéticas para su conversión a telas tejidas y no tejidas ocupa el segundo lugar como la industria más contaminante del mundo desde la extracción y procesamiento de la materia, además de generar aproximadamente de 120 millones de toneladas de (*Paredes Flores, 2023*) gases de efecto invernadero, contaminantes atmosféricos y de cuerpos hídricos (*ONG Manos Unidas,2020*). Utilizar sustitutos de bajo impacto ambiental para la fabricación de estos productos textiles permite reducir el impacto de los contaminantes.

La producción de plátano, una de las frutas más cultivadas y consumidas en el mundo, genera una cantidad significativa de residuos que presentan diversos problemas ambientales, económicos y sociales. Los principales residuos incluyen hojas, tallos, cáscaras y frutos no comercializables, los cuales, si no se gestionan adecuadamente, pueden tener impactos negativos considerables. La descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos de plátano produce metano (CH<sub>4</sub>), un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. El manejo inadecuado de estos residuos agrava la emisión de gases nocivos, aumentando la huella de carbono de la producción de plátano. Además, se destaca que en las etapas de cosecha y pos-cosecha se producen diversos residuos de tipo foliar, pseudotallo, cáscara y raquis con alrededor de 1.6 toneladas por hectárea de producción, por lo que las hojas representan el 20-25% de dicha cantidad (*Ibarra Vallejo et al., 2022*)

Las hojas de plátano son un residuo de la producción de banano, se pueden tratar para mejorar su resistencia mecánica mediante tratamientos específicos con almidón (*Martínez et al.,2022*) que permitan su uso en la sustitución de materiales sintéticos al mismo tiempo que se le da utilidad a este tipo de desechos orgánicos.

---

---

## Justificación

La hoja de plátano, ampliamente utilizada en diversas industrias y culturas, es un recurso natural que presenta limitaciones en su resistencia mecánica, afectando su durabilidad y efectividad en múltiples aplicaciones. Este trabajo se justifica por la necesidad de aumentar la resistencia mecánica de la hoja de plátano, abordando problemas económicos, sociales y ambientales.

Desde una perspectiva ambiental, contribuirá a la reducción de residuos plásticos, ya que hojas de plátano más resistentes pueden reemplazar a los plásticos y otros materiales en diversas aplicaciones. Esto no solo disminuye la contaminación, sino que también apoya la economía circular, promoviendo la reutilización y reciclaje de materiales naturales.

Por ejemplo, en la industria del embalaje, las hojas de plátano ofrecen una alternativa biodegradable a los plásticos, pero su baja resistencia limita su uso. Fortalecerlas permitiría su uso en diversas aplicaciones que promuevan prácticas sostenibles y reduzcan la dependencia de materiales no biodegradables.

Económicamente, este trabajo puede beneficiar a los agricultores al agregar valor a sus cultivos de plátano, aumentando sus ingresos. La diversificación de usos de las hojas de plátano mejoradas abre nuevos mercados y oportunidades, fortaleciendo la economía local y fomentando la innovación en productos y procesos.

Es por ello que se busca realizar un estudio de la resistencia mecánica de la hoja de plátano mediante el uso de tratamientos térmicos y poliméricos; específicamente bio poliméricos, con la finalidad de obtener una propuesta de posible material amigable con el ambiente para conseguir una tela no tejida; la cual minimiza los contaminantes que típicamente se obtienen de procesos de la industria química textil además que se tratará de propiciar el aprovechamiento de las hojas de plátano no valoradas en la producción de plátano en etapas de cosecha, pues, una vez que los racimos de plátano alcanzan su madurez, se corta el pseudotallo que sostiene el fruto y las hojas del plátano que contiene alrededor de 36 a 42 hojas resultan desechos orgánicos (*Arcilla et al., 1999*)

---

---

## **Hipótesis**

Se mejora la resistencia mecánica de la hoja de plátano al ser sometida a tratamientos térmicos y poliméricos a base de almidón.

### **Objetivo General**

Estudiar la resistencia mecánica de la hoja de plátano al aplicar tratamientos térmicos y poliméricos a base de almidón.

### **Objetivos particulares**

- I. Identificar el tipo de platanares disponibles para extracción de hojas
- II. Determinar los tipos de almidones que se utilizarán para la polimerización
- III. Formular el recubrimiento polimérico a base de almidón
- IV. Aplicar el tratamiento térmico y polimérico a la hoja de plátano
- V. Evaluar las formulaciones de recubrimiento polimérico considerando el agrietamiento superficial de la hoja
- VI. Caracterizar y comparar la resistencia mecánica y formulación polimérica aplicada a la hoja de plátano con menor agrietamiento
- VII. Examinar el efecto de los tratamientos térmicos hervido y asado en la resistencia mecánica de la hoja
- VIII. Caracterizar mediante técnicas microscópicas los tratamientos térmicos y poliméricos aplicados a las hojas
- IX. Determinar los cambios en la resistencia mecánica por los tratamientos térmicos y poliméricos

---

# Capítulo 1.

## Antecedentes

### 1.1 Introducción

Este capítulo presenta los antecedentes que abordan y describen a la hoja de plátano desde diversos puntos de vista, así mismo cómo la industria textil tiene un impacto negativo en el ambiente, especialmente en la producción de telas no tejidas; permitiendo a este trabajo de tesis aportar un estudio extenso mediante técnicas experimentales, estadísticas y mediante el uso de equipos específicos abordando sobre la resistencia mecánica de la hoja de plátano y por consiguiente plantear una posible propuesta de material encaminado a la aplicación en embalaje como una tela no tejida de origen natural mediante el uso de tratamientos de tipo térmico-poliméricos.

---

---

## 1.2 La hoja de plátano

La hoja de plátano proviene de la planta de plátano, perteneciente a las musáceas y al género *musa*. Posee raíces, hojas, pseudotallo, yemas y racimo (*Arcilla et al., 1999*). Las raíces de esta permiten darle soporte y son el medio de nutrición de toda la planta; la zona que sostiene a las hojas y racimo es el pseudotallo. El racimo es conformado por frutos que desde su floración a cosecha comprende periodos de 3.5 y 4.5 meses.

Su nombre científico de la planta es *musa paradisiaca*; tiene hojas grandes, dispuestas en forma de espiral con dimensiones aproximadamente de entre 2-4 metros de largo y hasta 0.5 metros de ancho. Son responsables de la absorción de luz solar para la producción de su alimento.

Cada planta puede tener alrededor de 36 a 42 hojas con periodos de vida de 115 días y salida de entre 9 a 10 días. Dentro de sus características destacan que son hojas lisas y tienden a romperse espontáneamente a lo largo de sus nervaduras dando aspecto desalineado (*Montaño, 2020*).

### 1.2.1 Especies con aplicaciones similares a la *musa paradisiaca*

Pueden existir hojas similares a la de plátano como lo es la hoja de platanillo o bijao (*Calathea lutea*), perteneciente a las marantáceas. Es una planta que alcanza tamaños de 1.6 a 4 m de alto; sus hojas son de 30 a 150 cm de largo y de 20 a 60cm de ancho, son color verde en la superficie superior y blanquecina por la inferior, son de tipo elípticas y se cosecha su fruto (banana silvestre) de 35 a 45 días (*Montaño, 2020*).

### 1.2.2 Usos y aplicaciones de la hoja de plátano

La hoja de plátano al igual que la de platanillo tienen aplicación en la industria gastronómica de diferentes lugares del mundo especialmente en México, Ecuador, Colombia, India, Vietnam y Venezuela, pues la hoja tiene la función de ser parte del

---

---

envoltorio del alimento durante y después de su cocción o bien ingrediente de este; un claro ejemplo es el tamal que permite la conservación de alimentos para evitar su putrefacción otorgando una capa protectora que impide el paso de microorganismos puesto que posee polifenoles que actúan como antioxidantes en la cocción o contacto.

Gracias a sus propiedades tiene aplicaciones en la medicina tradicional respecto a problemas intestinales, cutáneos y de vías respiratorias que al entrar en contacto directo con la persona reduce los efectos de radicales libres responsables del envejecimiento de la piel (*Morales et al., 2024*)

Por otro lado, las hojas frescas y secas son empleadas para alimentar ganado y en ocasiones para fabricar artesanías tejidas aplicadas en bolsos, sombreros, cinturones y adornos; también son utilizadas en la construcción de techados de chozas. Un registro encontrado de su aplicación es en la región de Akil Yucatán donde alrededor de 9750 personas se dedican a trabajar las hojas, especialmente en la gastronomía, ganadería y artesanías (*SIAP, 2019*)

### **1.2.3 Composición química de la hoja de plátano**

Químicamente las hojas de plátano y platanillo son proteínas foliares compuestas por clorofila, celulosa en mayor porcentaje, hemicelulosa, gomas, lignina y pectina. Su composición es de alrededor 82% de celulosa, 6-19% de hemicelulosa, 2% de goma residual, 5-10% de lignina y 3-5% pectina. Además, se ha encontrado que contienen compuestos como polifenoles y bioactivos de tipo taninos (*Saxena & Chawla, 2021*)

Las proteínas foliares presentes en las hojas de plátano son polímeros basados en aminoácidos con estructuras complejas; sus principales funciones son las estructurales, metabólicas y de almacenamiento porque son indispensables para la regulación del crecimiento y procesos de fotosíntesis (*Harvard University, 2018*)

La clorofila es la responsable de llevar a cabo el proceso de fotosíntesis en las plantas, pues, se trata de un pigmento de color verde encargado de absorber la luz, dicha sustancia está presente en las hojas de las plantas. La absorción abarca la luz azul y roja

---

---

de la radiación solar a 430 nm y 660 nm para reflejar el espectro verde; convierte la energía solar en energía química responsable de la construcción de moléculas de carbohidratos que son fundamentales en la alimentación y obtención de energía de la planta (*Pareek et al., 2017*)

La celulosa es el componente de la pared celular de las plantas; en las hojas proporciona rigidez y resistencia a células vegetales, así también conforma los tejidos de esta. Se trata de una macromolécula natural abundante en la tierra, específicamente es un polisacárido constituido por unidades de D-glucosa con estructura en forma de cadenas lineales que agrupadas generan las microfibras; esta sustancia es insoluble en agua y resistente a la tracción. Su función es proporcionar propiedades mecánicas de resistencia y elasticidad a la hoja, permitiendo su crecimiento y forma. Protege a las células de daños físicos, también de la entrada de diversos patógenos y junto con la interacción con otras sustancias como la pectina y hemicelulosa forma las matrices de tejidos. (*Lonut-Flavius & Butnariu, 2022*)

La hemicelulosa está presente en las paredes de las hojas, se trata de un polisacárido cuya composición implica diversos tipos de azúcares como lo son la D-xilosa, D-manosa, D-glucosa, L-arabinosa, etc. Dicho polímero es de tipo amorfo ramificado con cadenas cortas comparado con la celulosa. Los monosacáridos que la conforman son azúcares de hexosa comprendiendo a la glucosa, manosa y galactosa, también los de pentosa como arabinosa y xilosa.

Su principal función es que las cadenas de celulosa no se encuentren dañadas, manteniendo la estructura de enlaces entre fibras y proporcionando resistencia a la tracción; además permite la rigidez y forma de células vegetales, flexibilidad estructural y retención de agua en las paredes celulares para que las hojas tengan hidratación (*Cristina Da Silva et al., 2013*)

Las gomas residuales son aquellas que están presentes en las hojas de las plantas, se trata de polímeros naturales que al entrar en contacto con el agua se hinchan gracias a la absorción de agua permite la hidratación de esta (*Ngwuluka et al., 2012*). Estos

---

---

polisacáridos complejos son esenciales para defensa y protección al sufrir una fractura o daño por algún patógeno; y son reservorios de azúcares.

La lignina es la que compone la pared celular del tejido vascular de las plantas, se trata de un hetero polímero que brinda rigidez en la estructura, resistencia a la tensión y presión hídrica. De igual forma le da estabilidad estructural, impermeabilidad, defensa ante patógenos y resistencia a descomposición. Este es un polímero fenólico con composición diversa de monómeros resultantes de actividad enzimática en la polimerización de la pared celular. Los tres polímeros que la componen son fenilpropanoides como el alcohol p-cumarílico, coniferílico y sinapílico (*Maceda et al., 2021*).

La pectina es un polisacárido presente en las paredes celulares de las hojas de las plantas y en los tejidos, es fundamental para darle la estructura característica. Estructuralmente es compleja su estructura ya que se compone de ácido D-galacturónico esterificado residente en una cadena alfa. Los ácidos presentes están esterificados con grupos metoxi. Su función es la de adhesión celular, la flexibilidad, retención de agua, defensa de patógenos y es la responsable de la maduración y caída de las hojas. Además, esta sustancia es un agente gelificante (*CyberCOLLOIDS LTD, 2022*).

Los polifenoles son compuestos bioactivos que poseen propiedades antioxidantes, estos están presentes en las hojas de las plantas. Las moléculas son sintetizadas por plantas debido a su metabolismo secundario; su estructura se caracteriza por la presencia de anillos fenólicos y son indispensables para las funciones biológicas de la planta, pues ayudan a la defensa ante situaciones de estrés y luminosas previniendo daños por radicales libres; en las hojas impiden el crecimiento bacteriano, hongos y virus, así como ataques de herbívoros. Además, juegan el rol de senescencia, lo cual determina el envejecimiento de la hoja. (*Quiñones et al., 2012*). De estos se derivan los taninos que son polifenoles hidrosolubles, que permiten el curtido de cuero. En las hojas de plátano desempeñan funciones como defensa ante herbívoros por sus sabores astringentes,

---

---

también la protección de patógenos, reducción de oxidación y rol en senescencia (Isaza,2007).

Gracias a su composición de la planta de plátano, la resistencia a la tracción hace que sea apropiada para la fabricación de productos de alta resistencia (Saxena & Chawla, 2021). Dichas hojas son impermeables, no tóxicas, resistentes a corrosión y biodegradables con nervaduras. Son susceptibles a ser tratadas para mejorar sus propiedades mecánicas mediante el uso de tratamientos específicos basados en intervenciones morfológicas mediante calor y biopolímeros basados en almidón (Duque et al., 2019), favoreciendo el aprovechamiento de este recurso.

#### **1.2.4 Ubicación geográfica de la hoja de plátano**

Geográficamente la hoja de plátano se puede encontrar en México en mayor proporción en estados transcendentales productores de plátano como lo son Chiapas, Tabasco, Veracruz, Colima y Jalisco con notable aparición en la región sur del país abarcando también a Yucatán, Quintana Roo, Oaxaca y Guerrero. Las condiciones climáticas cálidas que poseen esos lugares de alrededor de 26-27°C en promedio, lluvias, llanuras húmedas cercanas al mar y suelos planos con pH entre 4.5-8 permiten el crecimiento de la planta de plátano.

La producción de plátano es de suma importancia para dichas regiones siendo la principal fruta que se origina en el país; según los datos se obtienen alrededor de dos millones 469,000.00 toneladas anuales de plátano. El mayor cultivo de esta planta responsable de generar dicho fruto se centra con alrededor del sesenta por ciento de producción en Chiapas, Tabasco y Veracruz siempre presente en todo el año (SADER, 2021). La hoja de plátano se encuentra en proporciones de 0.3 a 0.4 toneladas por cada hectárea de plátano cultivado (Ibarra Vallejo et al., 2022). Anualmente se estima que se cultivan en México 80 520 hectáreas de platanares (NBH et al., 2020).

Por otra parte, la planta de platanillo (*Calathea lutea*) crece en el trópico americano extendiéndose por México, países de Centro América, El Caribe y América del Sur. En

---

---

México se ubica en regiones de Veracruz, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca y Guerrero. Todas estas zonas poseen climas tropicales favorables para la planta donde se encuentra en selvas lluviosas, sabanas y zonas montañosas con suelos húmedos, aireados y ligeramente ácidos (*Lascurain, 1995*).

### **1.3 Los almidones**

Los almidones son polisacáridos que se encuentran en las células vegetales en forma granular cuya función es el almacenamiento de energía ya que poseen polímeros con unidades de glucosa, es decir, la amilosa y amilopectina (*Martínez, 2018*). Se trata de un carbohidrato abundante, reservorio en plantas, hojas, flores, frutas, semillas, tallos y raíces. Se forma en los cloroplastos de hojas y en amiloplastos, responsables de la síntesis de reserva en cereales y tubérculos. Las mayores fuentes de almidón son los cereales con almacenes de 40-90%, raíces con 30-70%, tubérculos con 65-85%, leguminosas con 25-50% y algunas frutas inmaduras como mangos y bananas con 70% de almidón por peso seco (*Alcázar& Meireles, 2015*). De acuerdo con la fuente de donde se extrae este tendrá una estructura y composición única específica; además que determinará las propiedades y comportamiento de este al ser utilizado como aditivo, especialmente en sus propiedades como textura, uniformidad, estabilidad, gelificación y sabor (*Egharevba,2019*).

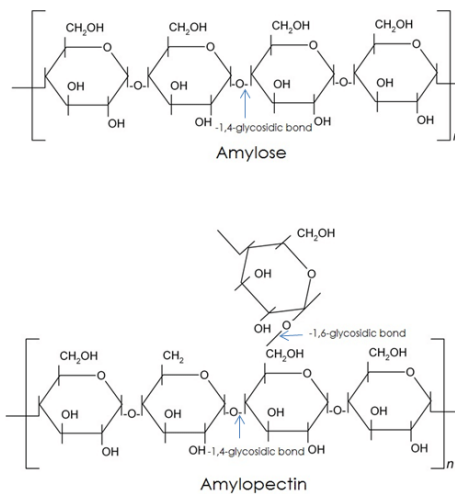
#### **1.3.1 Composición química de los almidones**

El comportamiento químico del almidón (homopolisacárido) depende de la naturaleza de sus componentes. La estructura del almidón, el cual es parcialmente soluble en agua es compuesta por dos polisacáridos que son la amilosa y amilopectina (*Hernández et al., 2008*). La amilosa y amilopectina contribuyen en peso seco del 98-99% del almidón. Generalmente la amilosa está presente en un 20% y la amilopectina en 80% (*Egharevba,2019*).

La amilosa (ver Figura 1.1) es una cadena polimérica lineal con alrededor de 500-2000 unidades de glucosa formada por  $\alpha$ -D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4. Además es la responsable de la formación de excelentes películas fuertes, incoloras, inodoras e insípidas; así mismo se involucra en propiedades texturales; debido a su baja solubilidad crea geles menos viscosos y más firmes. Esta puede formar complejos con moléculas pequeñas como yodo, alcoholes, compuestos aromáticos y ésteres (*Dutta & Paul, 2020*).

La amilopectina mostrada en la Figura 1.1 es una cadena ramificada con 1000000 unidades de glucosa formada por  $\alpha$ -D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6. Es una molécula larga y de peso molecular alto; es más soluble que la amilosa y permite la formación de geles viscosos, proporcionando estructuras suaves y cohesivas (*Miranda et al., 2008; Alcázar & Meireles, 2015*).

Figura 1.1. Estructura química de un almidón (Asharuddin et al., 2018)



Algunas de las fuentes más comunes de extracción de almidones son el maíz, la yuca o tapioca, papa y camote. De acuerdo con Mani & Bhattacharya (1998); Nimitkeatkai et al. (2022); Senanayake et al. (2013) y Jane et al. (1992) se presentan las composiciones correspondientes de amilosa y amilopectina en la Tabla 1.1. Composición porcentual de amilosa y amilopectina de diferentes almidones.

Tabla 1.1. Composición porcentual de amilosa y amilopectina de diferentes almidones.

Tipo de almidón	%Amilopectina	%Amilosa	Referencia
Almidón de maíz ceroso	100	0	(Mani & Bhattacharya, 1998)
Almidón industrial de maíz	70	30	
Almidón de maíz común	50	50	
Almidón de maíz con alta amilosa	30	70	
Almidón de Yuca	80-75	20-25	(Nimitkeatkai et al.,2022)
Almidón de Camote	85-80	15-20	(Senanayake et al., 2013)
Almidón de Papa	80	20	(Jane et al, 1992)

### 1.3.2 Aplicaciones de los almidones

Gracias a su composición son utilizados en la industria del papel y cartón como parte de la composición de adhesivos; conforman textiles y revestimientos para dar soporte, así como forman parte de formulaciones alimentarias como agentes espesantes, saborizantes, jarabes, texturizadores y humectantes (*Martínez, 2018*)

Las biopelículas y biopolímeros basados en almidones junto con el uso de glicerina como plastificante imparten textura, flexibilidad y favorecen al deslizamiento en las películas. Es decir, se recurre al uso de los llamados almidones termoplásticos (TPS), los cuales han sido modificados por adición de plastificantes como agua, glicerina y/o sorbitol bajo ciertas condiciones térmicas y de presión para generar un almidón termoplástico amorfo, biodegradable, flexible y aplicable a procesos que involucran la formación de recubrimientos alimentarios, textiles o de embalaje; sin embargo, estos pueden presentar algunas problemáticas respecto a su solubilidad, higroscopicidad, envejecimiento rápido

---

---

y pobres propiedades mecánicas. Todo lo anterior se soluciona y disminuye al incorporar fibras celulósicas naturales que sirven como refuerzo aportando mejoras (*Luna et al.,2009*)

En un estudio reciente se ha encontrado la cinética de polimerización (*Martínez et al.,2022*).

La utilización del almidón en películas biodegradables con composición única del mismo crea materiales quebradizos, con propiedades mecánicas pobres y muy sensibles al agua, pero, al generar su combinación con otros materiales poliméricos produce materiales resistentes al agua y rompimiento, además de ser flexibles. Usar sustancias como la glicerina funciona como plastificante, ya que las interacciones moleculares entre la glicerina y almidón son físicas; al mezclarse, los materiales son más flexibles porque es una sustancia de bajo peso molecular donde las distancias moleculares aumentan favoreciendo deslizamiento. (*Bohórquez, 2020*).

La ruptura de la estructura semi cristalina del almidón mediante plastificantes favorecen a las propiedades del termoplástico aportando flexibilidad ya que hay una reducción de la interacción de enlaces de hidrógeno y ocurre un aumento del espaciado molecular. La destrucción tiene lugar en el proceso de plastificación donde la morfología granular se modifica obteniendo una pasta flexible, es decir, el termoplástico. Por otro lado, la estabilidad estructural puede ser variable debido a que los enlaces de hidrógeno dentro y entre moléculas de almidón son estables entre sí que entre puentes de hidrógeno con el agua y el plastificante lo que propicia a la formación de estructuras ordenadas de cadenas de amilosa y amilopectina. (*Montero, 2018*)

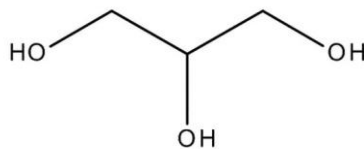
El efecto que tiene la glicerina en las películas reduce su fragilidad, de acuerdo con la proporción en peso tomando como base al almidón con porcentajes de entre 45-50%, pues a mayor porcentaje de glicerina utilizada en la formación del polímero, el espesor de la película aumenta, así como la humedad y solubilidad en agua; reduciendo la densidad y absorción de agua. Por otra parte, se observa un incremento en la flexibilidad del material, estabilidad térmica y homogeneidad superficial (*Tarique et al., 2021*). Es por ello por lo que: el plastificante más utilizado para la formación del almidón termoplástico

---

---

es el glicerol (glicerina), líquido viscoso subproducto de grasas durante la fabricación de jabones. Es amigable con el ambiente, tiene un punto de ebullición a 290°C y forma enlaces tipo puente de hidrógeno con los almidones. Posee tres átomos de carbono con un enlace a un grupo OH, es una molécula polar y absorbe el agua (Montero, 2018) como se muestra en la Figura 2.1

Figura 2.1. Estructura química del glicerol (Merck KGaA, 2024)



Se destaca que en los textiles se recurre al uso de almidones de maíz y tapioca, polvos blancos que tienen características como baja temperatura de gelatinización, baja viscosidad y buena formación de películas. Estos son utilizados como agentes de apresto textil para aportar estructura mecánica, mejorar apariencia, tacto y prolongación de vida de textiles; todo lo anterior mediante la aplicación de soluciones sobre el tejido por inmersión o recubrimiento (JINAN SPARK IMP, 2023)

## 1.4 Tratamientos térmicos

Un tratamiento térmico involucra procesos de calentamiento y/o enfriamiento, su finalidad es generar cambios estructurales en un material. Todos estos cambios repercuten en sus propiedades mecánicas con la finalidad de que estas beneficien a la aplicación y conformación final del material. Las modificaciones no cambian la estructura química, si no que únicamente repercuten en arreglos estructurales y de granulometría, es decir propiedades mecánicas. Estos tratamientos se pueden aplicar sobre toda la superficie del material o en una porción específica; muchos de ellos encaminados para la mejora de su resistencia y dureza (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008).

En la producción de textiles, los tratamientos térmicos son utilizados al ser aplicados a arreglos fibrosos mediante calentamientos locales de unión térmica; donde las fibras son

---

---

calentadas y consecuentemente se adhieren entre si debido a la formación de enlaces en la red, pues estas se suavizan y al enfriarse se solidifican generando una estructura cohesiva de las llamadas telas no tejidas. La unión térmica presenta ventajas, pues se aumenta la resistencia a la tracción (*Hassan & Saad, 2024*).

## 1.5 La Industria Textil

La industria textil abarca la confección de ropa, calzado y accesorios elaborados con hilo independientemente su composición y destino, así como los que ocupan otros materiales como tejidos sin tejer, caucho, cuero y sintéticos (*ONG Manos Unidas, 2020*).

Los productos textiles se pueden dividir en filiformes: hilos, cuerdas y fibras que son materia prima para el segundo grupo denominado laminiformes, los cuales involucran a telas; a su vez este último grupo se divide en no tejidos formados por fibras conglomeradas; en tejidos planos o de lanzadera, tejidos de punto, tejidos de estructura (encaje, red, tul, crochet, puntillas, etc.) y tejidos de alfombra a mano (*Baltanás et al., s.f*). Los hilos se componen por dos a tres fibras llamadas cabos, las cuales se tuercen para formar la cuerda resistente. Estos pueden ser monofilamentos, fibras peinadas y cardadas, hilados por fibras fuertemente torcidas, cordones e hilos gruesos.

En general todos los textiles tienen aplicaciones específicas, ya sea en la moda y vestimenta como lo es en ropa de diario, alta costura, ropa deportiva e interior; así como en ropa de cama, cortinas y persianas, tapicería, toallas y alfombras. En textiles técnicos para uso industrial, médico e inteligentes de uso tecnológico; también en cojines, fundas, papeles decorativos, embalajes, textiles automotrices, ropa de seguridad, calzado y accesorios.

Los textiles pueden ser elaborados de materiales flexibles que en relación con fibras se dividen en:

-Naturales: algodón, lana, lino, seda, yute.

-Sintéticos: Delcra, poliéster, nylon, acetato, rayón, poliamida y licra.

---

---

Por otra parte, también se encuentra el cuero y las pieles procedentes de animales que se someten a procesos de curtido. Estos materiales pueden tener cierta rigidez o suavidad según sus tratamientos. Los viniles son materiales sintéticos usados en confección de calzado y automotriz; en su mayoría fueron diseñados para sustituir la piel. Estos pueden ser de base de PVC, neopreno y coagulados (vulcanizados con soporte de tela para mayor resistencia). También se encuentran los soportes que son materiales que estructuran productos textiles. Estos son los espumados de poliuretanos, polietilenos en laminas, cartones, delcrón o fibra acrílica, pellones y entretelas (*Mejorada et al., 2006*).

### **1.5.1 Impacto ambiental de la industria textil**

Este tipo de industria es la segunda más contaminante del mundo. Los impactos ambientales más negativos se presentan en la primera etapa del proceso, en la de extracción de materias primas; los recursos que utiliza se dividen en renovables y no renovables. Las fibras textiles naturales son renovables y se obtienen de la agricultura y ganadera para obtener materiales como algodón, lino y cuero; sin embargo, implica el uso de fertilizantes, plaguicidas químicos que son perjudiciales para la salud y el equilibrio ambiental; además que, para producir las fibras, específicamente un kilogramo, se requieren miles de litros de agua. Mientras que las que provienen de la explotación ganadera producen cantidades considerables de gases invernadero, además que las pieles provenientes de los animales involucran procedimientos dolorosos para animales y su tratamiento de curtido involucra el uso de sustancias como cromo, cadmio, titanio, aluminio y zirconio.

Por otro lado, la obtención de fibras sintéticas derivadas del petróleo impacta en el cambio climático; muchas de estas fibras son desechadas anualmente al mar, aproximadamente medio millón de toneladas que son difíciles de degradar. 20% de tóxicos vertidos al agua proceden de la industria textil. Se destaca que en el proceso utilizan tintes y blanqueadores (*ONG Manos Unidas, 2020*)

---

---

En general en todo el proceso textil se tiene un impacto alto en el ambiente desde el manejo de químicos tóxicos, vertidos de aguas residuales, emisiones atmosféricas, residuos sólidos como desecho textil, liberación de micro plásticos, contaminación del suelo y acústica.

## **1.6 Telas no tejidas**

Las telas no tejidas, son productos creados a partir de redes fibrosas con arreglo paralelo, cruzado o al azar mediante el uso de adhesivos o termoplásticos, dicho procesamiento recurre a someter al material a la aplicación de calor y/o presión. Este tipo de telas comúnmente se les conoce como “nonwoven fabrics” los cuales son textiles sencillos. Son considerados como uno de los más antiguos, sin embargo, sus técnicas de confección se han perfeccionado a partir de la década de los sesenta; en sus inicios se ocupaban como parte de ropa protectora, pero con los años ha tenido un notorio crecimiento en la confección de todo tipo de ropa, geotextiles, filtros, pañales, bolsas, toallitas, recubrimientos de piso, calzado, indumentaria médica, sustratos de recubrimiento, entre otros. Sus propiedades varían desde ser suaves hasta duras; pueden ser super resistentes o bien débiles. (*Chaudhari & Mandot, 2008*).

Actualmente el uso de telas no tejidas ha tenido un significativo interés por la industria textil para buscar nuevos materiales que puedan tener orígenes de la biomasa, esto se debe a que se requieren para ser utilizados en tapicería y embalaje, pues en muchos casos gracias a sus propiedades de flexibilidad y durabilidad hacen favorable el uso de estas.

Las telas no tejidas son sometidas a tratamientos térmicos que propician a la formación del nuevo material; las telas son recubiertas mediante el uso de polímeros, generalmente los espesores finales rondan entre 1.0-1.8 mm que son los que presentan valores altos de resistencia a la tracción (*Hassan & Saad, 2024*).

Los recubrimientos aplicados siguen diversos procesos de acuerdo con el costo y finalidad del producto; estos recubrimientos proceden de líquidos viscosos que son

---

---

esparcidos sobre la superficie del sustrato, posteriormente se secan o curan. Los recubrimientos son polímeros capaces de formar una película sólida. Los más utilizados son polímeros termoplásticos con moléculas de cadena larga, muchos de ellos son polímeros sintéticos. El poliéster, algodón, viscosa, polipropileno son base de dichos sustratos a los cuales se les recubre. Recubrir sirve como protección o barrera, mejora de apariencia, estabilidad a tensión, control de porosidad, base para soporte de pigmentos y flexibilidad en la tela no tejida (*Kinge et al., 2013*).

El embalaje, como se mencionó anteriormente, es uno de los usos potenciales de las telas no tejidas, ya que, al ser ligeras, resultan eficientes y no voluminosas, además de ser reutilizables. Estas telas se utilizan en el transporte de objetos como sobres, sacos, bolsas, envoltorios, así como en embalajes interiores y exteriores de lujo, productos de lavandería y tintorería, bolsas de aspiradora, envoltura de metales y bolsos. También se emplean para protección, como en envoltorios de esterilización, láminas, bolsos y sacos para productos delicados, como electrónicos, parachoques de automóviles, artículos de cuero, productos farmacéuticos y cosméticos, así como para productos a granel, como acero, madera y vidrio (*EDANA, 2024*).

## **1.7 Diseño de Experimentos**

El Diseño de Experimentos es aquel que consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas mediante el uso de diferentes técnicas estadísticas que proporcionen evidencias objetivas para probar o rechazar hipótesis permitiendo conocer sus efectos (*Montgomery, 2005*).

Las técnicas estadísticas son fundamentales para dicho diseño, pues se busca caracterizar variables explicativas o factores con mayor influencia en un ensayo de interés. Se evalúan por variables de respuesta donde se pueden introducir variables explicativas del proceso que permitan cuantificar los cambios de la respuesta (*Melo et al., 2007*)

---

---

Un Diseño completamente al azar (DCA) consiste en el estudio de una sola fuente de variación y una variable de respuesta. Se aplican los principios del diseño de experimentos repetición, bloqueo y aleatorización (*Gutiérrez, 2012*). Se aplica en la investigación experimental donde se controlan las condiciones ambientales o bien se presenta poca variabilidad entre las unidades experimentales; se puede manejar un gran número de tratamientos y repeticiones o bien diferentes repeticiones entre tratamientos. La asignación de tratamientos a unidades experimentales se hace sin restricción y de forma aleatoria. (*Martínez Rueda, 2015*)

El análisis de varianza (ANOVA) permite comparar varios grupos en una variable cuantitativa, es una generalización de contraste de igualdad de medidas para muestras o poblaciones independientes con distribución normal. Esta comparación de grupos independientes ayuda a determinar si al menos una de las medidas es significativamente diferente a la otra (*Bakieva et al., s. f.*). Se basa en supuestos como independencia de las observaciones, normalidad de datos que siguen una distribución normal y homogeneidad de varianzas entre grupos que deben ser aproximadamente iguales. Estadísticamente hablando es una herramienta muy funcional para experimentos y estudios que involucran comparaciones de grupos.

Es útil cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetitivas en más de dos ocasiones o cuando los sujetos de estudio varían en una o más características que afecta al resultado, por lo que hay que ajustar su efecto o bien se requiere analizar simultáneamente el efecto de dos o más tratamientos diferentes. El más simple es el ANOVA de un solo factor o vía aludida a cuando solo existe una variable independiente para clasificar a los sujetos; la más compleja son las de dos o más factores de medidas repetitivas (*Dagnino, 2014*).

## **1.8 Técnicas de caracterización de materiales**

### **1.8.1 Microscopía electrónica de barrido**

---

---

La técnica de microscopía electrónica de barrido (Scanning electron microscope, SEM), permite obtener imágenes de alta resolución y capacidades de análisis morfológico, estructural y químico. Se toma una imagen de la muestra detectando una respuesta del material al impacto del haz de electrones primarios de alta energía. Dicha muestra produce señales que se registran en los detectores del equipo para rescatar información de topografía, composición química e inclusive conductividad eléctrica; la obtención de la imagen mueve el haz en el plano  $xy$  mediante los sistemas ópticos; la resolución o capacidad de distinción de la imagen en la superficie del material puede ser hasta de 20 nm (*Clavijo, 2012*). La aplicación de no vacío o ambiental-SEM (ESEM), funciona para muestras biológicas y no conductoras que no necesariamente necesitan recubrirse; generalmente aplica para aquellas que son hidratadas o contaminadas que superan las restricciones originales del alto vacío exigido por la columna del microscopio pudiendo operar a condiciones atmosféricas o de bajo vacío (*Hipohorski & Bozzano, 2013*).

### **1.8.2 Análisis Infrarrojo de Transformada de Fourier**

El método de análisis Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica espectroscópica que utiliza una parte del espectro electromagnético para registrar información sobre el material al que se aplica el haz de infrarrojos. Parte de la radiación infrarroja pasa a través de la muestra, es absorbida y otra es transmitida; el espectro resultante presenta la absorción y transmisión molecular; es similar a una huella digital donde no hay dos estructuras moleculares que produzcan el mismo espectro. Esto permite identificar materiales desconocidos, la calidad y consistencia de la muestra o la cantidad de componentes en una muestra (*Thermo Fisher Scientific, 2022*).

### **1.8.3 Máquina Universal**

La máquina Universal se usa para la determinación de resistencia de materiales. La máquina universal de una sola columna, están diseñadas para ser aplicadas en un amplio rango de materiales en aspectos de tensión, compresión, flexión, desgarrado o pelado. Aplican para plásticos, película, caucho, non-woven (telas no tejidas), materiales filtrantes, papel, adhesivos, cuero, aluminio, alimentos, productos médicos, juguetes, etc.

---

---

Dichas máquinas tienen un marco rígido que soporta las fuerzas aplicadas durante las pruebas, poseen actuadores que pueden ser hidráulicos, mecánicos o neumáticos que aplican la carga a la materia; así como células de carga que miden la fuerza aplicada, las mordazas o fijos que sujetan el material de prueba. Generalmente usadas en pruebas de tensión que medirán la resistencia del material a la tracción otorgando su límite elástico, resistencia máxima y punto de ruptura (*IDM TEST, 2021*). En particular la máquina universal Stress-Strain®, es un equipo utilizado para realizar pruebas a diferentes materiales, en este se ilustra la relación entre stress (esfuerzo) y strain (tensión, deformación). Su principio de funcionamiento implica el estiramiento del material por los extremos para romperlo; simultáneamente se mide y registra la cantidad de estiramiento y fuerza que experimenta el material en la prueba. Gracias a un software se puede generar una curva de stress vs strain. Este aparato ocupa sensores de movimiento giratorio y de fuerza (*PASCO, s.f*).

### 1.8.3.1 Diagramas de Tensión deformación y Modulo de Young

El módulo de Young o de elasticidad es aquel que relaciona el esfuerzo con la deformación que experimenta un material al someterlo a cargas externas. El esfuerzo ocurre por fuerzas internas de un cuerpo debido a cargas exteriores dando origen al esfuerzo unitario ( $\sigma$ ) que plasma la intensidad de fuerza por unidad de área transversal con unidades de carga aplicada ( $P$ ) sobre área donde actúa la carga ( $A$ )

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad Ec. 1$$

La deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) es un cambio de longitud que sufre el material bajo un esfuerzo, siendo un cambio de longitud por unidad de longitud. Donde el elemento debe tener una sección recta transversal constante, debe ser material homogéneo y la fuerza o carga debe producir un esfuerzo uniforme. Con  $\delta$  como deformación total y  $L$  como longitud original.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad Ec. 2$$

Los diagramas de esfuerzo-deformación representan en las ordenadas los esfuerzos (stress) y en abscisas la deformación unitaria (strain)

---

---

La elasticidad es una propiedad donde el material deformado regresa a su forma original después de retirar las fuerzas que lo deforman; donde los materiales son elásticos hasta cierto límite de carga. El esfuerzo será proporcional a la deformación de acuerdo con la Ley de Hooke; la cual se identifica en los diagramas anteriores mencionados. De este modo la pendiente de los diagramas stress-strain proporciona el módulo de elasticidad o de Young ( $E$ ), siendo una constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo y deformación mientras no se exceda el límite de elasticidad; destacando que dicho modulo es variable con la temperatura (*Rayas et al., 2003*).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad Ec. 3$$

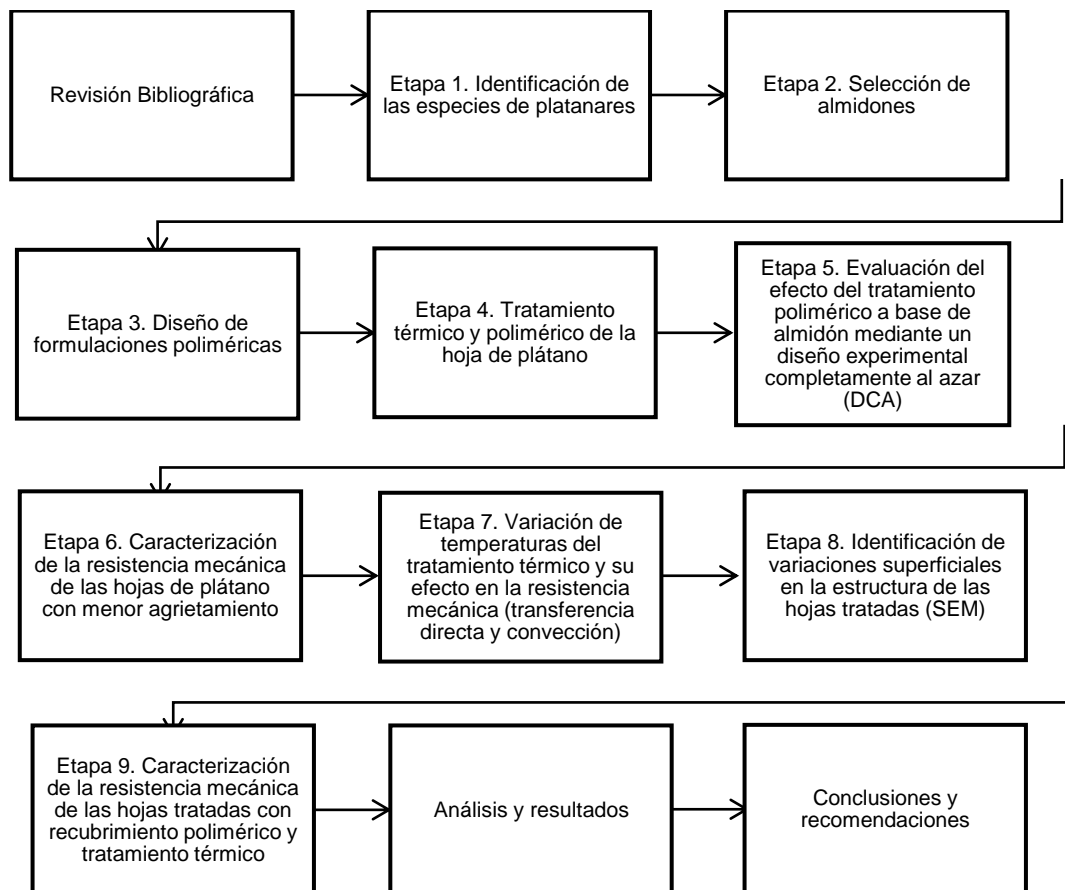
---

# Capítulo 2.

## Metodología

La metodología de este trabajo de tesis involucro la implementación de nueve etapas, todas ellas desde la perspectiva experimental, realizadas en laboratorio. Dentro de esta metodología se incluyó un diseño experimental completamente aleatorio (DCA) y el método ANOVA realizado para la obtención y análisis de resultados. Todo lo anterior se refleja descrito en el diagrama representado por la Figura 3.1

Figura 3.1 Metodología experimental de selección de materias primas y procedimiento de curado para la obtención de tela no tejida.



---

---

## 2.1 Etapa 1. Identificación de las Especies de platanares

Se identificaron las especies disponibles para el estudio de la resistencia mecánica de la hoja, gracias a la ubicación geográfica de donde se desarrolló el trabajo de tesis, es decir, la Ciudad de Puebla, se lograron obtener hojas correspondientes a la hoja de plátano Figura 4.1 (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo o bijao Figura 4.2 (*Calathea lutea*) las cuales fueron sustraídas de plantíos presentes en el sitio de desarrollo de trabajo.

Se realizó una investigación documental sobre sus características, nombre científico, composición química y otras generalidades ya que estas fueron objeto de estudio del presente trabajo.

Figura 4.1 Hoja de plátano (*musa paradisiaca*)



Figura 4.2 Hoja de platanillo o bijao (*Calathea lutea*)



## 2.2 Etapa 2. Selección de almidones

---

---

Se seleccionaron y obtuvieron almidones, según la literatura y de acuerdo con Nole & Raul, 2022. Estos provenían de fuentes comunes, en este caso del camote, yuca, papa y maíz. Los tres primeros correspondían a tubérculos y el último a un cereal.

### **2.2.1 Obtención de almidón de yuca, papa y camote**

Para la extracción de almidones de los tubérculos yuca, papa y camote se muestra el procedimiento en la Figura 5.1.

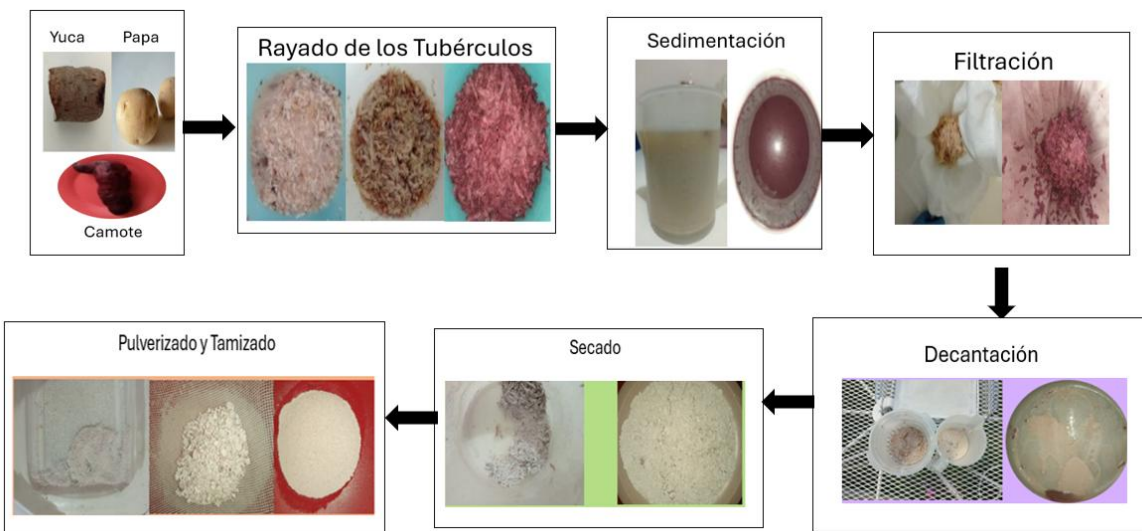
1. Se rayaron 1kg de las fuentes de almidón; en este caso yuca o tapioca, papa blanca y camote morado.
2. Se adicionó 1L de agua tibia a 40°C a cada uno de los tubérculos rayados
3. Se dejó reposar y sedimentar por 20 minutos hasta obtener un concentrado de almidón en agua
4. Se sometió a un proceso de remoción de líquido a los tubérculos rayados, primero separándolos de la solución concentrada vía manual y una vez separados se exprimieron con ayuda de un telar de manta. El líquido residual se adicionó a la solución obtenida en el sedimento.
5. La solución concentrada de almidón se filtró con ayuda de un trozo de tela de manta de 40 x 40 cm (filtro), este con apertura de 300 micras (0.3mm) y se separó el residuo en un recipiente.
6. El filtrado se sometió a adición de agua tibia a condiciones del punto 2 hasta obtener un volumen de solución de 1.8 L.
7. La solución con almidón del paso 6 se sometió a sedimentación por 2 horas y posteriormente se decantó, se conservó el sólido presente en el fondo del recipiente y el líquido se desechó.
8. Los sólidos obtenidos en el paso 7 contaban con presencia de agua, estos se adicionaron a los sólidos tipo residuo obtenidos en los pasos anteriores.
9. Se dejaron secar los sólidos del paso 8 correspondientes al almidón por 72 horas para remover la humedad presente. Las condiciones de secado fueron por convección natural, en espacio abierto y con presencia de radiación solar.

10. Una vez obtenido el almidón de tipo sólido se pulverizó en un extractor de alimentos con la finalidad de reducir el tamaño de partícula del sólido.
11. El almidón en polvo finalmente se tamizó con ayuda de un tamiz convencional de acero inoxidable malla 60 (0.250mm)

### 2.2.2 Obtención del almidón de maíz

Para el caso de la obtención del almidón de maíz se trabajó con un almidón de tipo comercial el cual únicamente se sometió a tamizado ya que presentaba algunos grumos. Se utilizó un tamiz convencional de harina construido de acero inoxidable con una malla 60 (apertura 0.250 mm).

Figura 5.1 Proceso de obtención de almidones



### 2.3 Etapa 3. Diseño de formulaciones poliméricas

El diseño de las formulaciones poliméricas consistió en la investigación de proporciones en la literatura con la finalidad de ajustar las cantidades de los componentes especialmente del plastificante. Para ello se tomó en cuenta que de acuerdo con *Hassan & Saad, (2024)* y *Tarique et al. (2021)* las proporciones utilizadas en porcentaje en peso del glicerol respecto el almidón fueron de entre 20-50% asegurando que la plastificación

---

---

en la biopelícula sea factible con propiedades mecánicas buenas y que se favorezca la formación de espesores dentro de intervalos establecidos. Así mismo se identificó que las proporciones de agua utilizadas respecto al peso del almidón se dan mediante relaciones de 5-7:1 según lo reportado por *López et al. (2023)*.

De modo que se propusieron composiciones basadas en mezclas de almidones, la base de la composición fue el almidón de maíz mezclado con el de otros tubérculos; Se plantearon las siguientes formulaciones:

- Formulación 1: 50g de almidón de maíz, 50g almidón de papa, 660ml de agua destilada y 40 ml de glicerina
- Formulación 2: 50g de almidón de maíz, 50g almidón de yuca, 660ml de agua destilada y 40 ml de glicerina
- Formulación 3: 50g de almidón de maíz, 50g almidón de camote, 660ml de agua destilada y 40 ml de glicerina

## **2.4 Etapa 4. Tratamiento térmico y polimérico de la hoja de plátano**

La aplicación de los tratamientos se dividió en dos etapas y se muestra en la Figura 6.1 Etapa A. Tratamiento térmico.

Esta etapa consistió en la aplicación de un tratamiento térmico a la hoja de plátano (*musa paradisiaca*). Se realizó una transferencia de calor por convección sobre la hoja de plátano (muestras) que se sometieron a calentamiento hasta antes de la ebullición en agua, es decir a 94-98°C; las condiciones de presión fueron atmosféricas. Posteriormente se extrajeron del seno del fluido y secaron por convección natural por 1 hora.

Etapa B. Tratamiento polimérico.

- 1) Formación de los polímeros: Los polímeros que se obtuvieron fueron 3, en este caso hechos a partir de las formulaciones planteadas en la Etapa 3.
  - Polímero 1 (PL1) formulado con maíz-papa
  - Polímero 2 (PL2) formulado con maíz-yuca
  - Polímero 3 (PL3) formulado con maíz-camote

La formación para los polímeros PL1, PL2 y PL3 consistió en la adición individual de componentes para cada polímero de agua, glicerol y almidones (cantidades plasmadas en las formulaciones correspondientes) a un vaso de precipitado de 600 mL, se realizó un mezclado por agitación manual hasta que se obtuvo una solución blanquecina. Seguido de esto se sometió a calentamiento la solución mediante una parrilla que opero a 200°C. Primeramente se determinó que las condiciones de temperatura que estaba la solución eran de  $23.3\pm 2^{\circ}\text{C}$ , se siguió agitando la solución hasta que empezó a polimerizar, donde la solución cambió su viscosidad con tendencia a ser espesa. La temperatura final de la formación de los polímeros fue a  $73\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

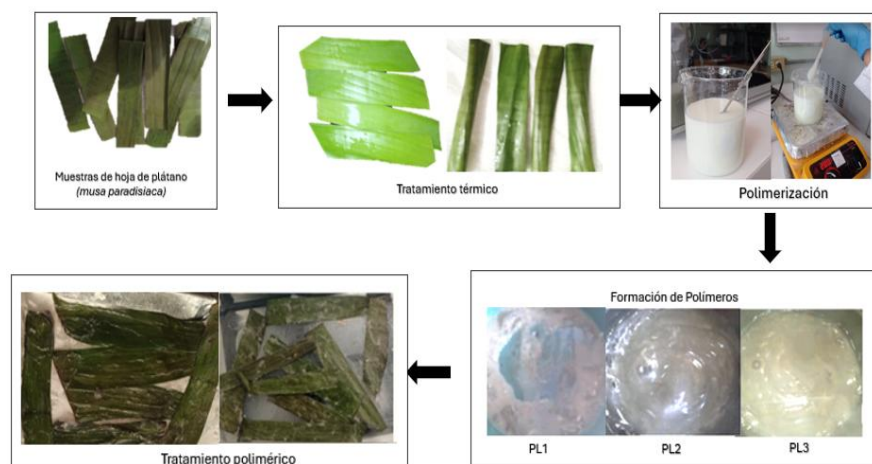
2) Tratamiento por recubrimiento polimérico de la hoja de plátano

Formado el polímero se aplicó con una brocha de 3" mediante la formación de una capa por ambos lados a las muestras de hoja de plátano que habían sido ya tratadas térmicamente en la Etapa 1.

Las muestras fueron de dimensiones de 3 x 15 cm con 4 muestras por cada polímero, es decir un total de 12 muestras.

3) Se secaron las muestras tratadas térmica y poliméricamente por 24 horas bajo condiciones de convección natural y se evitó la exposición directa del sol.

Figura 6.1 Proceso de aplicación de tratamiento térmico y polimérico a la hoja de plátano.



---

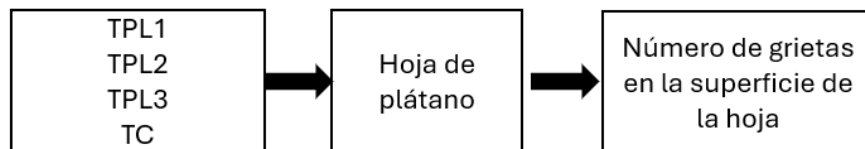
---

## 2.5 Etapa 5. Evaluación del efecto del tratamiento polimérico a base de almidón mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA)

Mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA) se evaluaron los efectos de los tratamientos poliméricos a base de almidón, descritos en la Etapa 4. El tratamiento térmico fue igual para todas las hojas muestra y de igual manera se tomó el de la Etapa 4.

La evaluación mediante el DCA primero consistió en la aplicación de un Modelo general de procesos como se muestra en la Figura 7.1

Figura 7.1 Modelo general de procesos



Se identificó nuestro experimento se encaminó a un sistema, es decir se tomó a la unidad experimental hoja de plátano, específicamente probetas de 3 x 15 cm.

Las variables de entrada o variables de manipulación del proceso utilizadas fueron TPL1, TPL2, TPL3 y TC; pertenecieron a un solo factor. Las tres primeras fueron tratamientos descritos según la Etapa 4. Es decir, TPL1 es tratamiento polimérico por polímero PL1, TPL2 por polímero PL2 y TPL3 por PL3. El TC, correspondió al denominado control, es decir a muestras de hoja de plátano en estado natural. Los niveles de la variable de entrada fueron 4, es decir, número de tratamientos diferentes.

La variable de salida fueron el número de grietas presente en la superficie de la muestra de hoja de plátano que se generaron mediante las pruebas de elongación; donde sometieron hasta su máximo número de dobleces (5 dobleces).

Los principios que se aplicaron para el diseño completamente al azar se basaron en el principio de repetición al utilizar 4 unidades experimentales por cada grupo de tratamiento idénticas y dieron origen a 4 repeticiones.

---

---

El principio de bloqueo se implementó en la utilización de las mismas dimensiones y especie de la unidad experimental, así mismo se aplicó el mismo tratamiento térmico y condiciones de operación. Se realizaron los experimentos en el mismo sitio bajo la misma temperatura ambiental y humedad (26°C), se utilizaron los mismos instrumentos y equipos en la formación de todos los polímeros, se utilizó el mismo tipo de agua destilada y cantidad, así mismo la misma cantidad en peso seco de almidón total, mismo tipo y cantidad de glicerol. La corrida experimental se realizó por la misma persona.

El ultimo principio aplicado fue el de aleatorización donde las pruebas fueron realizadas aleatoriamente.

El procedimiento que se siguió para el diseño experimental se resume en:

- 1) Se Obtuvieron probetas de 3 x 15 cm de una hoja de plátano (*musa paradisiaca*), en total 16.
- 2) Se aplicaron los tratamientos correspondientes a las probetas, por lo que se dividieron las 16 en 4 grupos con 4 elementos cada uno. Cada grupo corresponde a los tratamientos TPL1, TPL2, TPL3 y TC.
- 3) Las probetas de cada grupo se sometieron a pruebas de elongación mediante el máximo número de dobleces. Los 4 elementos de cada grupo nos permitieron realizar las 4 repeticiones experimentales por tratamiento. En esta etapa se aplicó el principio de aleatorización
- 4) Una vez realizado el experimento se registró el comportamiento de la variable de salida (número de grietas en la superficie de la hoja).

Finalmente se aplicó un ANOVA que permitió evaluar cuantitativamente los efectos de los tratamientos TPL1, TPL2, TPL3 comparados con TC y se obtuvo el que generaba menor agrietamiento, es decir el que beneficio mecánicamente a la hoja de plátano.

El análisis matemático y estadístico de esta etapa se siguió según la teoría de Diseño de Experimentos de Gutiérrez, 2012.

Se utilizaron las siguientes expresiones de la Tabla 2.0

Tabla 2.0. Tabla del ANOVA para el DCA.

Factor	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados Medios (CM)	Valor estadístico de varianza entre y dentro grupos F0	Valor-p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i \cdot}^2}{n_i} - \frac{Y_{\cdot \cdot}^2}{N}$	$GL_{TRAT} = k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F < F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	$GL_E = N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{\cdot \cdot}^2}{N}$	$GL_T = N - 1$			

Suma de observaciones de los tratamientos	$Y_{i \cdot} = \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}$
Suma total de las observaciones	$Y_{\cdot \cdot} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}$
Hipótesis Nula	$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$
Hipótesis Alternativa	$H_A = \mu_i \neq \mu_j$ para algún $i \neq j$
Medias Globales Muestrales entre grupos	$ \bar{Y}_i \cdot - \bar{Y}_j \cdot $
Valor LSD	$LSD = T \sqrt{CM_E \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$
Parámetro estadístico T	$T = t_{\frac{\alpha}{2}, N - k}$

Decisión LSD	$ \bar{Y}_i \cdot - \bar{Y}_j \cdot  > LSD$
--------------	---

Donde  $i$  fue el número de tratamiento y  $j$  la repetición aplicable para  $k$  tratamientos y  $n_i$  observaciones con  $N$  como el número total de observaciones. La  $\mu$  es la media global de los tratamientos.

Por otro lado, se recurrió a la aplicación del método LSD (diferencia mínima significativa) con la finalidad de comparar los tratamientos aplicados a la hoja y al control; las comparativas surgieron entre todos (TPL1, TPL2, TPL3 y TC) y nos proporcionó información sobre si estos fueron diferentes en sus medias globales de las observaciones. Se consideró el rechazo de la hipótesis nula  $H_0$  cuando la diferencia de las medias globales muestrales entre los grupos ( $|\bar{Y}_i \cdot - \bar{Y}_j \cdot|$ ) era mayor a los valores del LSD o bien si era diferente se aceptó. Las combinaciones en total entre grupos fueron 6. Así mismo se utilizaron las ecuaciones pertinentes para el cálculo del LSD.

Donde  $T$  fue un parámetro que involucro la  $t$  de Student, fundamental para la comparación de medias entre grupos,  $\alpha$  como la sensibilidad al 5% trabajada en el ANOVA y  $N$  representó el total de observaciones con  $k$  tratamientos. Mientras que las  $n_i$  y  $n_j$  refirieron a las observaciones (repeticiones).

Se aplicó un Diagrama de cajas y bigotes (Boxplot) como herramienta gráfica para la distribución de datos numéricos del experimento.

Finalmente, como parte del análisis del diseño experimental se utilizó la verificación de supuestos mediante las pruebas de normalidad, varianza e independencia. Recurriendo a metodología planteada por Gutiérrez, 2012 donde se consideraron los predichos (medias) y residuales calculados mediante la Ec.4

$$e_{ij} = Y_{ij} - \bar{Y}_{i \cdot} \quad Ec. 4$$

Con  $e_{ij}$  como residual,  $Y_{ij}$  corresponde al valor del tratamiento observado y  $\bar{Y}_{i \cdot}$  a su media.

## 2.6 Etapa 6. Caracterización de la resistencia mecánica de las hojas de plátano con menor agrietamiento

---

---

La caracterización de la resistencia mecánica se realizó mediante el uso de una máquina universal como se muestra en la Figura 8.1 la maquina estaba conformada por una sola columna con marco rígido, que soporto las fuerzas aplicadas durante las pruebas de tensión, así mismo su actuador era de tipo mecánico por acción manual. La célula utilizada para medir la carga fue un dinamómetro digital acoplado al marco; la máquina contaba con medios de sujeción tipo mordaza.

Para todas las caracterizaciones de resistencia mecánica se utilizaron probetas de 10.5 cm x 2cm como se muestra en la Figura 9.1, estas fueron utilizadas en todos los ensayos. Previamente a la caracterización y con ayuda de la plantilla se recortaron las probetas de las muestras.

El procedimiento de caracterización de las probetas diferentes mediante la máquina universal que se siguió fue el siguiente:

- 1) Se caracterizo la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) con tratamiento que presentó menor cantidad de grietas de la Etapa 5 (TPL2) aplicado a muestras nuevas.
- 2) Se caracterizo la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) en estado natural
- 3) Se caracterizo la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) con solo un tratamiento térmico por transferencia de calor por contacto directo o conducción mediante una plancha de nano titanio como se muestra en la Figura 10.1 que opero a 245°C donde se aseguró gracias al material la distribución uniforme del calor sobre la superficie de las hojas. Los tiempos de transferencia comprendieron 1 minuto.
- 4) Se realizó un tratamiento térmico sobre la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) basado en el punto 3) descrito anterior y posteriormente se le aplico un tratamiento polimérico (PL2) basado en el tratamiento que presento menor cantidad de grietas de la Etapa 5 (TPL2); el cual siguió el procedimiento para su elaboración basado en la Etapa 4 de la de la Etapa B. Finalmente se realizó la caracterización de la resistencia mecánica.

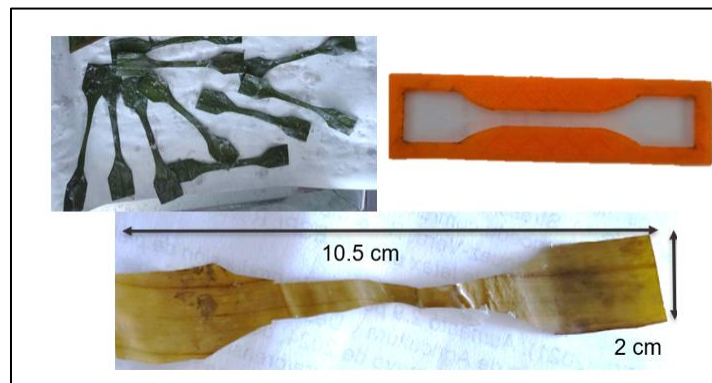
- 
- 5) Se caracterizó la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) y la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) con solo un tratamiento térmico por transferencia de calor por convección en medio acuoso bajo condiciones descritas en Etapa 4 de la Etapa A.

En todas las caracterizaciones se trabajaron con cuatro repeticiones dadas por las cuatro probetas correspondientes

Figura 8.1 Máquina Universal



Figura 9.1 Probetas para pruebas mecánicas.



Por otro lado, mediante la técnica de análisis Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) se caracterizó el almidón de yuca y maíz obtenido en la Etapa 2 el cual conformo al TPL4 para conocer su composición y permitió asegurar que se trataba de almidones.

---

---

## 2.7 Etapa 7. Variación de temperaturas del tratamiento térmico y su efecto en la resistencia mecánica

Se realizó una caracterización del efecto de los tratamientos térmicos sobre la resistencia mecánica de la hoja de plátano (*musa paradisiaca*), pues de acuerdo con los valores y comparaciones obtenidas de la Etapa 6 esta especie mostraba mayor resistencia mecánica respecto a la *Calathea Lutea*. Previamente se analizó el comportamiento de esta al aplicar el tratamiento térmico por convección en medio acuoso con temperatura de 94-98°C que comparado con el de transferencia de calor directa por asado en plancha a 245°C de la Etapa 6 presento menor resistencia. A partir de ello se tomó la iniciativa de medir nuevamente por máquina universal la resistencia mecánica de la hoja de plátano (muestras 4 por cada tiempo y temperatura) sometida a la variación de temperaturas solo por transferencia de calor directa (conducción).

La variación de las temperaturas abarcó rangos de 105°C-285°C, estos valores de temperatura fueron determinados al momento de realizar las corridas experimentales con un termómetro infrarrojo digital de tipo industrial que midió la temperatura superficial de tipo lineal de la plancha (Figura 10.1) responsable del asado, así como la temperatura puntual de la superficie tomando un área específica definida por el láser. Los niveles que se trabajaron fueron los de la plancha 5, 22.5 y 45 responsables de los valores de temperaturas y resistencia. Por cada nivel se varió el tiempo de asado utilizando 10, 40, 60 y >60 segundos (hasta el cambio total de color de la hoja pasando de verde a marrón oscuro).

Todas las caracterizaciones hechas en esta etapa y la anterior tuvieron la finalidad de la evaluación del comportamiento de la resistencia mecánica para la determinación del mejor tratamiento térmico-polimérico, la mejor especie y temperaturas que presentaron mayor resistencia respecto a las otras.

---

Figura 10.1 Plancha de nano titanio para el asado de las hojas.



## 2.8 Etapa 8. Identificación de variaciones superficiales en la estructura de las hojas tratadas

Se identificaron las variaciones superficiales en la estructura de las hojas utilizadas en la experimentación. Se llevó a la utilización de la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) donde se lograron identificar los cambios provocados por los diversos tratamientos en la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) ante condiciones naturales, asado, hervido y térmico-poliméricos. Así mismo únicamente para la hoja de platanillo (*Calathea lutea*) solo se aplicó la técnica en hojas con ambos tratamientos (térmico-poliméricos).

El equipo utilizado para la técnica SEM fue un microscopio electrónico de barrido VEGA de TESCAN® como se muestra en la Figura 11.1, este fue responsable de la obtención de los datos morfológicos. Para obtener las imágenes de las muestras de todas las hojas fueron recubiertas por cinta de carbono doble cara de 5mm, caracterizándose por ser buena conductora. Las resoluciones espaciales de imágenes se trabajaron fueron a 50 $\mu$ m y 100 $\mu$ m con condiciones de bajo vacío entre 8Pa-18Pa ya que se trataban de muestras orgánicas lo que nos permitió que no sufrieran daños o pérdidas causadas por deshidratación y acumulación de carga. Al ser las muestras consideradas como un material complejo se utilizó el detector de electrones retro dispersados (BSE) que nos brindó la imagen de la superficie de menor resolución.

---

Figura 11.1 Microscopio electrónico de barrido



## **2.9 Etapa 9. Caracterización de la resistencia mecánica de las hojas tratadas con recubrimiento polimérico y tratamiento térmico**

El método de caracterización de resistencia mecánica de las hojas tratadas por recubrimiento polimérico y térmico se llevó a cabo mediante la tensión -deformación. Para volver uniforme las pruebas se utilizaron probetas como las descritas en la Etapa 6. El aparato que se utilizó (Figura 12.1) fue el Stress-Strain Aparatus ® 8217 el cual permitió la obtención de curvas características que involucraron al módulo de Young gracias al software con el que trabaja dicho equipo.

Se realizaron las tensiones para la *musa paradisiaca* únicamente, porque es la especie que presento mejor resistencia. Las pruebas primero comprendieron a las hojas de plátano solo tratadas térmicamente por transferencia de calor directa (asado) a las mejores temperaturas que aportaron mayor resistencia, es decir, 118°C, 160°C y 245°C; cada temperatura tuvo 5 repeticiones en las pruebas mecánicas. Finalmente, a temperatura de 160°C del tratamiento térmico por asado, que mostro mejores resultados mecánicos se le adiciono un tratamiento polimérico hecho por el polímero PL2 (yuca-maíz) bajo condiciones ya descritas con anterioridad (Etapa 3 y 4). Así mismo la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) con ambos tratamientos (térmico-poliméricos) se sometió a caracterización por el aparato Stress-Strain con 6 repeticiones.

---

Figura 12. 1 Stress-Strain Aparatus ®



---

# Capítulo 3:

## Resultados

### 3.1 Identificación de las especies de platanares

En la Etapa 1 se identificó y seleccionó la especie de hoja a estudiar de acuerdo con el platanar de origen y se obtuvieron registros cualitativos como se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Resultados de Identificación y selección de especies a estudiar.

Espece	Dimensiones	Descripción
Hoja de plátano ( <i>Musa paradisiaca</i> )	Largo: 105 cm Ancho: 58 cm	Proveniente de una planta de plátano Tabasco, presentó color verde brillante característico, hoja grande y alargada, ovalada, flexible, con nervaduras en su superficie que conforman su estructura foliar, lisa y con presencia cerosa.
Hoja de platanillo ( <i>Calathea lutea</i> )	Largo: 63 cm Ancho: 22 cm	Presentó tamaño pequeño, ovalada, hoja de color verde característico con poco brillo sutil en la parte superior, blanquecina por la parte inferior, lisa con textura aterciopelada, flexible, con presencia cerosa en superficie, así como nervaduras que conforman su estructura.

### 3.2 Selección de almidones y diseño de formulaciones poliméricas

La Etapa 2 otorgó almidones (Figura 13.1) en polvo a partir de su extracción de fuentes como la yuca, papa, camote y maíz. Los rendimientos en peso seco a partir de la

extracción de los tubérculos con la metodología utilizada fueron 55-65 g de polvo por cada kilogramo de tubérculo. Se logró la formulación planteada en la Etapa 3, la cual generó los tres polímeros diferentes en composición, fundamentales para los tratamientos poliméricos. Físicamente cada polímero presentó apariencia diferente como se muestra en la Figura 13.2, el polímero PL1 se mostró un color blanquecino a amarillento con ligera formación de grumos y consistencia espesa al manipularlo; por otro lado, el PL2 y PL3 exhibieron consistencia ligera similar y tendencia a ser transparentes, el ultimo tuvo una tonalidad ligeramente amarillenta.

Figura 13.1 Almidones en polvo



Figura 13.2 Apariencia física de los polímeros a base de almidón



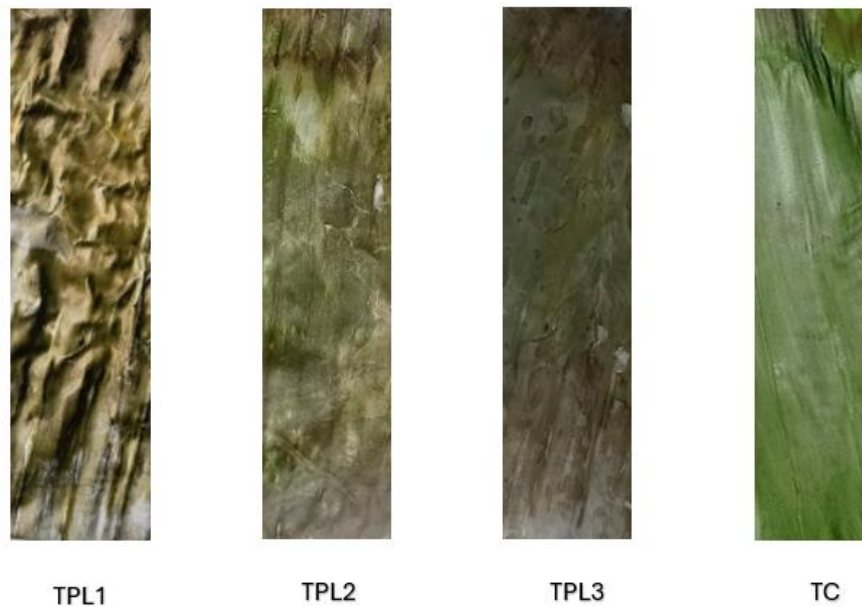
---

---

### 3.3 Tratamiento térmico y polimérico de la hoja de plátano

Gracias a la metodología de la Etapa 4. Se lograron conseguir las muestras sometidas a tratamiento térmico por convección en medio acuoso y de tipo polimérico por recubrimiento mediante el uso de los polímeros PL1, PL2 y PL3 como se muestra en la Figura 14.1 donde se aprecian las muestras de los respectivos tratamientos TPL1, TPL2 y TPL3; así mismo se presenta la comparativa con el TC que corresponde al control (muestra de hoja natural). Físicamente las hojas con cada tratamiento presentaron cambios respecto al TC especialmente en coloración, textura y apariencia; pues la TPL1 mostró textura rugosa mientras que la TPL2 y TPL3 una textura lisa; físicamente las tres muestras sometidas a tratamientos tuvieron cambio de coloración respecto a su tonalidad pues hubo un cambio a marrón notándose en todas la presencia de la capa polimérica con espesor finales de  $0.8\pm 0.1$  mm cercanos a los característicos de las telas no tejidas según (*Hassan & Saad, 2024*). Al tacto y manipulación las muestras se comportaron más estables respecto a su resistencia, especialmente en la tendencia a la ruptura a lo largo de sus nervaduras comparadas con las de TC.

Figura 14.1. Tratamientos Térmico-Poliméricos Etapa 4.



### 3.4 Evaluación del efecto del tratamiento polimérico a base de almidón mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA)

Mediante la aplicación de un DCA (Etapa 5) se evaluó el efecto de los tratamientos aplicados en la Etapa 4 a la *musa paradisiaca*.

La Figura 15.1 muestra la forma en la que se cuantificó las grietas presentes en las hojas después de las pruebas de elongación (5 dobleces) que sirvieron para conocer los efectos sobre las propiedades mecánicas de resistencia en la hoja.

Figura 15.1 Cuantificación de grietas sobre la superficie de la hoja de plátano



En la Tabla 3.1 se plasman los resultados de la cuantificación de grietas (variables de respuesta) mediante la aplicación de un DCA. Cada tratamiento constó de 4 repeticiones y se consideró 1 solo factor sobre el sistema hoja de plátano debido a los 4 tratamientos (niveles del factor); aquí se aplicaron los principios de repetición y bloqueo para el total de 16 muestras a estudiar incluyendo el control (TC).

En general los tratamientos de tipo térmico-poliméricos (TPL1, TPL2, TPL3) presentaron menor cantidad de grietas que el de control TC; es decir hubo un impacto positivo en la resistencia mecánica de la hoja de plátano.

Tabla 3.1 Resultados del número de grietas presentes en la superficie de la hoja de plátano debidas a pruebas de elongación

Tratamiento	TPL1	TPL2	TPL3	TC
Número de Grietas	1	1	1	7
	2	2	2	3
	1	1	2	4
	3	1	1	4

La aleatorización se logró y aplicó (Tabla 4.2) en el orden de cuantificación de grietas para muestras sometidas a elongación. Donde se observa que cada muestra etiquetada según la posición  $y_{ij}$  (Tabla 4.1) fue evaluada siguiendo un orden aleatorio.

Tabla. 4.1 Valores de posición para  $y_{ij}$  de las muestras.

Tratamiento	TPL1	TPL2	TPL3	TC
Valor Experimento $y_{ij}$	1	5	9	13
	2	6	10	14
	3	7	11	15
	4	8	12	16

Tabla. 4.2 Aleatorización en la cuantificación de grietas.

Orden	Experimento ( $y_{ij}$ )	Tratamiento
1	13	TC
2	4	TPL1
3	2	TPL1
4	5	TPL2
5	7	TPL2
6	9	TPL3
7	6	TPL2
8	15	TC
9	14	TC
10	1	TPL1
11	12	TPL3
12	8	TPL2
13	16	TC
14	3	TPL1
15	10	TPL3
16	11	TPL3

Como parte del ANOVA se consideró que los datos experimentales se sometieron a un análisis tomando solo dos fuentes de variación debidas al factor o tratamientos (1 solo factor con cuatro niveles dados por TC, TPL1, TPL2, TPL3) y al error aleatorio. Los resultados se presentan en la Tabla 5.1 donde se tomó el valor critico que contempló valores de tablas de distribución F considerando una sensibilidad  $\alpha$  de 0.05 (5%) como el nivel de significancia más utilizado para aceptar dicho porcentaje de probabilidad y cometer un error.

De esta tabla se concluyó que  $F_0$  (8.1481) es mayor que el valor crítico de  $F$  (3.49)  $F_0 > F_{\alpha, k-1, N-k}$ ; es decir, que se rechazó la hipótesis nula  $H_0$  y se aceptó la hipótesis alterna  $H_A$ , pues hubo un efecto en los tratamientos y estos no tuvieron el mismo efecto en promedio. De igual manera se comprobó lo anterior mediante la probabilidad la cual fue de 0.003165, menor que la sensibilidad  $\alpha$  que indica que hay diferencias significativas entre grupos y aceptó la hipótesis alterna. Todo esto se traduce a que en efecto cada tratamiento de tipo térmico-polimérico fue diferente entre sí, al igual que no fueron iguales al TC (control) y estos tuvieron un efecto diferente sobre la superficie de la hoja de plátano presentándose como grietas debidas a pruebas mecánicas por elongación. En los resultados se nota que el TPL2 (tratamiento térmico-polimérico por transferencia de calor por convección con almidón de maíz y yuca) presentó el menor número de grietas comparado con todos los anteriores que mostraron resultados variables entre sí; así como que estos difirieron con TC.

Tabla 5.1. ANOVA

Fuentes de variación (FV)	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	F0	Valor crítico de F ( $F_{\alpha, k-1, N-k}$ )	Valor- P Probabilidad 0.003165
Tratamientos	27.5	3	9.16666667	8.148148148	3.49	
Error	13.5	12	1.125			
Total	41	15				

De la prueba LSD (Tabla 6.1) se observó que para la comparación de los tratamientos aplicados (TPL1, TPL2 y TPL3) respecto al TC (control) si existió una diferencia entre las medias muestrales ya que fueron mayores que el valor LSD (1.6341), es decir, hubo diferencia estadística entre grupos, por lo que se traduce a que en efecto los tratamientos térmico-poliméricos modificaron la resistencia mecánica de la hoja significativamente, pues se logró el rechazo de la hipótesis nula y se aceptó la alterna.

Por otra parte, la comparativa entre grupos de tratamientos térmico-poliméricos no es tan significativa, pues los tratamientos tuvieron tendencia a similitudes entre sí estadísticamente hablando y aceptaron la hipótesis nula. Sin embargo, al enfocarnos en las diferencias media muestral absoluta se observó que los valores son diferentes a 0, indicando que estos si presentaron diferencias mínimas entre ellos, que en muchas

ocasiones debido al azar pueden considerarse como mínimas. Además, que si se observa en los resultados obtenidos en la Tabla de cuantificación de grietas se nota que cada uno generó un comportamiento diferente en la resistencia mecánica de la hoja de plátano. Apuntando a que el mejor tratamiento es el TPL2 (tratamiento térmico-polimérico por transferencia de calor por convección y con almidón de maíz y yuca)

Tabla 6.1 Método LSD

Comparación	Diferencia media muestral absoluta	Valor LSD	Hipótesis	Diferencia Poblacional	Decisión
TPL1 vs TPL2	0.5	1.6341096	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_A: \mu_1 \neq \mu_2$	$\mu_1 - \mu_2$	No significativa
TPL1 vs TPL3	0.25	1.6341096	$H_0: \mu_1 = \mu_3$ vs $H_A: \mu_1 \neq \mu_3$	$\mu_1 - \mu_3$	No significativa
TPL1 vs TC	2.75	1.6341096	$H_0: \mu_1 = \mu_4$ vs $H_A: \mu_1 \neq \mu_4$	$\mu_1 - \mu_4$	Significativa
TPL2 vs TPL3	0.25	1.6341096	$H_0: \mu_2 = \mu_3$ vs $H_A: \mu_2 \neq \mu_3$	$\mu_2 - \mu_3$	No significativa
TPL2 vs TC	3.25	1.6341096	$H_0: \mu_2 = \mu_4$ vs $H_A: \mu_2 \neq \mu_4$	$\mu_2 - \mu_4$	Significativa
TPL3 vs TC	3	1.6341096	$H_0: \mu_3 = \mu_4$ vs $H_A: \mu_3 \neq \mu_4$	$\mu_3 - \mu_4$	Significativa

El Diagrama de cajas y bigotes (Figura 16.1) permitió identificar que no existen valores atípicos (outliers). Las medianas de los tratamientos representaron el valor central de los datos para TPL1 =1.5, TPL2=1, TPL3=1.5 y TC =4. En la caja, las medianas nos indicaron el grado de dispersión y concentración de datos, pues para el TC los datos se encontraron más dispersos entre 3.5-4; en TPL1 de 1-1.5, TPL2 en 1 y TPL3 en 2 todo esto debido a que no fueron simétricas las cajas respecto a las medianas. Por otro lado, retomando los valores extremos de los bigotes se obtuvo que el número de grietas para TPL1 va desde 1 a 3 grietas, TPL2 de 1 a 2, TPL3 de 1 a 2 y TC de 3 a 7. Gracias a la distribución de datos y valores extremos de bigotes el mejor tratamiento es el TPL2 (mediana-media más chica), seguido por el TPL3 y TPL1; por lo que estos gráficamente difirieron del TC, mostrando impactos positivos en la resistencia mecánica de la hoja de plátano; además se destaca que de estos según el mejor tratamiento (TPL2) su composición se basa en almidón de maíz con yuca.

Figura 16.1 Diagrama de cajas y bigotes

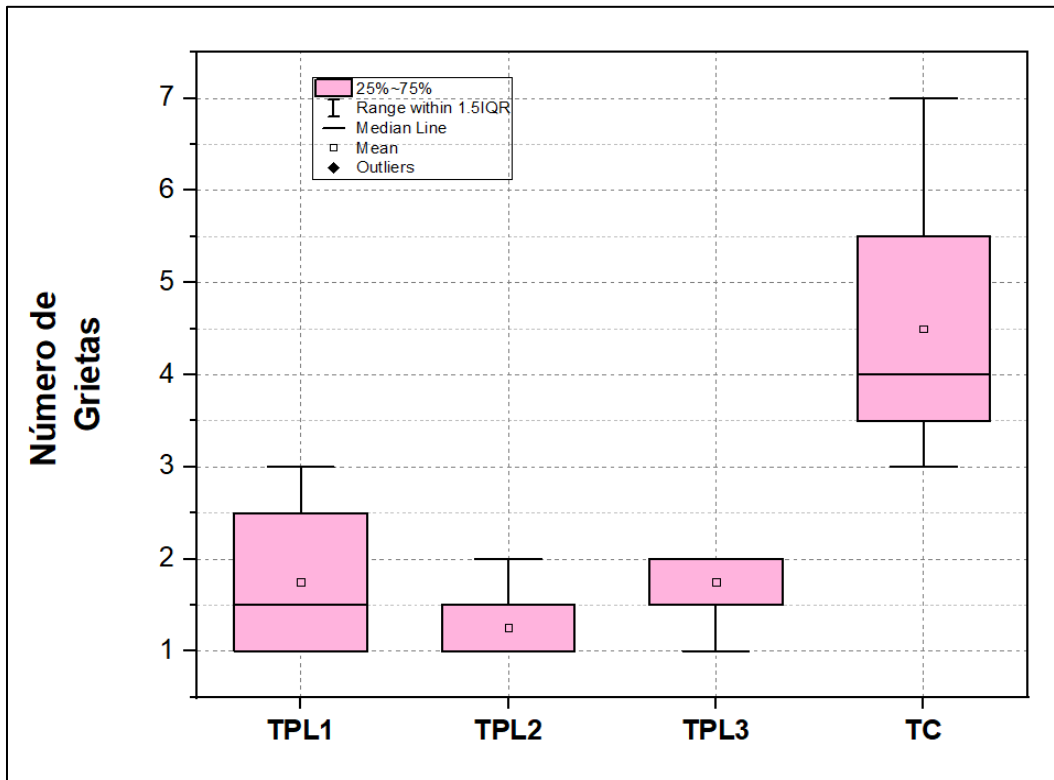


Tabla 7.1 Medias muestrales de los tratamientos.

Tratamiento	TPL1	TPL2	TPL3	TC
Medias muestrales (Número de grietas)	1.75	1.25	1.5	4.5

Tabla 7.2. Residuales

Residuales (e <sub>ij</sub> )			
TPL1	TPL2	TPL3	TC
-0.75	-0.25	-0.5	2.5
0.25	0.75	0.5	-1.5
-0.75	-0.25	0.5	-0.5
1.25	-0.25	-0.5	-0.5

Los resultados de la Prueba de Normalidad (Figura 17.1) determinaron que la aplicación del ANOVA considerando una distribución normal para los datos fue correcta, pues los

datos siguieron un comportamiento de tipo lineal ya que se tomaron en cuenta los valores del rango y posición, pues sufrieron la aplicación de una distribución normal estándar para obtener valores en  $Z_i$  y se consideraron los residuales  $e_{ij}$  (Tabla 7.2) definidos en el grafico como  $r_i$ . Esto se corrobora ya que el  $R^2$  ronda en 0.88, valor común aceptable en estos análisis considerando que debe estar entre (0.85-0.9) para asegurar la precisión del modelo lineal. Por otra parte, se obtuvo un coeficiente de Pearson de 0.9429 indicando una fuerte relación entre las variables que impactan en el comportamiento lineal. Todo lo anterior se traduce que el análisis de varianza (ANOVA) se aplicó correctamente desde el punto de vista de normalidad asegurando buenos resultados para la interpretación del análisis experimental.

Figura 17.1 Prueba de Normalidad

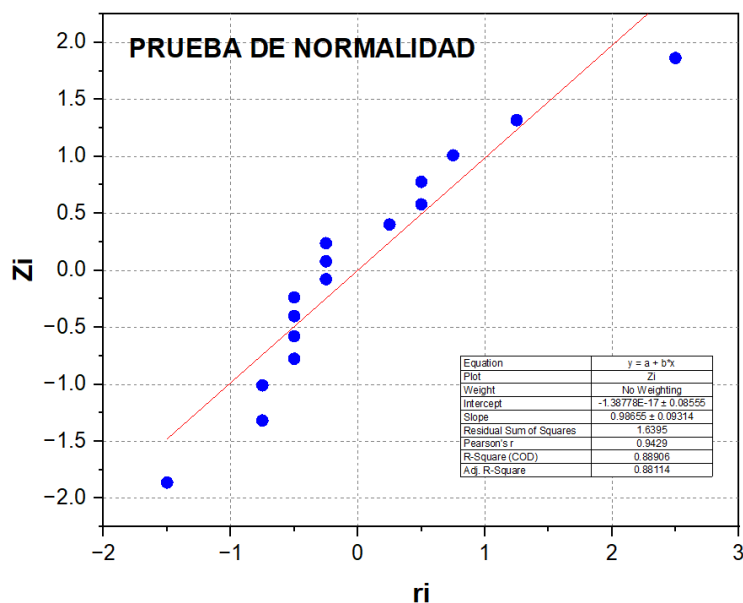


Figura. 17.2 Prueba de Independencia

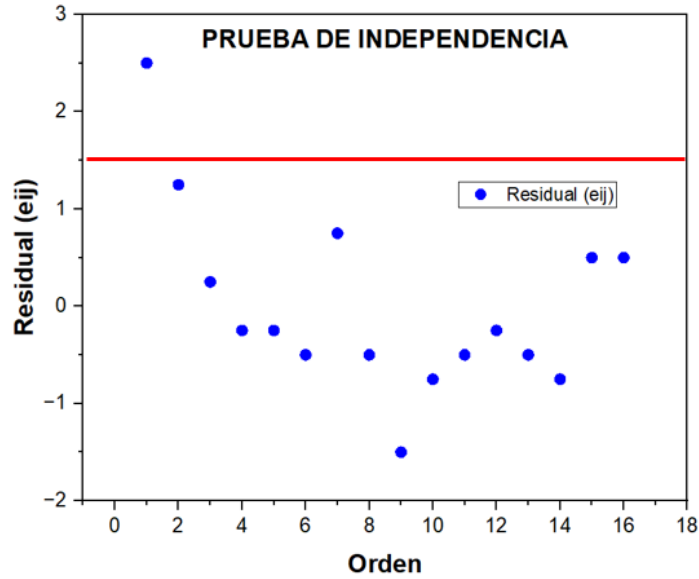
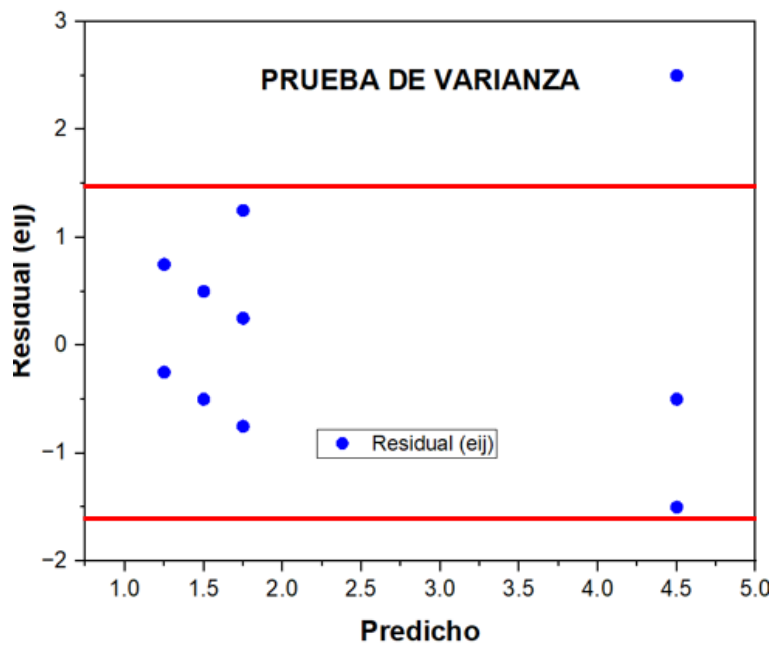


Figura. 17.3 Prueba de Varianza



La Prueba de Independencia (Figura17.2) mostro que la aplicación del principio de aleatorización fue efectiva, pues no existió una correlación entre los valores ya que los datos siguieron una distribución aleatoria bajo la línea roja divisoria. Esta prueba implico la consideración del orden del experimento y residuales

---

---

Por otra parte, la prueba de Varianza (Figura 17.3) que uso los residuales y predichos (medias) (Tabla 7.1) siguió un comportamiento aleatorio con datos que no siguen comportamientos marcados.

En resumen, la verificación de supuestos aseguró que los resultados del ANOVA fueron adecuados y que los tratamientos TPL1, TPL2, TPL3 variaron la resistencia mecánica de la hoja de plátano favoreciéndola positivamente a comparación que el control TC.

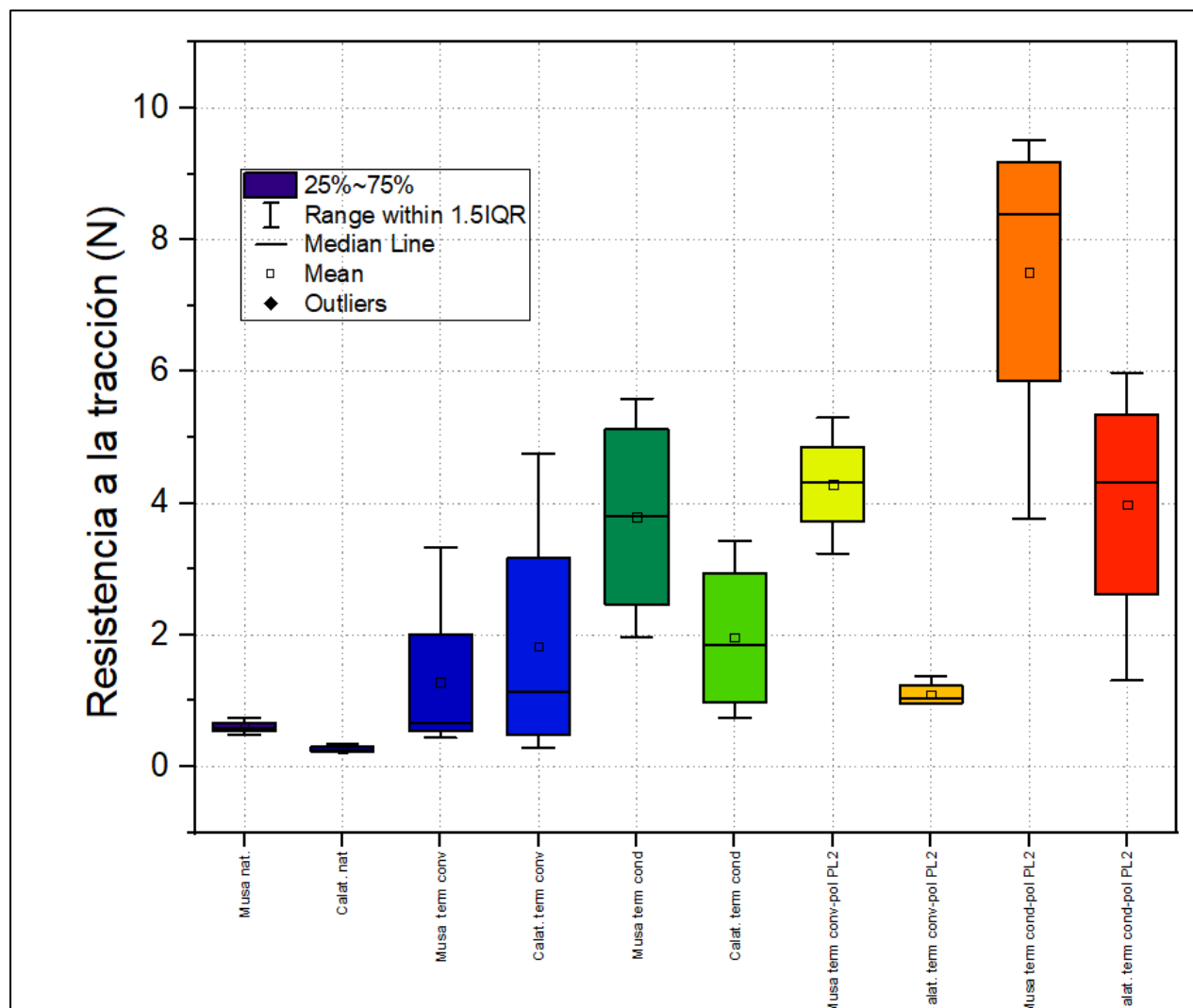
### **3.5 Caracterización de la Resistencia mecánica de la hoja de plátano y platanillo por máquina universal**

Los resultados de la caracterización de la resistencia mecánica de la hoja de plátano y platanillo ante diferentes condiciones y tratamientos según lo descrito en la Etapa 6 y sometidos a pruebas de tracción por maquina universal se muestran en la Tabla 8.1 y Figura 18.0. La aplicación del TPL2 seleccionado como el tratamiento con el mejor polímero a base de almidón de maíz y yuca que aportó mayor resistencia en la especie hoja de plátano (*musa paradisiaca*) tuvo un valor máximo a la tracción de 4.29 N donde fue aproximadamente el cuádruple de resistente que la *Calathea Lutea* (platanillo) a estas condiciones. La *musa paradisiaca* presentó mayor resistencia cuando esta estaba en estado natural y tratada térmicamente por conducción (asado); mientras que la *Calathea Lutea* supero a la especie anterior en resistencia bajo tratamientos térmicos por convección. Por otra parte, al haber utilizado el mejor almidón que es constituyente del polímero y trabajar un nuevo tratamiento térmico-polimérico con PL2 y conducción se observó que la *musa paradisiaca* presento alta resistencia (7.5118 N) aproximadamente dos veces mayor que la hoja de platanillo a esas condiciones. El tratamiento térmico por conducción (asado) junto con el polimérico PL2 registró mayor resistencia en la *musa paradisiaca* que el TPL2 (transferencia por convección en medio acuoso junto con polimérico PL2). Por lo que de este estudio de las resistencias mediante maquina universal se concluyó que la hoja de plátano es la mejor especie para tratar y tuvo mayor resistencia a la tracción con un tratamiento térmico-polimérico basado por transferencia de calor directa o conducción (asado) a 245°C y con el recubrimiento de un polímero PL2.

Tabla 8.1 Pruebas de Resistencia mecánica debidas a la tracción por Máquina Universal.

Muestra	Medidas de Resistencia a Tracción (Newtons)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Media
Musa Paradisiaca en estado natural	0.73549875	0.4903325	0.588399	0.588399	0.60065731
Calathea Lutea en estado natural	0.34323275	0.26477955	0.22064963	0.2353596	0.26600538
Musa Paradisiaca con tratamiento térmico por convección (en medio acuoso)	3.334261	0.63743225	0.6864655	0.44129925	1.2748645
Calathea Lutea con tratamiento térmico por convección (en medio acuoso)	0.2941995	0.6864655	4.75622525	1.569064	1.82648856
Musa Paradisiaca con tratamiento térmico por conducción (asado)	1.96133	2.941995	4.65815875	5.5897905	3.78781856
Calathea Lutea con tratamiento térmico por conducción (asado)	2.4516625	1.22583125	0.73549875	3.4323275	1.96133
Musa Paradisiaca con tratamiento térmico convección-polimérico TPL2	4.2168595	5.295591	3.2361945	4.4129925	4.29040
Calathea Lutea con tratamiento térmico convección-polimérico TPL2	1.0787315	0.95124505	0.980665	1.372931	1.09589314
Musa Paradisiaca con tratamiento térmico (asado)-polimérico por PL2	3.7657536	9.5124505	8.825985	7.9433865	7.5118939
Calathea Lutea con tratamiento térmico (asado)-polimérico por PL2	4.707192	1.30428445	5.9820565	3.92266	3.97904824

Figura 18.0 Diagrama de cajas y bigotes de Resistencia a la tracción por máquina Universal



### 3.6 FTIR almidón de maíz y yuca

Mediante la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier se realizó la caracterización (Figura 18.1) de los almidones de maíz y yuca en la Etapa 6, que fueron componentes del polímero PL2.

Se observó que en el espectro aparecieron bandas de absorción en un valor de  $3304 - 3311 \text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento del  $-OH$  características de un almidón ( $3300-$

---

---

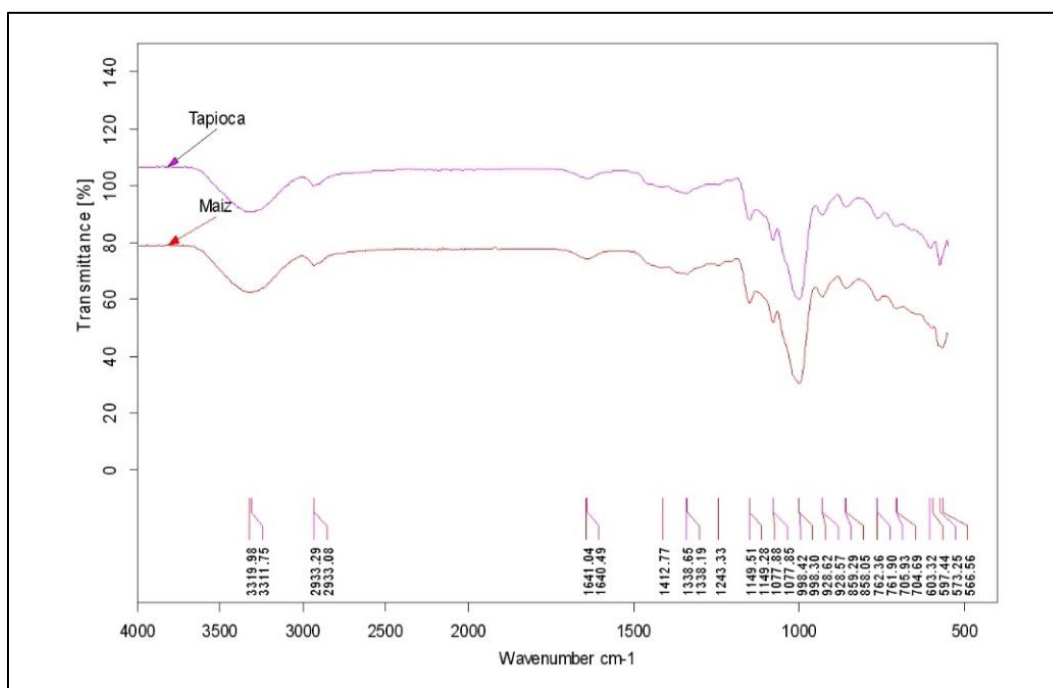
3400  $\text{cm}^{-1}$ ). Así como tensiones del C-H se presentaron a 2928 - 2933  $\text{cm}^{-1}$ , pues comúnmente en los almidones rondan a 2900  $\text{cm}^{-1}$  que conforman las estructuras de los carbohidratos presentes en las muestras (anillos de glucosa); en 1639-1640  $\text{cm}^{-1}$  grupo C=O, bandas a 1077-998  $\text{cm}^{-1}$  de tensiones C-O-C y a 998- 928  $\text{cm}^{-1}$  flexiones del COH para ácidos carboxílicos; región característica de los almidones (1000-1200  $\text{cm}^{-1}$ ) correspondiente a los enlaces C-O-C y C-OH en los anillos de glucosa. Hubo picos entre 1400  $\text{cm}^{-1}$  y 1500  $\text{cm}^{-1}$  que suelen asociarse con vibraciones de enlaces C-H de los grupos metilo (-CH<sub>3</sub>) y metileno (-CH<sub>2</sub>-).

Se mostraron perfiles similares en ambos almidones, lo que sugiere que comparten algunos grupos funcionales, pero con diferencias en la intensidad y posición de los picos que pueden indicar diferentes cantidades de ciertos componentes.

Entre 1000 y 1200  $\text{cm}^{-1}$ , las diferencias entre las curvas fueron más notables. Esto podría reflejar diferencias en la conformación de los polisacáridos (almidón de maíz vs. almidón de tapioca) o en la composición (proporción de amilosa y amilopectina). La Yuca (Tapioca) exhibió mayor Transmitancia y se justificó porque contiene mayor proporción en amilopectina que posee una estructura más abierta y ramificada que permito una mayor interacción con los grupos hidroxilo (-OH) y menor absorción global en ciertas longitudes de onda (mayor transmitancia). Por otra parte, el maíz exhibió menor transmitancia, lo que sugiere una mayor absorción de la radiación infrarroja relacionado con una mayor proporción de amilosa que tiene una estructura más compacta y lineal, lo que podría contribuir a una absorción más intensa en ciertas regiones del espectro donde tiende a formar hélices con interacciones más fuertes con la radiación infrarroja.

En resumen, se concluyó que se obtuvieron y trabajaron realmente con almidones.

Figura 18.1 FTIR almidones de maíz y yuca (tapioca)



### 3.7 Variación de temperaturas del tratamiento térmico y su efecto en la resistencia mecánica evaluados por máquina universal

La variación de temperaturas propuesta en la Etapa 7 para el tratamiento térmico directo (conducción) por asado se dio en rangos de 105°C-285°C, con niveles de plancha 5, 22.5 y 45; y con tiempos de asado 10, 40, 60 y >60 segundos (hasta el cambio total de color de la hoja pasando de verde a marrón oscuro) los cuales fueron aplicados a muestras sometidas a tracción. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.1 Los valores de tensión máxima para todos los niveles de la plancha que presentaron mejores resultados fueron a tiempos de 40 segundos con temperaturas superficiales de tipo lineal de 118.9±1°C (4.2168 N), 161.40±1°C (3.9226 N) y 244.4±1°C (5.1975 N) el rango de temperaturas para el nivel 5 abarco desde 108-120°C, para el 22.5 para el 153-163°C y para el 45 de 197-250°C en términos superficiales lineales de la plancha.

Respecto a los tiempos a mayor medida que son >60s presentaron bajos niveles de resistencia en la superficie de la hoja de plátano. Los cambios de color debidos a la deshidratación, remoción de clorofila, ceras y componentes estructurales relacionados

con la celulosa ocurrieron a 600 s a  $120.9 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $153.4 \pm 1^\circ\text{C}$  a 420 s y  $249.5 \pm 1^\circ\text{C}$  a 235 s donde otorgaron propiedades mecánicas pobres a la hoja de plátano (*musa paradisiaca*); es decir a medida que aumentó la temperatura con exposición prolongada a tratamientos térmicos y tiempos mayores de 60s la hoja presentó problemas en su resistencia (estructura más débil). De igual manera se observó un cambio de color respecto a la exposición a la temperatura con tiempos definidos, pues a mayor temperatura y tiempo la hoja sufrió cambios en su tonalidad (de verde a marrón) como se muestra en la Figura 19.1

Tabla 9.1 Variación de Temperaturas para tratamiento térmico por transferencia de calor directa (asado)

Nivel de Plancha	Grupo (Muestras)	Temperatura lineal superficial media $\pm 1$ ( $^\circ\text{C}$ )	Temperatura puntual superficial media $\pm 1$ ( $^\circ\text{C}$ )	Tiempo (segundos)	Tensión máxima media(N)
5	1	108.50	114.40	10	1.8632635
	2	118.90	114.70	40	4.2168595
	3	119.10	121.60	60	2.6477955
	4	120.90	117.40	600	0.196133
22.5	5	163.50	167.00	10	3.4323275
	6	161.40	169.90	40	3.92266
	7	161.90	171.60	60	2.941995
	8	153.40	161.40	420	0.4903325
45	9	197.50	189.30	10	1.32389775
	10	244.40	247.00	40	5.1975245
	11	247.80	250.20	60	3.530394
	12	249.50	237.00	235	2.0593965

Figura 19.1 Cambio de color de la *musa paradisiaca* debido a la aplicación de tratamientos térmicos directos (asado)



### 3.8 Identificación de variaciones superficiales en la hoja mediante SEM

De acuerdo con la Figura 20.1 correspondiente a los SEM realizados para la hoja de plátano (*musa paradisiaca*), se obtuvo una imagen para la especie en estado natural que mostró las nervaduras principales de la misma dadas por las líneas en la micrografía con arreglo fibroso, mientras que para el caso de las líneas horizontales o entrelazadas mostraron el arreglo de red (tejido) que proporciona la flexibilidad y resistencia, así como el soporte de presión celular interna y expansión. Todas estas relacionadas con la conformación de la pared celular. Las partículas dispersas con tonalidad brillante pudieron ser contaminantes o minerales sobre su superficie como el oxalato de calcio (protector), sales de sílice (fitolitos) o carbonato de calcio (neutralizador); así como depósitos tipo nutrientes (fósforo, potasio o magnesio) debidos a la presencia de cristales o sales provenientes de la absorción por sus raíces del suelo, agua o bien debidos a procesos metabólicos.

La textura suave fue característica de la cutina (capa cerosa) presente en la cutícula que conforma la epidermis vegetal, así como de la retención de humedad en esta zona gracias a las condiciones de bajo vacío.

Por otra parte, para las hojas tratadas exclusivamente por tratamientos térmicos se notó una variación significativa en la estructura, así mismo la apariencia lisa disminuyó debido

---

---

a que por estos tratamientos ocurrió una remoción de agua de la epidermis de la muestra. La hoja tratada por convección tuvo una reorganización estructural de la disposición fibrosa de la celulosa con una contracción y presencia de arreglo ondulado regular que aportó mayor resistencia a la pared celular primaria, con mayor flexibilidad y soporte estructural de las células, respecto al arreglo natural. Por otro lado, la hoja tratada por asado (tratamiento térmico directo) mostró una disposición del arreglo de la celulosa regular con contracción de nervaduras en forma paralela y con pequeños entrelaces, esto fue indicativo de incremento de resistencia y rigidez de esta, especialmente este tipo de arreglos favoreció las interacciones con otros polisacáridos que influyen en la plasticidad y flexibilidad de la pared celular (*Held et al., 2015*).

El uso de un tratamiento térmico-polimérico notoriamente influyó en la apariencia de la hoja. La estructura primaria (nervaduras) se cubrió con la capa de polímero (PL2) posterior a los tratamientos térmicos, texturalmente el TPL2 mostró una superficie más lisa que el tratamiento directo con PL2, además que se observaron partículas dispersas correspondientes a gránulos de almidón no gelatinizado, los diferentes contrastes de la imagen ocurrieron gracias a la presencia del plastificante (glicerol). Dichos recubrimientos con características de homogeneidad aportaron flexibilidad y resistencia a la hoja, así como una barrera protectora. Se mostró buena adherencia superficial para ambos casos, sin embargo, para la imagen más rugosa correspondiente al tratamiento por transferencia directa y por PL2 indicó buenas propiedades de adhesión y de interacción con el material. La hoja de platanillo (*Calathea Lutea*) según la Figura 20.2 exhibió para ambos casos de tratamiento térmico polimérico una estructura de la película irregular, en la primera se observó presencia de grietas, mientras que en ambas hubo características ásperas indicativo de mala cohesión del polímero y fragilidad de la película, la cual afectó en las propiedades mecánicas de la hoja.

En resumen, gracias a las pruebas de la Etapa 8 por SEM se obtuvo que la mejor estructura debida a tratamientos térmico-poliméricos se obtuvo para la *musa paradisiaca* especialmente para aquella tratada primeramente por transferencia de calor directa seguida por el tratamiento polimérico con PL2.

Figura 20.1 SEM Hoja de plátano (*Musa paradisiaca*)

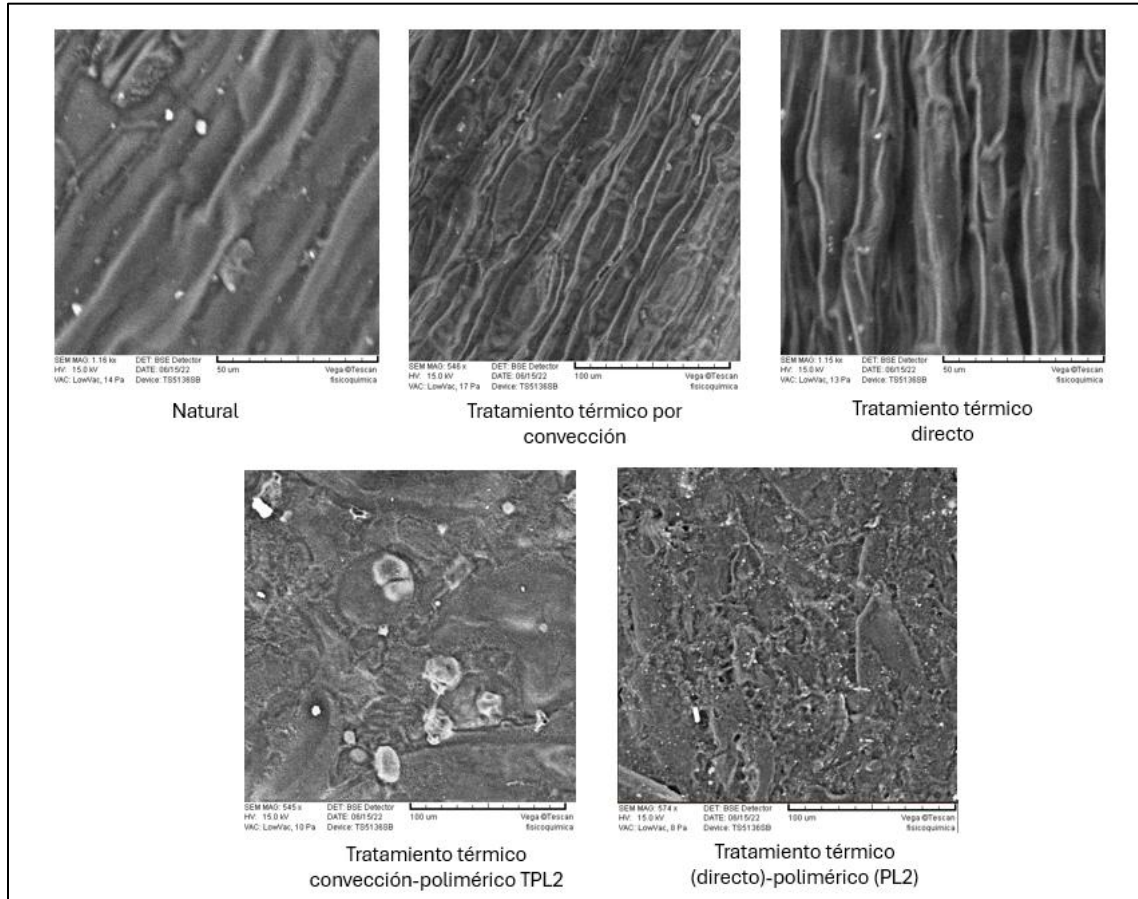
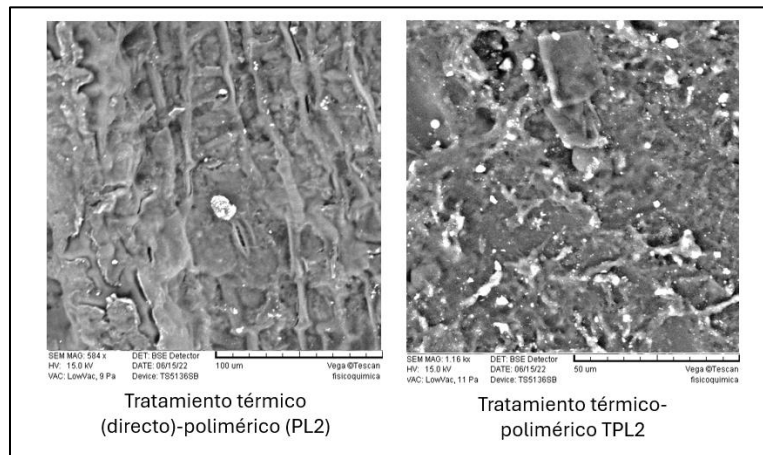


Figura 20.2 SEM Hoja de platanillo (*Calathea Lutea*)



---

---

### 3.9 Caracterización de la hoja de plátano por aparato Stress-Strain

De acuerdo con la Etapa 9 se realizó una caracterización para la obtención de las curvas de tensión-deformación. Para todas las caracterizaciones se encontró un comportamiento de tipo viscoelástico para la hoja de plátano, el cual según la literatura es notorio para materiales de tipo biológico que en su estructura contengan tejidos y células (*Wu et al., 2022*). Se justifica también debido a que en la red hay contenido de polisacáridos y de polímeros.

El comportamiento fue elástico-viscoso con propiedades típicas de sólidos al deformarse instantáneamente y regresar a su forma original, así como de líquidos con una deformación que dependió de la carga y tiempo aplicado comprobables en las curvas que siguieron una combinación de tipo lineales y no lineal al aplicar la carga debida a la deformación instantánea y dependiente del tiempo. El esfuerzo no aumento de manera constante en relación con la deformación en toda la curva, lo que indico que el material tiene una respuesta dependiente del tiempo; además en la parte final de la curva se vio una caída abrupta alcanzando su límite máximo y ocasionando ruptura corroborando el comportamiento descrito con la teoría de Lakes, 2009.

El cálculo aproximado del módulo de Young se obtuvo mediante regresión lineal de las curvas en zonas donde se siguió un comportamiento lineal (que obedece a la ley de Hooke) de las curvas Stress-Strain para el material viscoelástico biológico con tejidos el cual es válido según Sánchez et al., 2005.

Las Figuras 20.1, 20.2 y 20.3 muestra las curvas que se obtuvieron para las muestras tratadas térmicamente por calentamiento directo con una plancha a las 3 mejores temperaturas que se registraron en la caracterización por máquina universal; es decir a 118°C, 160°C y 245°C. La Tabla 10.1 resume los resultados obtenidos de estos ensayos. Se encontró que la mejor temperatura que proporciona mejor resistencia a la hoja de plátano es a 160°C exhibiendo un módulo de Young promedio de 0.145 MPa característico de un material flexible (<0.01GPa según Callister & Rethwisch, 2020), con un Stress máximo promedio de  $5.75 \times 10^5$  Pa (0.575 MPa) y un Strain máximo promedio de 23.894. Determinando que la hoja tratada bajo estas condiciones fue la que tuvo mayor

capacidad respecto a las demás para resistir fuerzas y deformaciones antes de fallar. Con módulo 0.15 veces mayor que a 245°C y 2 veces mayor que a 118°C.

Figura 21.1 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 118°C y obtención de Modulo de Young

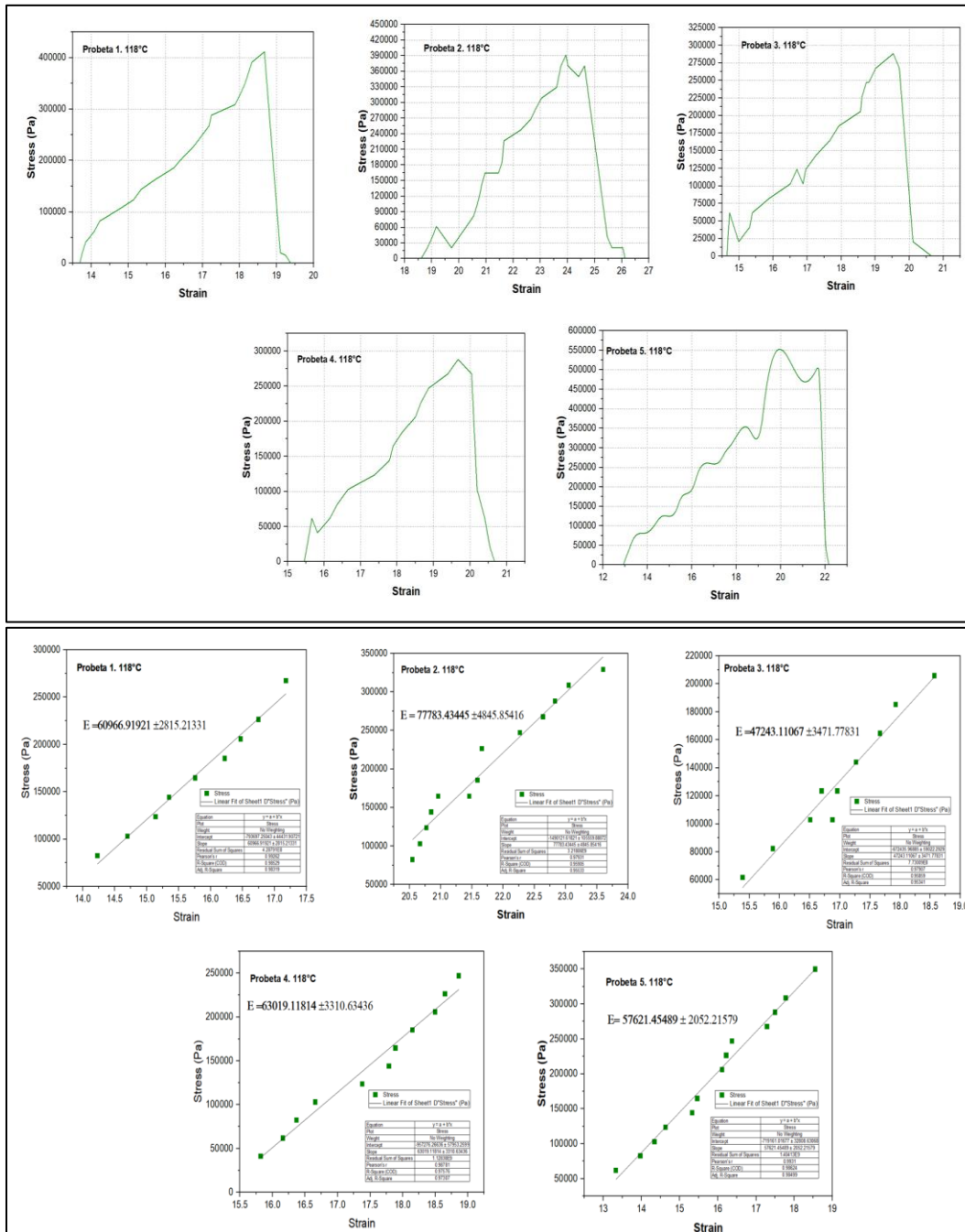


Figura 21.2 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 160°C y obtención de Modulo de Young

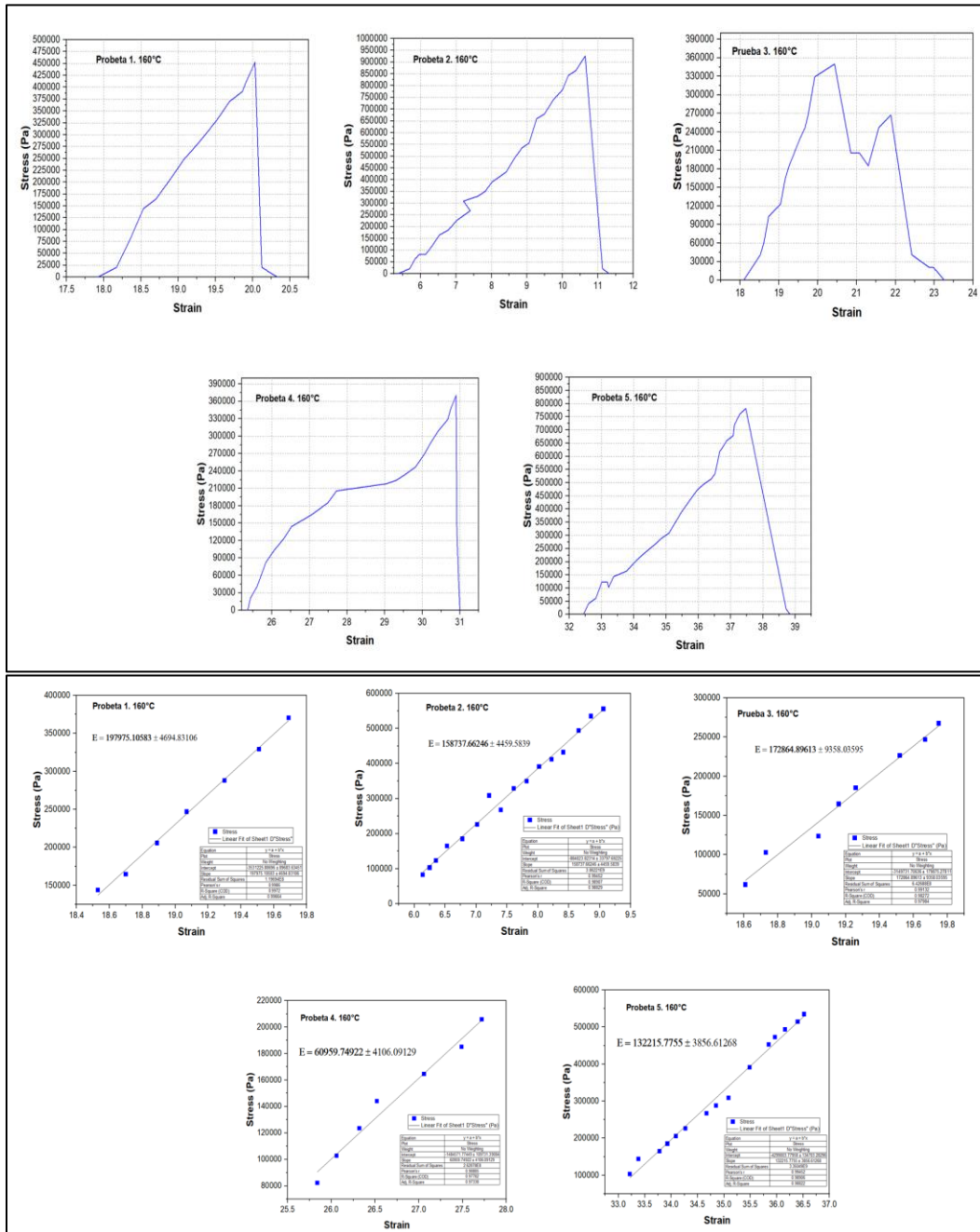


Figura. 21.3 Curvas de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo a 245°C y obtención de Modulo de Young

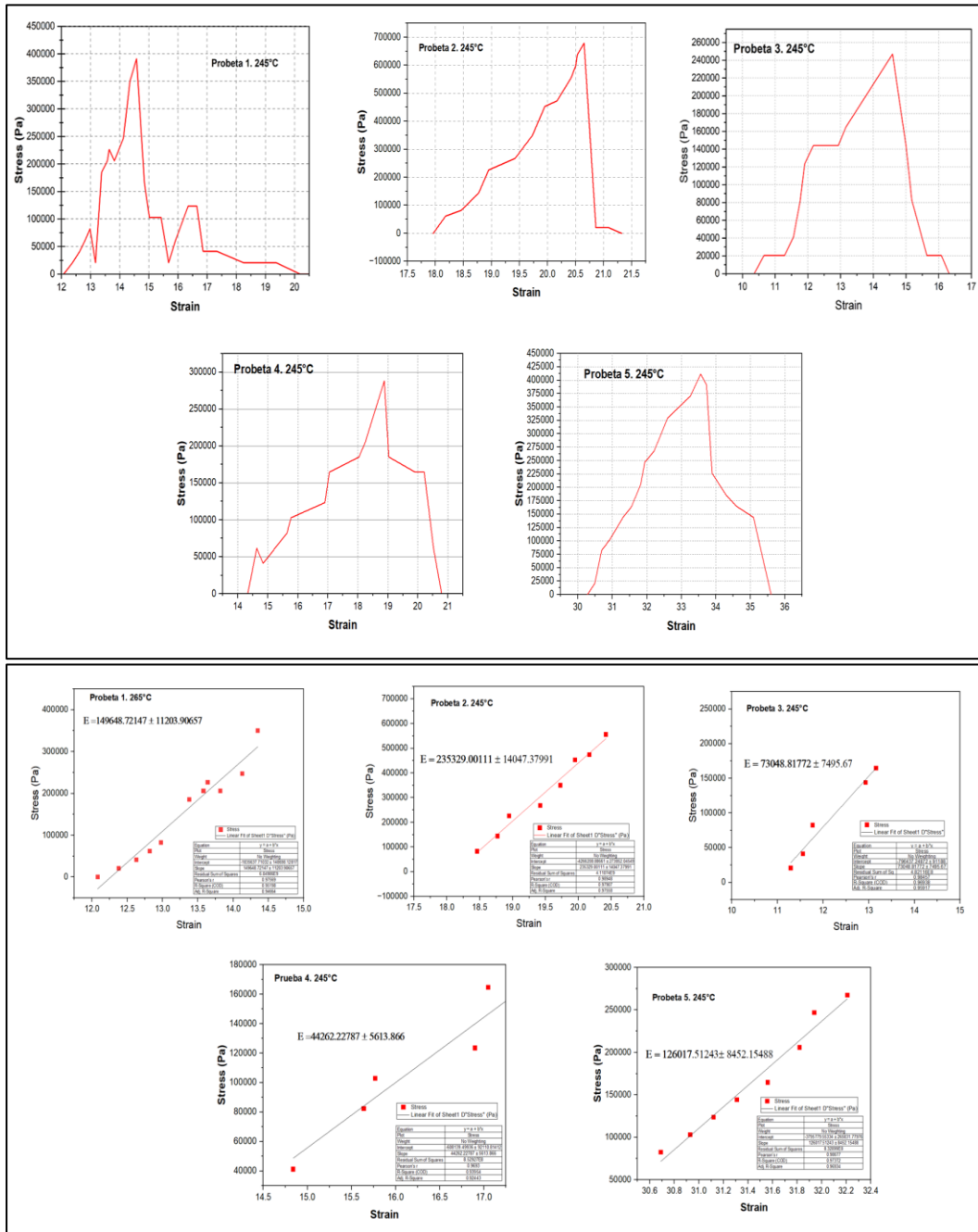
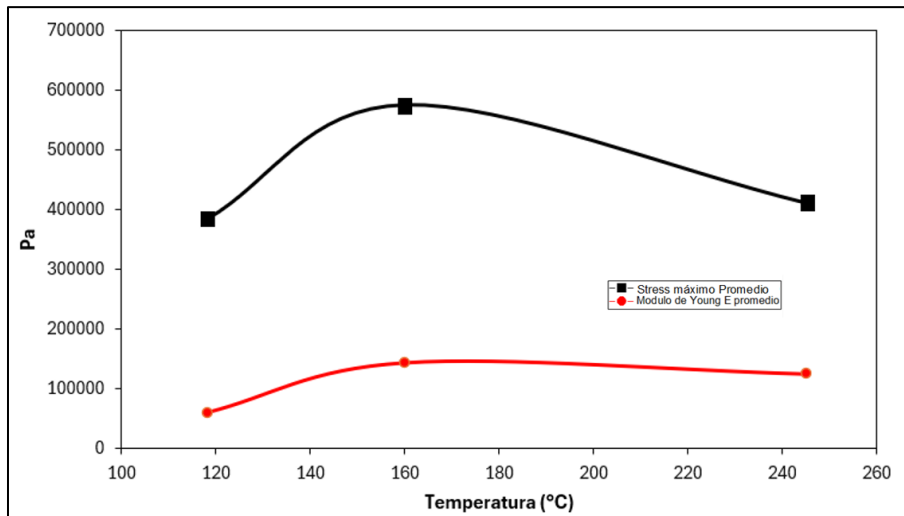


Tabla 10.1 Resultados de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico directo y Modulo de Young

Muestra	Probeta	Stress máximo (Pa)	Strain máximo (mm/mm)	Módulo de Young E (Pa)	±	Media Stress máximo (Pa)	Media Strain máximo (mm/mm)	Media del Módulo de Young E (Pa)
Musa paradisiaca. Tratamiento térmico directo a 118°C	1	4.11E+05	18.67	60966.91921	2815.21331	3.85E+05	20.322	6.13E+04
	2	3.90E+05	23.94	77783.43445	4845.85416			
	3	2.88E+05	19.53	47243.11067	3471.77831			
	4	2.88E+05	19.67	63019.11814	3310.63436			
	5	5.50E+05	19.8	57621.45489	2052.21579			
Musa paradisiaca. Tratamiento térmico directo a 160°C	1	4.52E+05	20.03	197975.1058	4694.83106	5.75E+05	23.894	1.45E+05
	2	9.25E+05	10.64	158737.6625	4459.5839			
	3	3.49E+05	20.43	172864.8961	9358.03595			
	4	3.70E+05	30.9	60959.74922	4106.09129			
	5	7.81E+05	37.47	132215.7755	3856.61268			
Musa paradisiaca. Tratamiento térmico directo a 245°C	1	4.00E+05	14.50	149648.7215	11203.9066	4.12E+05	20.43	1.26E+05
	2	7.20E+05	20.65	235329.0011	14047.3799			
	3	2.42E+05	14.58	73048.81772	7495.67			
	4	2.88E+05	18.88	44262.22787	5613.866			
	5	4.11E+05	33.56	126017.5124	8452.15488			

Figura 22.1 Comportamiento de la Temperatura respecto a la tensión máxima y el módulo de elasticidad.



En la Figura 22.1 se resume el comportamiento de la Temperatura de los tratamientos térmicos respecto al Stress máximo promedio y Modulo de Young promedio donde

---

---

notoriamente 160°C es la temperatura que mostró mejores resultados en las propiedades mecánicas de la hoja.

Por otro lado, basados los resultados del Stress-Strain para los tratamientos térmicos se trató nuevamente a la hoja de plátano a 160°C por transferencia de calor directa (asado) y se recubrió con el polímero PL2. Se obtuvieron probetas que fueron estudiadas mediante tensión-deformación donde se registraron las curvas características nuevamente de un material viscoelástico según la Figura 23.1 y se obtuvieron las tensiones máximas y módulos de Young presentados en la Tabla 11.1 con un módulo de Young medio para la hoja de plátano con tratamiento térmico-polimérico de 0.309 MPa entrando en la categoría de material flexible y con valores de Stress máximo promedio de  $8.44 \times 10^5$  Pa con un Strain máximo promedio de 13.38 que al comparar los resultados con los de los tratamientos térmicos se observa que se mejora completamente la resistencia mecánica de la hoja ya que respecto a la hoja únicamente tratada por tratamiento térmico directo a 160°C por un minuto, su módulo de elasticidad mejora en aproximadamente 2.14 veces y su Stress máximo en 1.47 veces. Además, que el valor de la carga máxima que presentó este tratamiento térmico-polimérico fue de 1.1330 N que comparada con la de una hoja de *musa paradisiaca* sin tratar o en estado natural con valor de 0.6 N (registrado por máquina universal) aumentó en 1.88 veces su resistencia a la tracción.

Los valores del módulo de Young que exhibe el material (hoja con tratamiento térmico polimérico) se asemejan a los reportados en la literatura por Wu et al., 2020 para una tela no tejida sintética con valores de entre 0.1-0.52 MPa, es decir se obtuvo una propuesta de material que se asemeja a una *non-woven fabric*, recordando que estas no tienen parámetros mecánicos completamente definidos ya que dependen de la naturaleza del material mientras este tipo de tela contenga fibras unidas por tratamientos térmicos, químicos o mecánicos con características flexibles y ligeras. De igual manera el módulo no se aleja de valores para telas no tejidas usadas en embalaje como lo son las telas PP Spound (hechas de polipropileno) y las needlepunched compuestas de fibras de viscosa, poliéster y polipropileno con valores de 0.8-1.5 MPa (Rawal et al., 2010)

Figura 23.1 Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico-polimérico (directo y por PL4) y cálculo del Módulo de Young

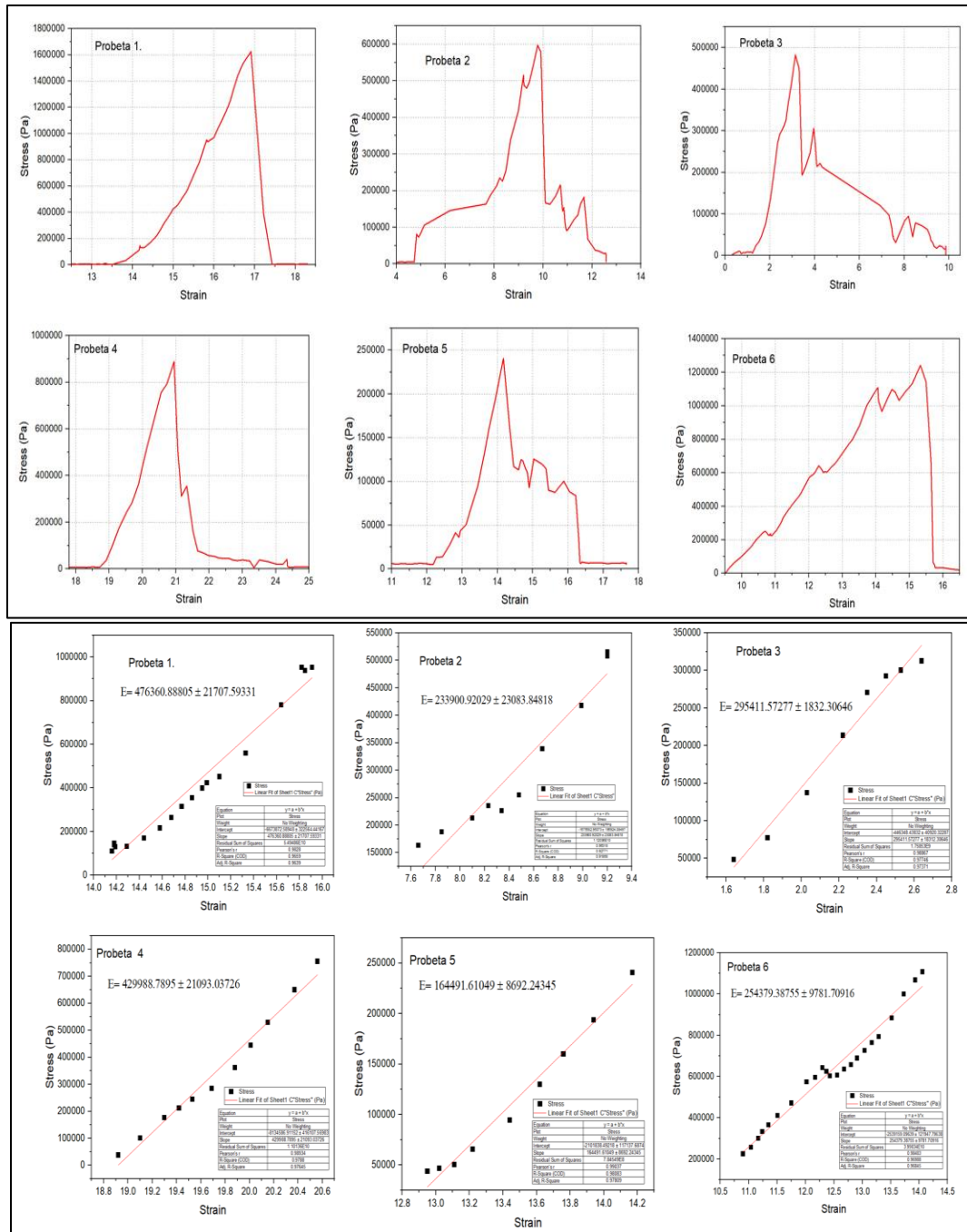


Tabla 11.1 Resultados de Stress-Strain para hojas con tratamiento térmico-polimérico (directo y por PL2) y Módulo de Young

Muestra	Probeta	Stress máximo (Pa)	Strain máximo (mm/mm)	Módulo de Young E (Pa)	±	Media Stress máximo (Pa)	Media Strain máximo (mm/mm)	Media del Módulo de Young E (Pa)
<b>Musa paradisiaca.</b> Tratamiento térmico-polimérico de tipo directo a 160°C y con PL2	1	1.62E+06	16.91	476360.8881	21707.5933	8.44E+05	13.38	3.09E+05
	2	5.96E+05	9.78	233900.9203	23083.8482			
	3	4.82E+05	3.14	295411.5728	1832.30646			
	4	8.88E+05	20.95	429988.7895	21093.0373			
	5	2.40E+05	14.17	164491.6105	8692.24345			
	6	1.24E+06	15.33	254379.3876	9781.70916			

Los diagramas de cajas y bigotes para el Stress máximo (Figura 24.1) y Módulo de Young (Figura 24.2) exhibieron que el Tratamiento térmico-polimérico influye en las propiedades mecánicas de la hoja de plátano, pues mostró mayor resistencia. Además, que se concluyó que el material obtenido entra en la clasificación de un material flexible.

Los tratamientos térmicos directos a 118°C y 245°C exhibieron los valores más bajos de tensión concentrando datos entre valores de 0.3-0.6 MPa. Mientras que el de tipo térmico-polimérico fue el que concentro los datos en un rango más amplio entre 0.9-1.5 MPa considerándose como el más efectivo igual se comprobó esto mediante la comparativa de medias del conjunto de datos. La mediana como valor central permitió obtener una mejor conclusión ya que no contemplo los valores atípicos y permitió la observación del comportamiento de los datos que nos otorgaron información de la resistencia confirmando que el ultimo tratamiento por tratamiento térmico-polimérico es el mejor.

Para el módulo de Young se observó que a 118°C la media y mediana tuvieron los valores más bajos considerando este tratamiento como ineficaz igual mostro algunos valores atípicos, mientras que por el contrario fue el más eficaz ya que tuvo la mayor rigidez de todos es el de tipo térmico-polimérico donde la mayoría de los datos se concentran entre 25% a 75% en las cajas con rangos de entre 0.2-0.4 MPa con distribución simétrica por media y mediana cercanas.

Figura. 24.1 Diagrama de cajas y bigotes para el Stress máximo (Pa)

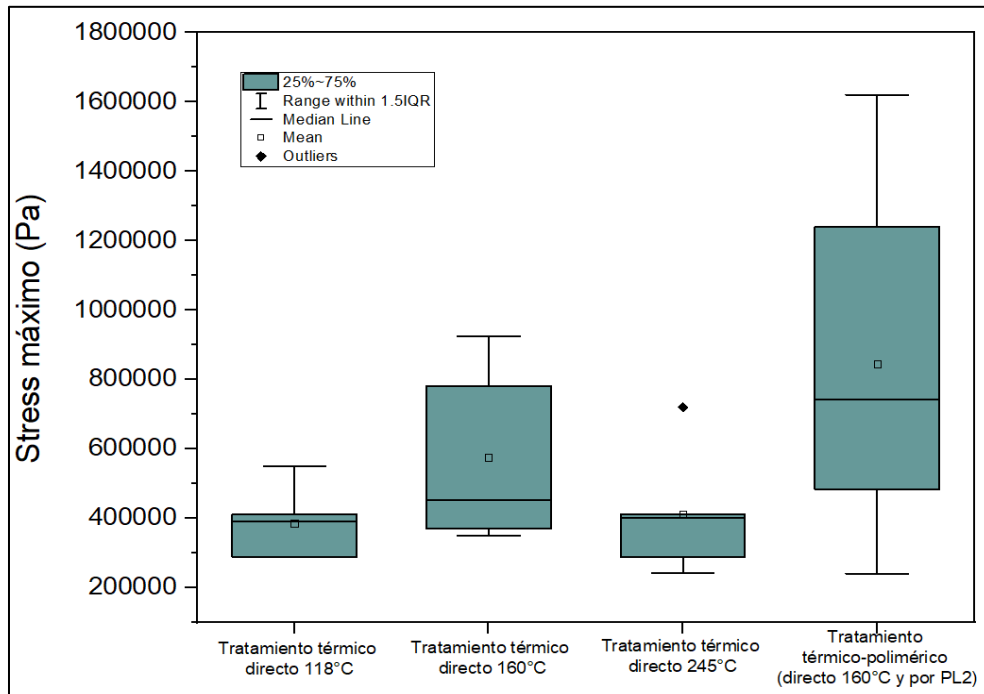
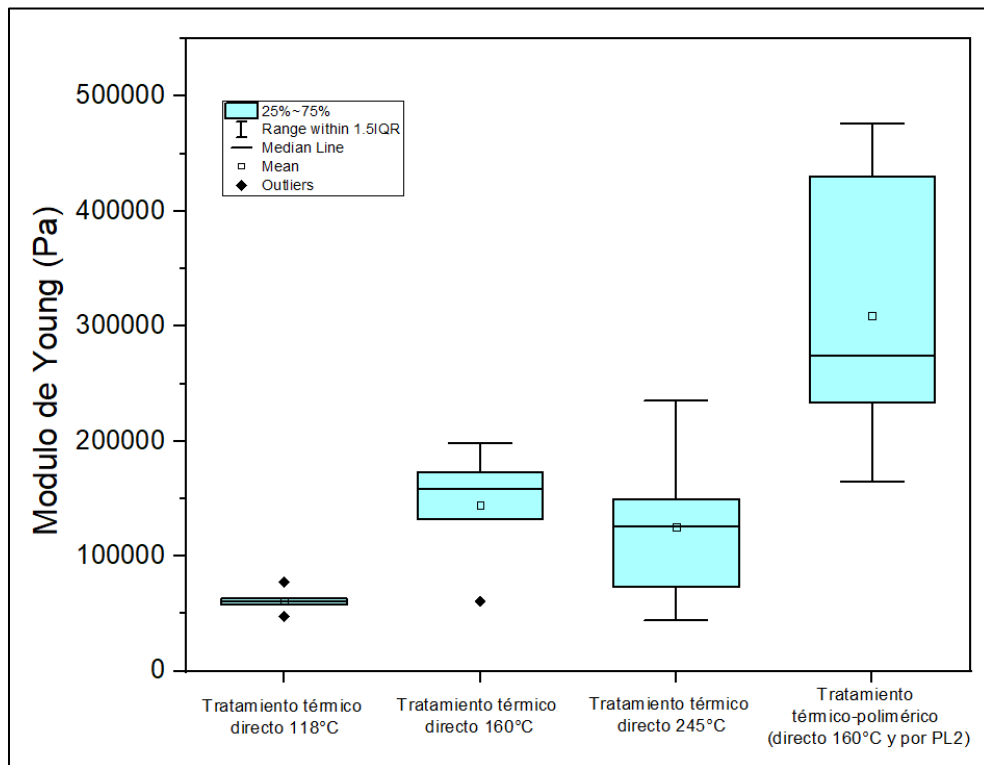


Figura. 24.2 Diagrama de cajas y bigotes para el Stress máximo (Pa)



---

### 3.10 Obtención de la propuesta de tela no tejida hecha de hoja de plátano por tratamiento térmico-polimérico

Con los resultados del estudio obtenidos se logró tratar térmica y poliméricamente la hoja de plátano primeramente por asado a 160°C por un minuto para posteriormente ser tratada por un polímero PL2 a base de almidón de maíz-yuca. El resultado se muestra en la Figura 25.1 donde también se realizaron propuestas de embalaje con la hoja tratada que asemeja a una tela no tejida que exhibió tiempo de vida mayor a 3 meses.

Figura 25.1 Hoja de plátano con tratamiento térmico-polimérico como propuesta de tela no tejida para embalaje.



---

---

# Conclusiones

- El mejor tratamiento polimérico fue el PL2 compuesto por almidón de maíz y yuca obtenido por la metodología de extracción propuesta. La hoja de plátano tratada mediante este polímero presentó menor número de grietas en las pruebas de elongación.

Así mismo se exhibió que los tratamientos tuvieron efecto en las propiedades mecánicas respecto a la hoja de plátano en estado natural mediante la aceptación de hipótesis alternas.

- Gracias a las pruebas de tracción mediante maquina universal se identificó que la hoja de plátano (*musa paradisiaca*) es la mejor especie para tratar y que el mejor tratamiento térmico que apporto mayor resistencia a la tracción fue a base de transferencia directa por asado que aquel hecho por convección en medio acuoso; si este se complementa con un tratamiento polimérico PL2 la resistencia incrementa.
- La temperatura y tiempo de aplicación del tratamiento térmico directo (asado) sobre la hoja de plátano influyo en las propiedades mecánicas y apariencia de la hoja de plátano (coloración) con cambios de tonalidad de verde a marrón, pues a medida que aumentó la temperatura con exposición prolongada y tiempos mayores de 60s se presentaron problemas en su resistencia (estructura más débil).
- Estructural y superficialmente gracias a la técnica SEM se observó que la hoja de plátano presenta cambios al ser sometida a tratamientos térmico-poliméricos y que PL2 presentó buena adherencia a su superficie.
- La temperatura óptima para tratar térmicamente por transferencia directa o asado fue a 160°C por 60 segundos con un módulo de Young promedio de 0.145 MPa, un Stress máximo promedio de  $5.75 \times 10^5$  Pa (0.575 MPa) y un Strain máximo promedio de 23.894.
- La hoja de plátano bajo un tratamiento térmico-polimérico a 160°C con PL2 presentó un módulo de Young medio de 0.309 MPa entrando en la categoría de

---

---

material flexible con valores de Stress máximo promedio de  $8.44 \times 10^5$  Pa y un Strain máximo promedio de 13.38 con una mejora en la resistencia mecánica de la hoja respecto a la hoja únicamente tratada por tratamiento térmico directo a  $160^\circ\text{C}$  así mismo el módulo de elasticidad mejoró en aproximadamente 2.14 veces y su Stress máximo en 1.47 veces.

Esta hoja tuvo una carga máxima de 1.1330 N que comparada con la de una hoja de *musa paradisiaca* sin tratar o en estado natural tuvo valor de 0.6 N) por lo que aumentó en 1.88 veces su resistencia a la tracción.

- Los valores del módulo de Young que exhibe el material (hoja con tratamiento térmico polimérico) se asemejan a los reportados en la literatura, es decir se obtuvo una propuesta de material que se asemeja a una *non-woven fabric* usadas en embalaje similar a los de telas PP Spound (hechas de polipropileno) o conocidas como TNT o quirúrgicas; y las needlepunched compuestas de fibras de viscosa, poliéster y polipropileno o conocidas como telas punzonadas.

---

---

## Referencia Bibliográficas

- Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, 35, 215-236.
- Arcilla, M. I., & Aranzazu, F. (1999). *El cultivo del plátano* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.
- Asharuddin, S. M., Othman, N., Zin, N. S. M., Tajarudin, H. A., & Din, M. F. M. (2018). Performance assessment of cassava peel starch and alum as dual coagulant for turbidity removal in dam water. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(4).
- Bakieva, M., Gonzalez Such, J., & Jornet, J. (s. f.). *SPSS: ANOVA de un Factor* (Innova MIDE. Universitat de València, Ed.).  
[https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS\\_0702b.pdf](https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf)
- Baltanás, G., Cugniet, L., & Fourcade, V. (s. f.). *CLASIFICACIÓN DE LOS TEJIDOS*. Universidad de Buenos Aires. Recuperado 21 de agosto de 2024, de <http://cursos.fadu.uba.ar/apuntes/Indumentaria%20I/unidad%20practica%20n%20%201/1-%20Clasificacion%20de%20los%20tejidos.pdf>
- Bohórquez Carrasco, D, Hurtado Izquierdo, D, Peña León, A, Quispe Livias, G y Rodríguez Diaz, J. (2020). *Cuero a partir de la fibra de pseudotallo de plátano*. Universidad San Ignacio de Loyola
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.
- Chaudhari, S. B., & Mandot, A. (2008). *NONWOVEN FABRICS IN APPAREL*.  
[https://www.researchgate.net/publication/279196900\\_NONWOVEN\\_FABRICS\\_IN\\_APPAREL](https://www.researchgate.net/publication/279196900_NONWOVEN_FABRICS_IN_APPAREL)
- Clavijo, J. (2012). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)*. Universidad de América. Bogotá Colombia
- Cristina Da Silva, J., Chaves de Oliveira, R., Da Silva Neto, A., Cunha Pimentel, V., & De Amorim Dos Santos, A. (2013). *EXTRACCIÓN, ADICIÓN Y*

- 
- CARACTERIZACIÓN DE HEMICELULOSAS DE MAZORCAS DE MAÍZ PARA DESARROLLO DE LAS PROPIEDADES DE LOS PAPELES. *SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE MATERIALES LIGNOCELULOSICOS*.  
[https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/26\\_PT\\_RS.pdf](https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/26_PT_RS.pdf)
- CyberCOLLOIDS LTD. (2022). *Introduction to pectin*. <https://cybercolloids.net/wp-content/uploads/2022/12/Introduction-to-Pectin.pdf>
- Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Revista chilena de anestesia*, 43(4), 306-310.
- Duque, S., Monsalve, P., & Restrepo, C. (2019). *Intervención morfológica de la hoja de banano*. *Repositorio Institucional UPB*. Recuperado 2021, de <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4968/Intervenci%C3%B3n%20morfol%C3%B3gica%20hoja%20banano.pdf?sequence=1>
- Dutta, H., & Paul, S. (2020). *Amylose properties structure and functions*. ISBN 9781536169409
- EDANA. (2024). *Why use nonwovens in packaging?* edana.org. Recuperado 22 de agosto de 2024, de <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/packaging>
- Egharevba, H.O. (2019). Chemical Properties of Starch and Its Application in the Food Industry. *Chemical Properties of Starch*.
- ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. LABORATORIO DE PRODUCCION. (2008). *TRATAMIENTOS TÉRMICOS: Protocolo Curso de Materiales (2.ª ed.)*. [https://escuelaing.s3.amazonaws.com/staging/documents/1537\\_tratamientostermicosr2.pdf](https://escuelaing.s3.amazonaws.com/staging/documents/1537_tratamientostermicosr2.pdf)
- Gutiérrez, H. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos (3.a ed.)*. McGraw-Hill.
- Harvard University. (2018). *Proteins & Amino Acids*.  
[https://projects.iq.harvard.edu/files/lifesciences1abookv1/files/5\\_-\\_proteins\\_and\\_amino\\_acids\\_revised\\_9-24-2018.pdf](https://projects.iq.harvard.edu/files/lifesciences1abookv1/files/5_-_proteins_and_amino_acids_revised_9-24-2018.pdf)
- Hassan, S. B., & Saad, M. M. (2024). Non-Woven Fabric as a Potential Linen for Synthetic Leather in Upholstery Stuff. *Open Access Library Journal*, 11(8), 1-15.
- Held, M. A., Jiang, N., Basu, D., Showalter, A. M., & Faik, A. (2015). Plant cell wall polysaccharides: structure and biosynthesis. *Polysaccharides*, 3-54.

- 
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México*. *Food Science and Technology*, 28, 718- 726.
- Hipohorski, M., & Bozzano, P. B. (2013). *Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales*. *CIENCIA E INVESTIGACIÓN*, 63(3).  
<https://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2018/01/RevistasCel/tomo63-3/5-MICROSCOPIA-ELECTRONICA-DE-BARRIDO-EN-LA-CARACTERIZACION-DE-MATERIALES-cei63-3-2013-5.pdf>
- Ibarra Vallejo, M. A., Márquez, L. I., & Universidad Mariana. (2022). *Identificación de usos potenciales para el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso de beneficio del plátano (Musa Paradisiaca) Var. Hartón*. *CE Boletín Informativo. Ingenierías*, 9(2).
- IDM TEST. (2021). *MÁQUINAS UNIVERSALES DE ENSAYOS (UTM)*. ESPAÑA  
<https://www.idmtest.com/gestor/recursos/uploads/imagenes/noticias/191121-MUE/AFF-MUE-IDM-TEST-A4-LOW.pdf>
- Isaza, J. H. (2007). Taninos o polifenoles vegetales. *Scientia et Technica*, 1(33), 13-18.
- Jane, J., Xu, A., Radosavljevic, M., & Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. *Susceptibility of Amylose and Amylopectin to Cross-Linking Reagents*, 69, 405-409.
- JINAN SPARK IMP. (2023). *Almidón de maíz modificado para textiles*. SparkStarch. Recuperado 20 de agosto de 2024, de <https://es.sparkstarch.com/modified-corn-starch-for-textile.html>
- Kinge, A. P., Landage, S. M., & Wasif, A. I. (2013). Nonwoven for artificial leather. *Int. J. Adv. Res. Eng. Appl. Sci*, 2(18), 18-33.
- Lakes, R. S. (2009). *Viscoelastic materials*. Cambridge university press.
- Lascurain, M. (1993). *FLORA DE VERACRUZ* [Impreso]. Victoria Sosa.  
<https://libros.inecol.mx/index.php/FV/catalog/book/391>
- Lonut-Flavius, A., & Butnariu, M. (2022). General information about cellulose. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.31579/2766-2314/077>
- López, F., Lorente, A., González, P., & Quevedo, B. (2023). Bioplástico De Almidón. *Ingenia Materiales*, (5), 18-19.

- 
- Luna, G., VILLADA, H., & VELASCO, R. (2009). Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique: Preliminares. *Dyna*, 76(159), 145-151.
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722137. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Mani, R., & Bhattacharya, M. (1998). Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blends—III. Effect of amylopectin to amylose ratio in starch. *European polymer journal*, 34(10), 1467-1475.
- Martínez Álvarez, G. M. (2018). El almidón de maíz: un producto cada vez más valioso por su gran potencial alimentario e industrial.
- Martínez Rueda, C. (2015). *UNIDAD III DISEÑOS EXPERIMENTALES RELACIONADOS CON UN SOLO FACTOR DE ESTUDIO*. UAEM. Recuperado 6 de marzo de 2022, de <https://core.ac.uk/download/pdf/55527325.pdf>
- Martínez-Cano, A., Mendoza-Báez, R., Zenteno-Mateo, B., Rodríguez-Mora, J. I., Agustín-Serrano, R., & Morales, M. (2022). *Study by DFT of the functionalization of amylose/amylopectin with glycerin monoacetate: Characterization by FTIR, electronic and adsorption properties*. *Journal of Molecular Structure*, 1269, 133761.
- Mejorada, D. G., Valdivia, R. R., & De México Facultad de Arquitectura Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, U. N. A. (2006). *Taller de materiales i textiles: manual de trabajo (tercer semestre)*.
- Melo, L. L. O., Melo, S., & López, L. (2007). *Diseño de experimentos [Métodos y Aplicaciones]*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Merck KGaA (s. f.). *Glicerina CAS 56-81-5 | 818709*. [https://www.merckmillipore.com/MX/es/product/Glycerol,MDA\\_CHEM-818709?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.merckmillipore.com/MX/es/product/Glycerol,MDA_CHEM-818709?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)
- Miranda, A. G., Soto, J. L. M., & Ruiz, I. G. (2008). *Parcial caracterización de nuevos almidones obtenidos del tubérculo de camote del cerro (Dioscorea spp)*. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 9(1), 81-88.
- Montaño, Y. (2020). *Materiales sostenibles biodegradables para envasado de alimentos: hoja de bijao y hoja de plátano*

- 
- Montero Peralta, S. (2018). *Efecto de la modificación química del almidón sobre la miscibilidad de mezclas de ácido poliláctico/almidón modificado termoplástico*.  
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/610/1/Tesis%20MTP%20Sailyn%20Montero%202017%20ene%202019.pdf>
- Montgomery, D. (2005). *Diseño y análisis de experimentos* (2 Tra ed.). Editorial Limusa.
- Morales, Y., Cuautle, K., Díaz, M. de J., & Maldonado, J. A. (2024). Usos de la hoja de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en la gastronomía. *Revista de Gastronomía y Cocina*, 3(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10619494>
- NBH, ABTR, & SENASICA. (2020). *Estudio para determinar el impacto económico de Foc R4T en México*.  
[https://dj.senasica.gob.mx/AtlasSanitario/storymaps/impacto\\_economico\\_focr4t.html](https://dj.senasica.gob.mx/AtlasSanitario/storymaps/impacto_economico_focr4t.html)
- Ngwuluka, N. C., Akanbi, M., Agboyo, I., & Uwaezuoke, O. (2012). Characterization of gum from *Sesamum indicum* leaves as a suspending agent in a pediatric pharmaceutical. . . *ResearchGate*.  
[https://www.researchgate.net/publication/251231807\\_Characterization\\_of\\_gum\\_from\\_Sesamum\\_indicum\\_leaves\\_as\\_a\\_suspending\\_agent\\_in\\_a\\_pediatric\\_pharmaceutical\\_suspension](https://www.researchgate.net/publication/251231807_Characterization_of_gum_from_Sesamum_indicum_leaves_as_a_suspending_agent_in_a_pediatric_pharmaceutical_suspension)
- Nimitkeatkai, H., Pasada, K., & Jarerat, A. (2022). Incorporation of tapioca starch and wheat flour on physicochemical properties and sensory attributes of meat-based snacks from beef scraps. *Foods*, 11(7), 1034.
- Nole, N., & Raul, W. (2022). Técnicas de extracción de almidón de frutas y residuos vegetales.
- ONG Manos Unidas. (2020). *Industria Textil. El impacto de estar siempre a la última moda*.  
[https://www.manosunidas.org/sites/default/files/ropa.\\_documento\\_analisis.pdf](https://www.manosunidas.org/sites/default/files/ropa._documento_analisis.pdf)
- Paredes Flores, F. A. (2023). *Determinación de la huella de carbono y formulación de medidas para reducción de GEI en las actividades de una empresa textil*.
- Pareek, S., Sagar, N. A., Sharma, S., Kumar, V., Agarwal, T., González-Aguilar, G. A., & Yahia, E. M. (2017). Chlorophylls: Chemistry and biological functions. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health, 2nd Edition*, 269-284.

- 
- PASCO. (s. f.). Stress/Strain Apparatus AP-8214: Instruction Manual 012-09424B.  
<https://tecnoedu.com/Download/8214.pdf>
- Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición hospitalaria*, 27(1), 76-89.
- Rawal, A., Priyadarshi, A., Kumar, N., Lomov, S. V., & Verpoest, I. (2010). Tensile behaviour of nonwoven structures: comparison with experimental results. *Journal of Materials Science*, 45, 6643-6652.
- Rayas, J. A., Rodríguez-Vera, R., & Martínez, A. (2003). *Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI*. *Revista mexicana de física*, 49(6), 555-564.
- SADER. (2021). *Aumentó 2.9 por ciento producción de plátano mexicano en 2020*. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México. Recuperado 2 de mayo de 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/aumento-2-9-por-ciento-produccion-de-platano-mexicano-en-2020?idiom=es>
- Sánchez, S. M. C., Clemente, M. Y. N., González, V. M., & Schouwenaars, R. (2005). Modelado del comportamiento mecánico del hueso (análisis de los efectos del grado de hidratación). *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 1(6), 223-232.
- Saxena, T., & Chawla, V. K. (2021). *Banana leaf fiber-based green composite: An explicit review report*. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6618-6624.
- Senanayake, S. A., Ranaweera, K. K. D. S., Gunaratne, A., & Bamunuarachchi, A. (2013). Comparative analysis of nutritional quality of five different cultivars of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* (L) Lam) in Sri Lanka. *Food science & nutrition*, 1(4), 284-291.
- SIAP. (2019). *Hoja de Plátano*. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado 7 de agosto de 2024, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726673/Hoja\\_de\\_platano\\_web.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726673/Hoja_de_platano_web.pdf)
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific reports*, 11(1), 13900.

---

---

Thermo Fisher Scientific. (2022). Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/introduction-fourier-transform-infrared-spectroscopy-br50555.pdf>

Wu, D. T., Jeffreys, N., Diba, M., & Mooney, D. J. (2022). Viscoelastic biomaterials for tissue regeneration. *Tissue Engineering Part C: Methods*, 28(7), 289-300.

Wu, J., Jin, Z., Jin, J., Yan, Y., & Tao, J. (2020). Study on the tensile modulus of seamless fabric and tight compression finite element modeling. *Textile Research Journal*, 90(1), 110-122.