

**EVALUACIÓN DE LA SÍNTESIS DE UNA PELÍCULA BIOPLÁSTICA A ESCALA  
LABORATORIO A PARTIR DE RESIDUOS DE MANGO (*Mangífera Índica*).**

**LAURA NATALIA AVENDAÑO ROJAS**

**Proyecto Integral de Trabajo de Grado para optar por el título de  
INGENIERA QUÍMICA**

**Director  
MSc. Dany José Cárdenas Romay  
ING. QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Ing. Dany José Cárdenas Romay**

---

**Ing. Diana Morales Fonseca**

---

**Ing. David Sotelo**

**Bogotá D.C., Febrero 2022**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretario General

**Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ**

Decana de la Facultad de Ingenierías

**Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO**

Directora Programa de Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llegar a esta instancia final de mis estudios con éxito. A mis papás, a mi hermana y en general a mis familiares, porque sin el apoyo, los consejos y la guía que me ofrecieron durante todo este proceso no habría podido llegar a este punto.

Al director de trabajo de grado, el Ingeniero Dany José Cárdenas Romay porque sin su guía, colaboración y apoyo constante este proyecto no habría sido posible.

De igual forma, a la Ingeniera Yenny Hernández Prieto, coordinadora de los laboratorios de la Fundación Universidad de América por su colaboración y orientación constante y a los docentes de la Fundación Universidad de América, que durante el trayecto de la carrera me brindaron los conocimientos necesarios para formarme como profesional y como persona.

A la Universidad Nacional de Colombia y al Ingeniero Cesar Bacca, quienes permitieron el uso de sus instalaciones para poder ejecutar el proyecto experimentalmente de manera completa.

A Mario Barreto, mis compañeras de equipo, mis amigos y amigas que durante todo el proceso de elaboración de este trabajo me mantuvieron en pie para no desistir ante las adversidades.

Y finalmente, a todas las personas que me brindaron apoyo y compañía durante la ejecución de este trabajo de grado.

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres Juan Carlos Avendaño y Claudia Rojas, a mi hermana Yenny Paola y a mis abuelos Hely y Cecilia, quienes me enseñaron a no darme por vencida y luchar hasta el final por cumplir mis sueños, por su comprensión y su apoyo en los momentos más difíciles, pero sobretodo, por todo el amor que me han brindado con el que me enseñaron a ser mejor cada día y con el que me formaron como una persona llena de valores y el carácter suficiente para ser capaz de cumplir todas sus metas. Sin ellos cada cosa que he logrado no sería posible.

A mis amigos y amigas, que estuvieron presentes en cada uno de los momentos más difíciles y que, así mismo, me brindaron los momentos más felices durante mi paso por la universidad y en todos los ámbitos de mi vida. Ellos son la familia que escogí.

En especial, hago una dedicatoria a Nazir Morales, Oneia Guarín, Gisel Rincón y Julian Fajardo, amigos que durante todo el proceso de ejecución de este proyecto estuvieron presentes para brindarme palabras de apoyo y motivación para seguir adelante y no rendirme nunca.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	14
1 GENERALIDADES	15
1.1 Almidón	15
1.1.1 <i>Amilosa</i>	15
1.1.2 <i>Amilopectina</i>	17
1.1.3 <i>Fuentes de Obtención</i>	18
1.1.4 <i>Aplicaciones</i>	19
1.2 Mangifera índica	19
1.2.1 <i>Componentes de la semilla del Mango</i>	20
2 SELECCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA PELÍCULA BIOPLÁSTICA	22
2.1 Procesos de obtención de un bioplástico	22
2.1.1 <i>Casting o Proceso tradicional</i>	22
2.1.2 <i>Proceso Matriz Reforzada</i>	26
2.1.3 <i>Proceso con Almidón Modificado</i>	28
2.2 Matriz de selección de proceso	31
2.2.1 <i>Matriz de Factores Ponderados</i>	31
2.2.2 <i>Esquema de trabajo, materias primas</i>	37
3. DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FORMULACIÓN MÁS APROPIADOS PARA LA OBTENCIÓN DE UNA PELÍCULA BIOPLÁSTICA	40
3.1. Materias primas	40
3.1.1 <i>Selección de Frutos</i>	41
3.1.2 <i>Extracción de Almidón</i>	42
3.2. Otras operaciones unitarias involucradas	45
3.3. Formulación bioplástico	46
3.3.1 <i>Diseño de experimentos</i>	46

4. SÍNTESIS DE UNA PELÍCULA BIOPLÁSTICA A PARTIR DE ALMIDÓN EXTRAÍDO DE RESIDUOS DE MANGO A ESCALA LABORATORIO	50
4.1. Obtención de almidón a partir de residuos de mango	50
4.1.1. <i>Metodologías para la obtención del almidón</i>	51
4.1.2. <i>%Rendimiento y %Humedad</i>	59
4.2. Síntesis película bioplástica	60
5. COMPARAR LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA OBTENIDA FRENTE A OTROS COMPUESTOS POLIMÉRICOS CONVENCIONALES	68
5.1. Resistencia a tracción de los materiales	69
5.2. Prueba de dureza	82
5.3. Comparativo frente a propiedades mecánicas den polímeros convencionales	85
6. CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	99

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Segmento estructura amilosa	16
Figura 2. Cadenas de amilosa formando hélices	16
Figura 3. Segmento estructura amilopectina	17
Figura 4. Estructura ramificada amilopectina	18
Figura 5. Partes de la semilla de mango	21
Figura 6. Proceso tradicional o Casting para obtención de un bioplástico	25
Figura 7. Proceso matriz reforzada para obtención de un bioplástico	27
Figura 8. Proceso almidón modificado para obtención de un bioplástico	30
Figura 9. Esquema trabajo obtención de bioplástico	39
Figura 10. Proceso extracción almidón semillas de mango método seco	53
Figura 11. Proceso extracción almidón semillas mango método húmedo	55
Figura 12. Resultado proceso de centrifugación almidón	56
Figura 13. Proceso extracción almidón cáscaras de mango	58
Figura 14. Almidón extraído cáscaras de mango	58
Figura 15. Esquema trabajo obtención de bioplástico	62
Figura 16. Máquina universal de ensayos	70
Figura 17. Ensayos de tensión en probetas	72
Figura 18. Ensayos de tensión a probetas con fallo	73
Figura 19. Ensayos de tensión a probetas con alto grado de elongación	74
Figura 20. Probetas después ensayos de tensión sin ruptura	75
Figura 21. Probeta de ensayo con ruptura	75
Figura 22. Durómetro	83

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Factor de alta importancia	33
Tabla 2. Factor de importancia media	35
Tabla 3. Calificación de procesos	35
Tabla 4. Matriz de factores ponderados	36
Tabla 5. Materias primas del proceso	38
Tabla 6. Condiciones de operación y equipos de proceso	48
Tabla 7. Resultados extracción de almidón método seco	53
Tabla 8. Resultados extracción de almidón método húmedo	56
Tabla 9. %Rendimiento almidón extraído tres métodos	60
Tabla 10. %Humedad almidón extraído tres métodos	60
Tabla 11. Materias primas y condiciones de operación	61
Tabla 12. Distribución de pruebas	64
Tabla 13. Composición de películas bioplásticas	65
Tabla 14. Resultados síntesis de bioplástico	66
Tabla 15. Resultados estrés máximo y porcentaje de tensión máxima para cada ensayo	71
Tabla 16. Resultado dureza Shore D por cada formulación de bioplástico	84
Tabla 17. Carga máxima de rotura polímeros convencionales.	85

## ABREVIATURAS

**°C:** Grados celsius.

**%H:** Porcentaje Humedad.

**%R:** Porcentaje rendimiento.

**h:** Horas.

**Kg:** kilogramos.

**KN:** Kilogramos fuerza.

**min:** Minutos.

**mm:** Milímetros

**mL:** Mililitros.

**m/v:** Relación masa – volumen.

**pH:** Potencial hidrógeno.

**PVA:** Alcohol Polivinílico.

**RPM:** Revoluciones por minuto.

**s:** Segundos.

## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de grado fue realizar la síntesis de una película bioplástica a través de la extracción de almidón obtenido de residuos de mango, siendo éste la materia prima para las diferentes formulaciones del biopolímero esperado. Durante el desarrollo de los objetivos se tuvieron en cuenta diferentes estudios en los cuales se desarrollaron diversos prototipos de películas bioplásticas y, a través de estos resultados observados, se estableció un método cuantitativo de ponderación y selección para encontrar el proceso óptimo para desarrollar el bioplástico esperado.

De este modo, al seleccionar el proceso con mejor ponderación se tuvieron claras las principales etapas de producción que llevaran a una obtención óptima del almidón empleado como materia prima y, así mismo, de la película bioplástica. El proceso de extracción y síntesis fue apoyado mediante un diseño de experimentos, a través del cual se esperaba encontrar diferentes formulaciones cuyas características fueran comparables frente a las de los polímeros convencionales.

Así, con un total de 18 tipos de películas de biopolímero, se sometieron a ensayos mecánicos con el fin de encontrar que las probetas sintetizadas tendrían comportamientos comunes de polímeros bastante flexibles o elastómeros, pues no presentaron fallas frente a la aplicación de la fuerza máxima del equipo empleado con esta finalidad.

Palabras clave: Almidón, Bioplástico, Síntesis, Matriz polimérica, Ensayos mecánicos, Elastómero.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia su población genera, en promedio, 10,3 millones de toneladas de residuos sólidos de los cuales se disponen casi 30,081 ton/día, el sector plástico genera 1,2 millones de toneladas por año, además, los hogares colombianos generan aproximadamente 4,3 kg/día de residuos sólidos; por otro lado Bogotá, siendo la capital, es una ciudad que cuenta con una población de 7.734.955 de habitantes y su producción de residuos es de aproximadamente 2,2 millones de toneladas lo que representa el 21% de los residuos dispuestos en el país<sup>[7]</sup>. Por otro lado, de los residuos plásticos generados por la población colombiana también se tiene en cuenta que, solo en Bogotá, se genera casi 10,4 millones de toneladas de residuos orgánicos que no son aprovechados correctamente por lo que, al igual que los residuos plásticos, generan consecuencias a nivel ambiental pues su acumulación y degradación resulta en la emisión de gases que desencadenan consecuencias de tipo social; esta materia orgánica desechada podría tener utilidades importantes como la producción de energía, hasta convertirse en materia prima o insumos para nuevos productos sostenibles ambientalmente<sup>[14]</sup>.

De este modo se observa como la contaminación provocada a raíz de la mala disposición de residuos plásticos, va en aumento pues su degradación se tarda entre 100 y 1000 años convirtiéndolos en una fuente permanente de polución a las fuentes hídricas, los suelos, el aire y los seres vivos. Los plásticos de un solo uso forman parte importante de estos residuos que no se disponen de manera correcta los cuales son, generalmente, empaques para alimentos u otros como pitillos, ya que su fabricación a nivel industrial ha tenido un incremento considerable a lo largo de los años pues su demanda cada vez es más alta<sup>[27]</sup>; a raíz de esto, se buscan alternativas que minimicen el impacto que tienen todos estos desechos en el medio ambiente como los bioplásticos, con el fin de plantear la posibilidad de emplear los residuos de carácter orgánico como materia prima para este tipo de materiales y así generar un aprovechamiento de residuos que lleve de la mano un cambio en las propiedades como la biodegradación y facilitar su disposición final. Los residuos orgánicos generalmente contienen cantidades importantes de componentes que pueden ser aprovechados en procesos alternos, en el caso de los residuos de mango sus componentes como la cáscara y el cotiledon de su semilla contienen concentraciones

de almidón que, después de un proceso de extracción, pueden ser útiles en la producción de materiales plásticos biodegradables o empleados de manera comercial de igual forma que el almidón de maíz y otros que son importantes en diferentes ámbitos industriales; de esta manera se plantea la posibilidad de aprovechar estos residuos a los que no se les da un uso después de la extracción de la pulpa para sintetizar una película bioplástica que tenga propiedades similares a un polímero convencional.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar la síntesis de una película bioplástica partiendo de residuos de mango (*Mangifera indica*) a nivel laboratorio.

### Objetivos específicos

1. Identificar a través de la revisión de estado del arte el método de síntesis más apropiado para la producción a escala laboratorio de una película bioplástica usando como materia prima residuos de mango.
2. Determinar los parámetros de síntesis más apropiados para la obtención de una película bioplástica.
3. Sintetizar a escala laboratorio una película bioplástica empleando residuos de mango.
4. Comparar la resistencia mecánica y demás características de la película obtenida frente a otros compuestos poliméricos convencionales.

# 1 GENERALIDADES

## 1.1 Almidón

El almidón es una materia prima de origen vegetal, que se encuentra en todas las plantas como producto de la fotosíntesis y representa la reserva energética de las mismas. Es un polisacárido digerible que consta de cadenas de glucosa con estructura lineal (amilosa) o ramificada (amilopectina), la mayoría de los almidones en su estructura están conformados en su estructura glucosídica por 20% de amilosa y el 80% de amilopectina. Este polisacárido cuenta con una gran variedad de forma y tamaño de partículas que se pueden establecer en un rango de 0,6 a 100  $\mu\text{m}$ , lo que afecta sus propiedades funcionales pues al someter este material al contacto con el agua se forma una suspensión temporal ya que tiene la capacidad de atrapar agua y facilita la formación de geles o el espesamiento de un líquido<sup>[21]</sup>.

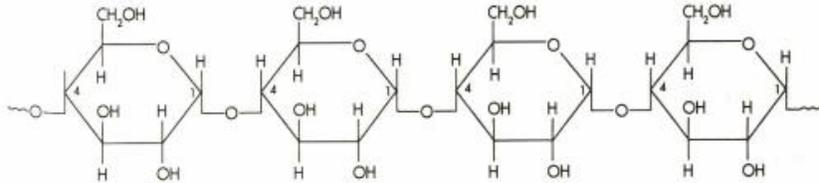
### 1.1.1 Amilosa

La amilosa es un polisacárido lineal compuesto por anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas que no tienen ramificaciones. Está compuesta por enlaces glucosídicos a 1-4, de moléculas de glucosa compuestas de 200 a 20000 unidades con un peso molecular en el orden de un millón, como se muestra en la Figura 1.

La amilosa se disuelve fácilmente en agua, adquiriendo una estructura secundaria característica; forma micelas hidratadas por su capacidad de enlazar moléculas vecinas mediante puentes de hidrógeno y genera, como se observa en la Figura 2 una estructura helicoidal en la que cada vuelta de hélice cuenta con seis moléculas de glucosa<sup>[4]</sup>.

### Figura 1.

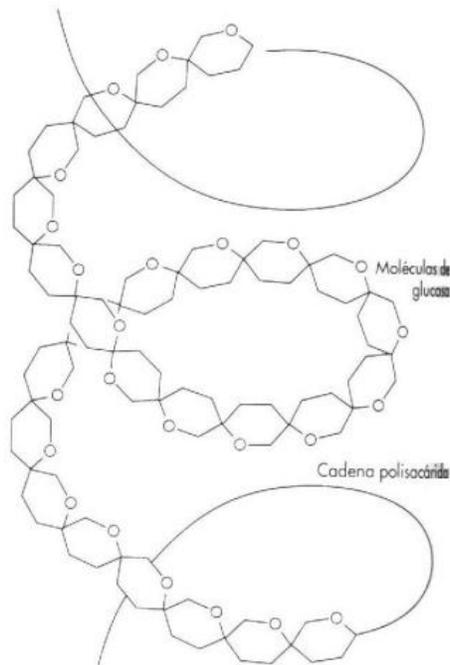
*Segmento estructura amilosa.*



**Nota.** La figura representa el segmento de la estructura de amilosa que compone al almidón. Tomado de: G. Avilés Ruiz. Polímeros Biodegradables a partir de almidón de Yuca. Medellín, p.p 11. 2005.

### Figura 2.

*Cadenas de amilosa formando hélices.*



**Nota.** La figura representa el segmento de la estructura de amilosa formando hélices que compone al almidón. Tomado

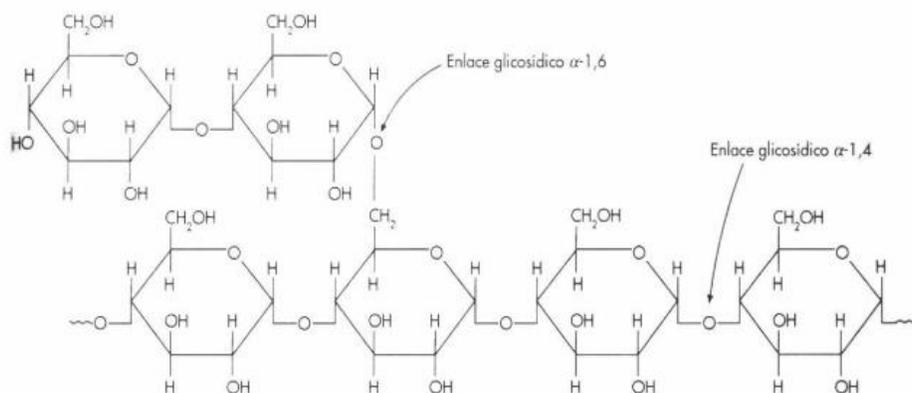
de: G. Avilés Ruiz. Polímeros Biodegradables a partir de almidón de Yuca. Medellín, p.p 11. 2005.

### 1.1.2 Amilopectina

La amilopectina está constituida por anillos de glucosa que están unidos entre sí para formar moléculas con ramificaciones laterales cortas las cuales la diferencian de la molécula de la amilosa, pues la primera tiene dos tipos de enlaces: los enlaces  $\alpha$  1-4 que dan origen a las uniones de las moléculas de glucosa y los enlaces  $\alpha$  1-6 que dan lugar a las ramificaciones, como se observa en la Figura 4. Estas moléculas son significativamente más grandes que las moléculas de amilosa pues algunas contienen entre 10000 y 20000 unidades de glucosa. En la Figura 3 se puede observar un segmento de la estructura de la amilopectina y los enlaces que están comprometidos<sup>[4]</sup>.

**Figura 3.**

Segmento estructura amilopectina.



**Nota.** La figura representa el segmento de la estructura de amilopectina que compone al almidón. Tomado de: G. Avilés Ruiz. Polímeros Biodegradables a partir de almidón de Yuca. Medellín, p.p 12. 2005.

**Figura 4.**

*Estructura ramificada amilopectina.*



**Nota.** La figura representa el segmento de la estructura de amilopectina ramificada que compone al almidón. Tomado de: G. Avilés Ruiz. Polímeros Biodegradables a partir de almidón de Yuca. Medellín, p.p 12. 2005.

### **1.1.3 Fuentes de Obtención**

El almidón se puede obtener de distintas fuentes vegetales tales como cereales, raíces, tubérculos y frutas inmaduras, pues como se mencionó, el almidón representa la reserva energética de las plantas. A nivel industrial las principales fuentes de obtención de esta materia prima son la yuca, el maíz, el trigo y la papa. El maíz es el producto del cual se extrae mayor cantidad de almidón ya que a nivel mundial se producen casi 821 mil millones de toneladas y en segundo lugar se encuentra la papa con una producción mundial cerca de 300 mil millones de toneladas<sup>[1]</sup>.

Los almidones nativos tienen ciertas desventajas como la baja solubilidad en agua y la baja estabilidad bajo condiciones de temperatura, deformación, pH y refrigeración comúnmente aplicadas en diferentes procesos, por esto se realizan modificaciones químicas a esta materia prima.

### **1.1.4 Aplicaciones**

Las propiedades del almidón permiten que este se pueda aplicar en diferentes industrias como por ejemplo en la industria alimentaria en la cual se utiliza para espesar y engrosar preparaciones o en la preparaciones de bibas no alcohólicas, en la industria farmacéutica, la fabricación de papel, la producción de adhesivos, cremas de afeitar productos textiles, solventes y productos cosméticos. Además, en el cuerpo humano aporta entre el 70-80% de calorías necesarias para el funcionamiento del organismo. Actualmente también se incursiona en la incorporación del almidón como materia prima para producir materiales biodegradables<sup>[20]</sup>.

1.1.4.1. Almidón en la industria plástica. El almidón al ser un material económico se emplea en gran parte la base del mercado de los bioplásticos que pueden ser producidos por combinación de varios tipos de almidón mezclados con polímeros sintéticos, dependiendo de la morfología del almidón empleado. Al ser materia prima orgánica, generalmente extraída de tubérculos o frutas, el bioplástico obtenido adquiere la capacidad de degradarse por acción de microorganismos y por eso su producción se dedica en gran parte al embalaje y el envasado de alimentos para que al final de su vida útil ser transformen en sustancias simples, asimiladas eventualmente en el medio ambiente<sup>[8]</sup>

## **1.2 Mangifera indica**

El mango (*Mangifera Indica*) es un alimento fuente de ácido ascórbico, carotenoides y polifenoles presentes en la parte comestible de la fruta, es una de las frutas tropicales más importantes del mundo en términos de producción, superficie cultivada y popularidad. Su origen data de hace 4000 años en el sureste de Asia en la región Indo-Birmana y actualmente es cultivado en alrededor de 90 países; su cultivo ocupa casi 3,7 millones de hectáreas a nivel mundial y es el segundo fruto tropical mayormente cultivado y comercializado, después del plátano<sup>[10]</sup>.

Las frutas y verduras contienen diferentes componentes nutricionales como agua, fibra, proteínas, grasas, entre otros de los cuales el agua y los carbohidratos son considerados como los más abundantes. En el caso del mango, la pulpa tiene un contenido importante de macro y micronutrientes como la vitamina A, C, E, minerales como el potasio, magnesio, hierro, fósforo y calcio, además, la cáscara y el hueso del mango también son considerados como fuente de macro y micronutrientes importantes como lípidos, fibra, azúcares, **almidón**, zinc, hierro magnesio, fósforo y otros. Los tejidos vegetales (cáscara y hueso) del mango poseen una cantidad de 29,80 g/100g y 21,00 g/100g<sup>[35]</sup>.

Durante el cultivo y cosecha del mango se tienen en cuenta diferentes aspectos, por ejemplo, que el terreno empleado sea profundo y con un buen drenaje en el cual las raíces puedan penetrar y fijarse al terreno, generalmente su cultivo prospera muy en bien en climas ligeramente fríos y ligeramente cálidos, la cosecha se realiza con cuidado seleccionando los frutos que están completamente maduros pero que aún no cambian su color verde (la madurez requiere más o menos 105 a 130 días) y sus frutos deben mantenerse frescos pero no fríos y empacados en cajas delgadas<sup>[38]</sup>.

En Colombia, 39% del área ocupada por esta fruta corresponde a plantaciones silvestres de mango variedad hilacha, le siguen las variedades Tommy Atkins (20%), Keitt (11%) y el mango azúcar (5%); este último cultivado principalmente en la región norte de Colombia, cerca a la costa Atlántica cuyo cultivo se ha extendido a los departamentos de Cundinamarca, Tolima y Huila<sup>[10]</sup>

### **1.2.1 Componentes de la semilla del Mango**

La semilla del mango es uno de los elementos más importantes del fruto del mango, ésta es considerada una fuente inagotable de antioxidantes y una fuente importante de compuestos fenólicos como el ácido gálico, además, de estar compuesta por aproximadamente 1,9% de proteína, 2,4% de cenizas, 0,12% fibras y 9,91% de lípidos<sup>[3]</sup>. La semilla se divide en cuatro partes esenciales, como se puede evidenciar en la Figura 5 y cada uno de los componentes se denominan de la siguiente manera:

1. Endocarpio: se caracteriza por presentar fibras longitudinales que se extienden a la pulpa.
2. Testa: es un tejido delgado que se encuentra unido a la cubierta interna del endocarpio.
3. Tegumento: estructura que envuelve a los cotiledones.
4. Cotiledón: parte de la semilla donde se localiza el embrión sexual y los embriones nucleares<sup>[29]</sup>

### Figura 5.

*Partes de la semilla del mango.*



**Nota.** Esta figura muestra las partes en las cuales se divide la semilla del mango, explicadas anteriormente. Tomado de: M. Ortiz Ramirez. Evaluación de un bioplástico a partir de almidón de semillas de mango (*Mangifera Índica*) con aplicación potencial en envases. Universidad del Bosque. P.p 36. 2019.

## **2. SELECCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA PELÍCULA BIOPLÁSTICA**

En este capítulo se busca definir el proceso adecuado para la obtención de una película bioplástica a nivel de laboratorio, realizando la revisión bibliográfica de diferentes métodos aplicados por otros autores y las similitudes entre ellos, de igual forma, estableciendo una comparación entre los resultados y características del producto obtenido en cada uno de estos. Según dicha revisión, se tienen en cuenta tres métodos principales para la producción de un biopolímero, el primero de ellos es el método tradicional (también llamado método Casting) el cual es el método más simplificado de los estudiados pues no requiere ninguna alteración química del almidón, ni controles de condiciones de temperatura o presión, es decir, puede ser considerado un proceso prácticamente artesanal; el segundo método estudiado, es el proceso de matriz reforzada que, según la literatura, es el método por el cual se obtienen mejores resultados en cuanto a las propiedades mecánicas del bioplástico, esto en comparación a las características de los productos resultantes de los otros métodos estudiados, y por último, se tiene en cuenta la obtención de una película bioplástica a través del método de almidón modificado, que resulta ser un proceso bastante similar al primer proceso revisado pero en este caso, y como su nombre lo indica, el almidón empleado como materia prima para el producto sufre una modificación química o acilación lo que mejora las propiedades del producto final. Con el fin de seleccionar correctamente el proceso a emplear para la obtención del biopolímero a partir de almidón extraído de residuos de mango se plantea un análisis de matriz de factores ponderados en la cual se evalúa cada uno de los métodos anteriormente mencionados y se establecen condiciones de ejecución al proceso seleccionado.

### **1.3 Procesos de obtención de un bioplástico**

#### ***1.3.1 Casting o Proceso tradicional***

El proceso tradicional para la obtención de un bioplástico se desarrolla como una técnica mediante la cual se vierte una mezcla en un molde hasta obtener un producto rígido que reproduce la forma del molde. Este proceso se basa en dos pasos: el primero, la mezcla de las materias primas el almidón y el agua, generalmente, en proporciones 1:3 (m/v) y el segundo paso es la mezcla que incluye el plastificante (glicerina natural, agua) y un modificador químico que se emplea entre el 4% y el 9% de ácida con el fin de promover el rompimiento de cadenas de amilopectina y de este modo otorgarle al producto distintas propiedades físicas y mecánicas; es importante aclarar que los modificadores químicos alteran la estructura del almidón, solamente facilitan la interacción molecular entre los plastificantes. Durante todo el proceso se realiza agitación manual de la mezcla y a su vez, se proporcionaba un aumento de temperatura de hasta 80°C para favorecer la gelatinización de la mezcla<sup>[33]</sup>.

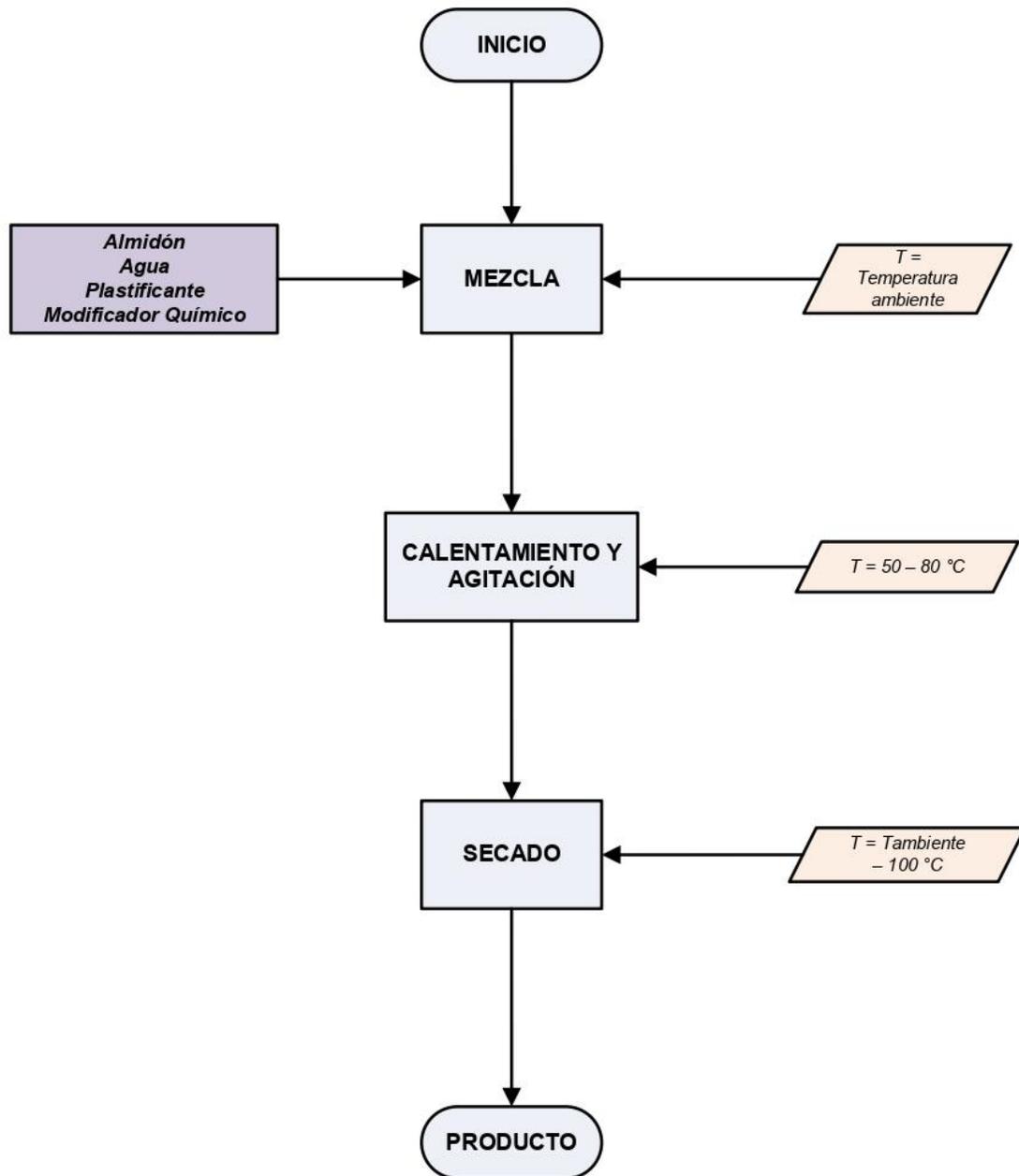
Durante la ejecución de este proceso se encuentra que el principal problema de las distintas pruebas desarrolladas es el agrietamiento de las láminas obtenidas, por ejemplo, en el estudio efectuado por Ortiz se encuentra que la formulación más representativa en la cual el producto no presenta estas características es aquella que estuvo compuesta por el 8% de almidón, 11% glicerol, 75% agua y 6% ácido clorhídrico empleado como modificador químico; sin embargo se encuentra que la permeabilidad de el material obtenido presenta deficiencias estructurales lo que generó una pérdida del 50% en peso del material y al momento de ser retirado del molde presentó un alto grado de deformación. De igual forma existen otros estudios en los cuales se empleó como modificador químico el hidróxido de sodio (además del ácido clorhídrico), a los productos obtenidos en este caso se realizaron pruebas mecánicas bajo la norma ASTM D3039/D3039M-14<sup>[5]</sup> que constan de pruebas de elasticidad y pruebas de resistencia o esfuerzo y elongación con estos resultados, se concluye que la resistencia mecánica durante este proceso aumenta cuando la relación de concentración de glicerina con el almidón y agua es mejor, mientras que la elasticidad y elongación variaron según la cantidad de glicerina contenida en el producto<sup>[28]</sup>. Por otro lado, también se realizaron investigaciones en las cuales se empleó el ácido acético como modificador químico con diferentes composiciones de glicerina, almidón y agua y teniendo en cuenta la norma

ASTM D-638, que establece los parámetros de resistencia estándar para un polímero, se concluyó que el producto de esta prueba no cumple con la norma, además, que gracias al resultado negativo del espesor del producto no fue posible realizar otras pruebas mecánicas a este<sup>[18]</sup>.

El análisis de los estudios en los que se aplica el proceso convencional, se encuentra que para la producción del bioplástico no se requieren equipos de alta gama y por ende son de fácil acceso en un laboratorio, esto sin tomar en cuenta los equipos empleados para realizar las pruebas mecánicas de cada muestra; también se encuentra que el tiempo de producción del biopolímero está en un rango de 15 a 30 minutos y el tiempo de secado está entre 36 a 48 horas a temperatura ambiente.

Figura 6.

Proceso tradicional o Casting para obtención de un bioplástico.



**Nota.** La figura muestra el proceso de obtención de una película bioplástica a nivel laboratorio empleando el proceso tradicional, teniendo en cuenta las condiciones de operación y materias primas empleadas.

### **1.3.2 Proceso Matriz Reforzada**

El segundo proceso que se sometió a revisión fue el proceso de matriz reforzada, en el cual se agrega todo tipo de material orgánico (que pueden ser fibras, polisacáridos u otros) o cualquier material químico o sintético (como acetato de polivinilo, alcohol polivinílico, poliestierno u otro) a la mezcla de materias primas empleadas para la elaboración del bioplástico, esto con el fin de suplir todas las falencias que puede tener el bioplástico obtenido mediante el proceso descrito en la sección 2.1.1. como las deficiencias estructurales, el grado de deformación, la resistencia y la permeabilidad del material.

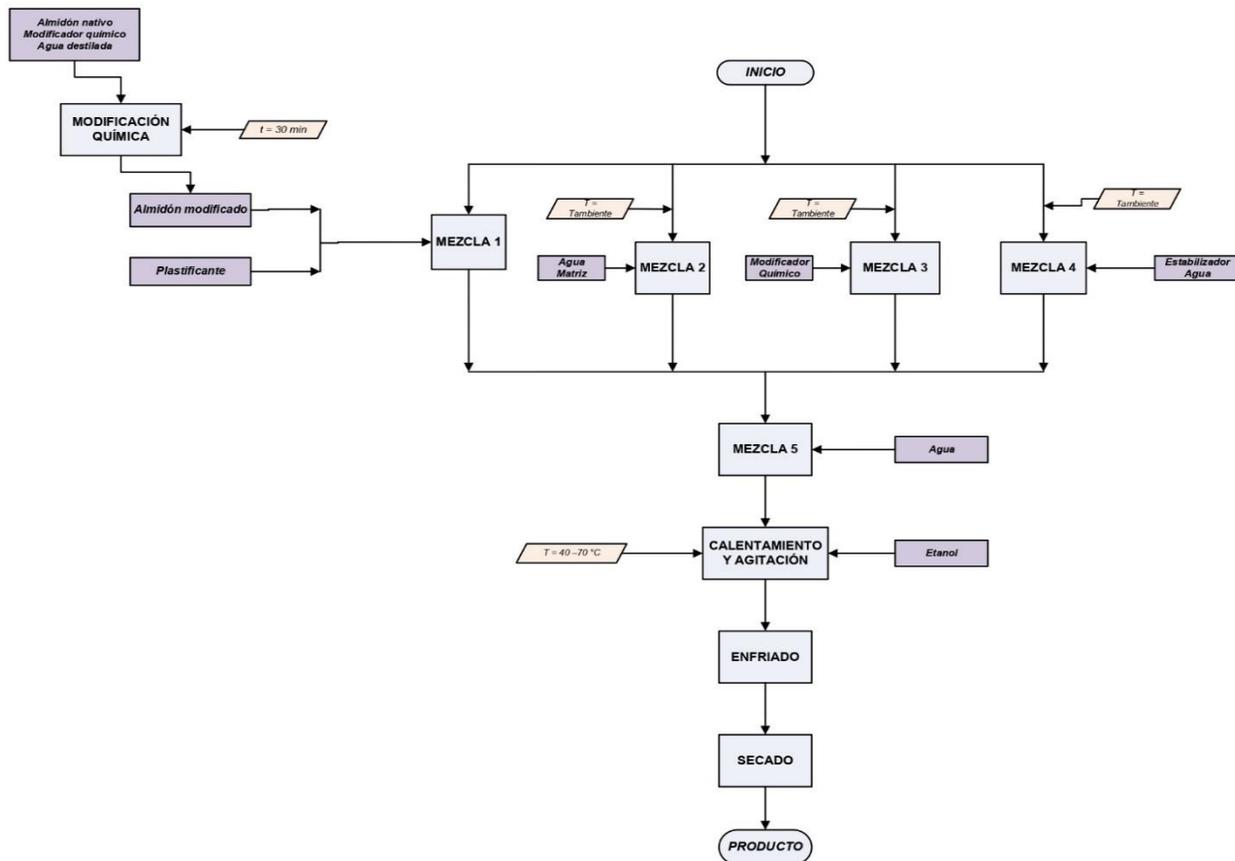
En algunos estudios realizados se agregaron fibras como el bagazo de caña de azúcar y la peladilla de espárrago buscando que estos le aportaran cierta rigidez al producto obtenido, pero se concluye que la flexibilidad del biopolímero puede aumentar hasta un 30% dependiendo de la fibra que se escoja como aditivo en el proceso. En otros estudios se emplearon materiales como pellets de poliéster amida, como complemento a la mezcla primaria de glicerol, agua y almidón, sin embargo cabe resaltar que este tipo de componente resulta ser bastante costoso a pesar de sus resultados satisfactorios en la matriz polimérica; también, se estudió la adición de materias como el Celocell (hidroxi-etil-celulosa) y el Alcohol polivinílico (PVA), que son más accesibles en el mercado y además arrojaron resultados satisfactorios en las pruebas mecánicas aplicadas a la muestra de biopolímero<sup>[13]</sup>. También, se tuvo en cuenta la publicación “Blends of thermoplastic and polyester amide” que plantea la metodología de una mezcla primaria de almidón, agua y glicerina y como aditivo una poliésteramida (BAK) desarrollada por la compañía Bayer. En este caso, el almidón se mantuvo en una proporción del 50% de la mezcla y se realizaron experimentos en los cuales se varía la cantidad de glicerol y agua, teniendo como resultado que la mejor relación entre las materias primas fue de 74% de almidón, 10% glicerol y 16% de BAK, lo que mejora la permeabilidad y el módulo de elasticidad a diferentes temperaturas, y además, el material se sometió a un rango de temperaturas entre -57°C y 100°C <sup>[6]</sup>. De este modo se evidencia que en varios estudios en los que se emplea este método como el más óptimo para la obtención del bioplástico

se añadieron diferentes materias primas como estabilizadores químicos, etanol y otros compuestos que contribuyen a la correcta formación del bioplástico y la corrección de sus propiedades mecánicas en comparación a otros procesos estudiados.

Así, se concluye que este proceso eleva sus costos por el aumento en la cantidad de materias primas pero reduce los tiempos de producción, mejora la apariencia del bioplástico y genera mejoras en las propiedades mecánicas de la película bioplástica obtenida, generando cierta competitividad con los plásticos convencionales (derivados del petróleo)<sup>[3]</sup>.

**Figura 7.**

*Proceso Matriz reforzada para obtención de un bioplástico.*



**Nota.** La figura muestra el proceso de obtención de una película bioplástica a nivel

laboratorio empleando el proceso de matriz reforzada, teniendo en cuenta las condiciones de operación, materias primas empleadas y etapas adicionales.

### **1.3.3 Proceso con Almidón Modificado**

Este método tiene como objetivo principal aplicar, tal como su nombre lo indica, una modificación química al almidón que será empleado como materia prima en la obtención de un bioplástico. Este proceso consiste en la sustitución de hidrógenos presentes en los grupos hidroxilos de la molécula de amilosa con el fin de obtener una película bioplástica con mejores características mecánicas, como la resistencia, dureza, permeabilidad y otras propiedades importantes de los polímeros. En comparación con el primer proceso de producción mencionado, este cuenta con una etapa adicional, la cual se realiza por medio de acilación o termoformado; la acilación del almidón se desarrolla a partir de la esterificación de este empleando sustancias químicas como el anhídrido acético, obteniendo como resultado un nuevo porcentaje de grupos acetilos, un grado de sustitución de hidrógenos presentes en el almidón y también, cambios en el contenido de amilosa y el grado de cristalinidad de la molécula modificada, para así encontrar que, los almidones acetilados con un grado de sustitución bajo (GS) son potencialmente usados en la industria alimentaria debido a que brinda consistencia, textura y durabilidad, por otro lado, las moléculas con alto grado de sustitución (GH) se utilizan como sustitutos en la producción/obtención de termoplásticos.<sup>[17]</sup>

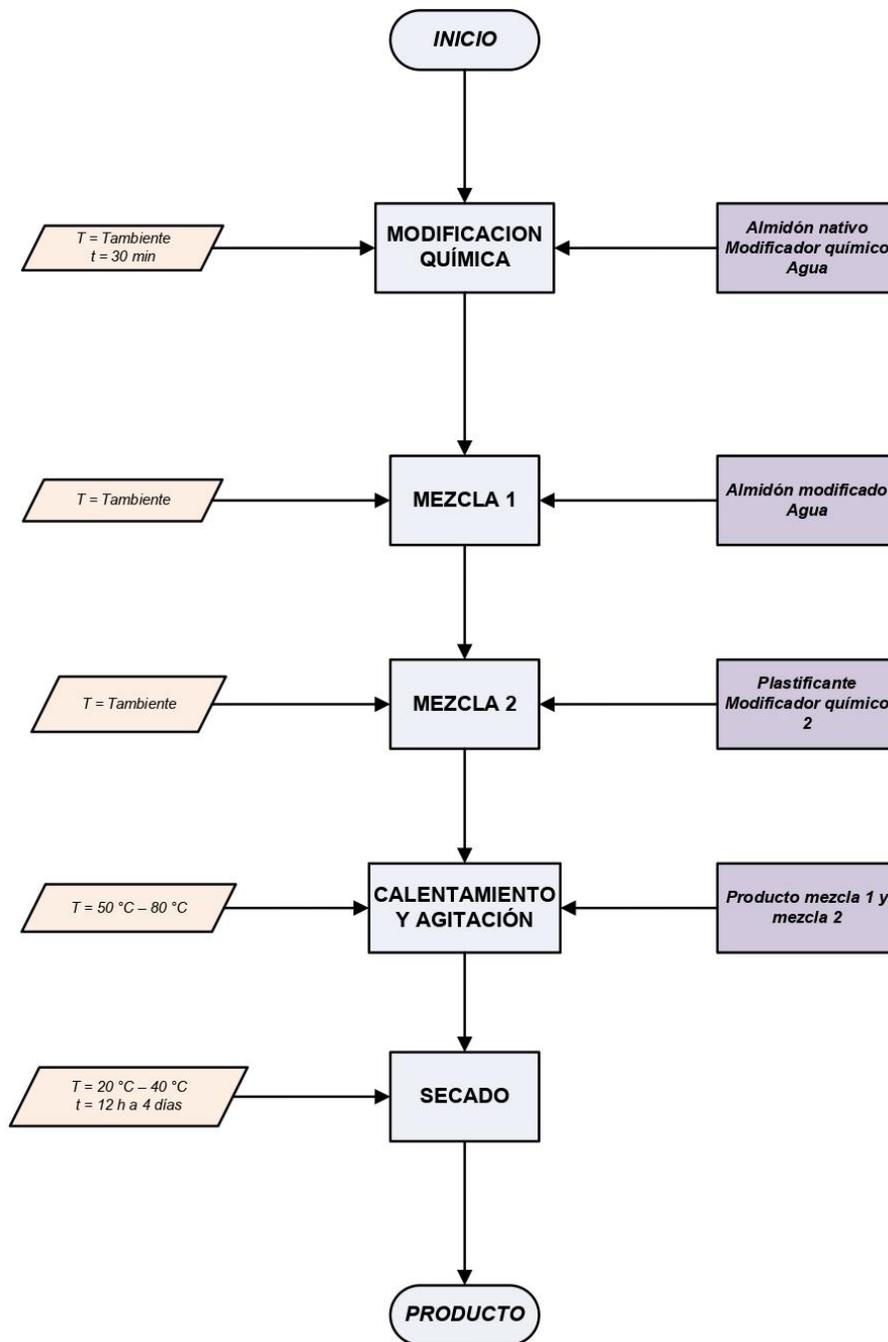
En algunos estudios realizados sobre la modificación química del almidón, se realiza una hidratación previa al almidón con agua destilada y a este se le agrega el agente modificador, buscando que reaccione para obtener el cambio químico y posteriormente se realiza un lavado con agua y etanol para eliminar el exceso del agente utilizado; el pH de cada almidón depende del grado de sustitución de hidrógenos que se requiera (alto o bajo). El proceso conlleva, además, la centrifugación de la mezcla y secado de la misma durante 8 horas para eliminar el exceso de humedad del almidón obtenido, y con el almidón modificado, generalmente con GS, se procede a la obtención del bioplástico el cual presentó resultados favorables en cuanto a la gelatinización de la mezcla de

materias primas, además, de una disminución en la deformación del material y la ausencia de fallas en el proceso de laminación, todo esto si se realiza una comparación con los productos obtenidos en el primer proceso descrito en la sección 2.1.1. A la película bioplástica obtenida a partir de este almidón se le recomienda añadir algún tipo de plastificante, además de la glicerina que también cumple con la función de hidratar el polímero, de tal manera que éste mejore las propiedades finales del producto; de acuerdo, a otro tipo de metodologías para modificar el almidón y obtener el bioplástico, se encuentra que los aditivos que faciliten la gelatinización del almidón no deben exceder el 20% del peso total del producto, con el fin de tener una película que cumpla con los valores mínimos establecidos en las normas ASTM.<sup>[36]</sup>

De esta manera se resume que, el proceso de termoformado o termo-compresión para la modificación del almidón resulta ser un proceso bastante costoso, en comparación con la acilación química del almidón que resulta ser un proceso que ocurre en 50 y 65 minutos, sin tener en cuenta el tiempo de secado que podría ser aproximadamente durante 8 horas, es decir, se puede realizar a nivel laboratorio; por otro lado; la obtención del bioplástico lleva entre 20 y 25 minutos, más el tiempo de secado que depende del grosor de la película, generalmente toma entre 12 a 96 horas y en cuanto al acceso a las materias primas empleadas en este proceso, este es controlado debido a que varias de estas tienen cierta restricción.

**Figura 8.**

*Proceso Almidón modificado para obtención de un bioplástico.*



**Nota.** La figura muestra el proceso de obtención de una película bioplástica a nivel laboratorio empleando el proceso denominado como almidón modificado.

## **1.4 Matriz de selección de proceso**

Las matrices de selección establecen una correlación entre el producto, el proceso productivo, las ventajas y desventajas de éstos, a través de este tipo de matrices se evalúan las condiciones de operación más influyentes durante el proceso, las características más relevantes de cada uno y las del producto esperado y en algunas ocasiones, se evalúa la competitividad del resultado del proceso seleccionado de tal manera que se garantice un proceso de producción sostenible, accesible y que asegure un producto que cumple con las necesidades y requerimiento establecidos. Las matrices de selección se plantean dependiendo de las necesidades de análisis, como por ejemplo la matriz de selección de procesos críticos permite seleccionar procesos críticos que requieren un mayor control y que permite establecer las ventajas competitivas del producto a obtener y el nivel de impacto; por otro lado, Hayer y Weelwright (1984)<sup>[19]</sup> plantearon una matriz de Producto-Proceso en la que se relacionan el tipo de producto y el tipo de proceso productivo a emplear, así como el nivel de coste unitario para cada uno de los productos con la cual clasificaron procesos productivos de acuerdo a diferentes factores como tecnología, estructuración de proceso productivo, flexibilidad del proceso y otros. Finalmente, se presentan otros métodos de análisis cuantitativo que ponderan la influencia de diferentes factores en el proceso, evaluando diferentes alternativas que cumplen con el requerimiento establecido para el producto, generando así, una jerarquía a través de la cual se facilita la selección del proceso más adecuado.

### **1.4.1 Matriz de Factores Ponderados**

Esta matriz en particular es un método a través del cual se realiza un análisis cuantitativo en el que se comparan entre sí las diferentes alternativas y factores de gran importancia en el proceso, como la calidad y tiempos de producción, esto con el fin de determinar las de mayor influencia en el producto. Para llevar este método de ponderación a cabo se genera una calificación a los factores relevantes en el proceso presentando ventajas y desventajas de cada una de las opciones consideradas, de la siguiente manera:

- Realizar un listado de los factores más importantes del proceso.
- Asignar a los factores un valor relativo para obtener un valor total de 100 puntos.
- Calificar individualmente cada alternativa, generalmente, en una escala de 0 a 10.
- Multiplicar las calificaciones de cada alternativa con el valor relativo de los factores y sumar los resultados encontrados.
- Seleccionar la alternativa que obtenga el mayor puntaje ponderado.

Para el caso específico de este estudio, se establece como objetivo principal en el desarrollar esta matriz de factores ponderados para la selección del proceso de obtención de una película bioplástica en el cual las características principales del producto como la calidad final y sus propiedades mecánicas se consideran un factor de alta importancia, a su vez, se tienen en cuenta factores que representan una importancia media durante el proceso que son aquellos que generan un valor agregado a la influencia de los primeros factores analizados, estos podrían ser por ejemplo los equipos empleados, la accesibilidad de la materia prima que será empleada en el proceso y el tiempo que se tarda en obtener el producto esperado.<sup>[25][15]</sup>

2.2.1.1. Factores de alta importancia. La calidad del producto obtenido es un factor que implica realizar comparaciones entre las características de la película bioplástica obtenida y las propiedades que poseen los polímeros convencionales, esto se realiza con el fin de garantizar un producto que sea versátil a nivel industrial y comercial. Las características importantes a tener en cuenta durante esta comparación son las propiedades mecánicas como: elongación y resistencia a la tracción, y propiedades visuales como: textura y color; por esto, la calidad de la película bioplástica obtenida se establece como un factor de alta importancia pues permitirá diferenciar cada una de estas características entre cada material.

**Tabla 1.**

*Factor de alta importancia.*

<b>FACTOR</b>	<b>PESO</b>
<b>Calidad del bioplástico obtenido</b>	60

**Nota.** Esta tabla muestra la ponderación otorgada dentro de la matriz de factores poderados al factor de alta importancia.

Este factor estará relacionado directamente con las normas ASTM D-882 y ASTM D-638 que son aquellas bajo las cuales se rigen las características de los materiales plásticos y establecen el método de ensayo estándar de las propiedades de tracción de láminas de plástico delgadas, esto con el fin de comparar las propiedades finales del bioplástico en el proceso seleccionado con otros materiales convencionales.

2.2.1.1. Factores de media importancia. Estos factores le aportan una mayor robustez a la matriz de selección, tienen un valor menor a los de alta importancia porque estos factores intervienen en la elección de un proceso ya que al desarrollarlo a nivel industrial debe ser sencillo y económico adquirir los equipos del proceso, además el tiempo de producción también es importante pues esto determina, en cierta medida, la capacidad de producción en un ambiente industrial y por último el acceso a la materia prima también es un ítem importante para la producción define la capacidad de producción y la calidad del producto.

Para el desarrollo del proceso a nivel experimental, se deben tener en cuenta la capacidad e infraestructura de los laboratorios por lo cual se clasifican así:

- Laboratorios de procesos fisicoquímicos: cuentan con material básico como objetos de vidrio (pipetas, beakers, equipo de titulación, vidrio de reloj, y otros), pesa analítica, y se pueden llevar a cabo operaciones comunes (calentamiento, mezclado, etc.).
- Laboratorios con pruebas de calidad: en el cual se encuentra material más especializado con el que pueden realizar procesos como centrifugado, tamizaje, molienda y demás.

- Laboratorios de investigación y desarrollo: el cual debe estar equipado con instrumentos de medición y muestreo los cuales deben estar certificados, además de lo anterior, el equipo computacional a utilizar debe estar equipado con un software capaz de alcanzar la precisión y exactitud para cualquier prueba requerida.

Según la revisión hecha a cada uno de los procesos a tener en cuenta en este estudio cada uno requiere equipos y materiales diferentes, es por esto que a cada proceso se le asigna un tipo de laboratorio y por ende, un puntaje según la complejidad de los equipos a necesitar en el proceso, de este modo, el proceso que requiera únicamente un laboratorio en el cual se puedan realizar procesos fisicoquímicos recibirá un puntaje de cero (0), el proceso que requiera equipos de una complejidad media (como los encontrados en los laboratorios con pruebas de calidad) recibirá una puntuación de cinco (5) y el proceso que requiera equipos correspondientes a los laboratorios de investigación y desarrollo recibirán un puntaje de (10).

De igual modo, dentro de los factores de media importancia, se tiene en cuenta la facilidad del acceso a la materia prima en el cual se tiene en cuenta si ésta se ve afectada por restricciones en el territorio Colombiano como el decreto 2897 de 2011, pues existen sustancias las cuales su distribución es controlada y requieren de autorizaciones especiales para su comercialización o uso. A este factor se le asignan puntuaciones que van desde cero (0) que representa las materias primas que su comercialización sea prohibida o restringida, cinco (5) para cualquier material o reactivo que requiera permisos para su adquisición pero aún así sea comercializable y diez (10) para las materias primas que no tengan ningún tipo de restricción en cuanto a su venta.

A través de la revisión de los procesos de otros autores se concluyó que, en promedio, la producción de un plástico convencional tarda más o menos 30 horas y el proceso de obtención de un bioplástico es de aproximadamente unas 12 a 24 horas, por lo tanto, y al tener la intención de tener un resultado comparable al proceso de obtención de materiales poliméricos convencionales, se establece que los tiempos de producción deben encontrarse entre el rango de mayor y menor tiempo estudiado; por esto, los procesos que tarden 30 horas o más recibirán una puntuación de cero (0) en la matriz de factores de importancia media, los procesos que se encuentren dentro del rango de 30

a 12 horas recibirán un puntaje de cinco (5) y los procesos que se desarrollen en un tiempo menor o igual a 12 horas recibirán una calificación de diez (10).

**Tabla 2.**

*Factor de importancia media*

<b>FACTOR</b>	<b>PESO</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
<b>Equipos de proceso</b>	10	Laboratorio proceso químicos = 10 Laboratorio Calidad = 5 Laboratorio investigación y desarrollo = 0
<b>Tiempos de producción</b>	10	>30 h = 0 <12 h = 10 12 h < Tiempo < 30 = 5
<b>Materia prima</b>	20	MP Importada = 0 MP restricciones = 5 MP sin restricción = 10

**Nota.** Esta tabla muestra la calificación otorgada dentro de la matriz de factores ponderados al factor de media importancia.

**Tabla 3.**

*Calificación de procesos*

<b>PROCESO</b>	<b>EQUIPOS</b>	<b>TIEMPO PRODUCCIÓN</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>
<b>Casting</b>	10	0	10
<b>Matriz reforzada</b>	5	5	5
<b>Almidón Modificado</b>	5	5	5

**Nota.** Esta tabla muestra la calificación otorgada a los procesos involucrados en el estudio de la obtención de una película bioplástica.

**Tabla 4.***Matriz de factores ponderados*

FACTORES		ALTERNATIVAS					
Factor	Peso	Calificación proceso 1	Peso * Calificación	Calificación proceso 2	Peso * Calificación	Calificación proceso 3	Peso * Calificación
Calidad del bioplástico	60%	1	0,6	10	6	5	3
Equipos de proceso	10%	10	1	5	0,5	5	0,5
Tiempo de producción	10%	0	0	5	0,5	5	0,5
Materia prima	20%	10	2	5	1	5	1
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>Total</b>	<b>3,6</b>	<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>Total</b>	<b>5</b>

**Nota.** Esta tabla muestra el total de la ponderación de cada factor y proceso involucrado en el estudio.

2.2.1.2. Proceso definitivo. El análisis realizado por medio de la matriz de selección de factores ponderados, con la cual se otorgó una puntuación a cada uno de los procesos estudiados, se selecciona finalmente el proceso más adecuado para la obtención de una película bioplástica a nivel laboratorio teniendo en cuenta varios criterios como calidad esperada, equipos a emplear en cada etapa del proceso, el tiempo que tarda la obtención del producto y la accesibilidad a las materias primas. De este modo al revisar diferentes estudios se establecen las variables, condiciones y resultados más relevantes de cada método, en los cuales se establecen diseños de experimentos que permitirán evaluar el impacto sobre el producto final de diferentes condiciones a tener en cuenta y así, elegir la composición más óptima que lleve a la obtención de un mejor producto.

En relación a lo anterior se encontró que el proceso conocido como matriz reforzada resultó ser, debido a sus resultados evidenciados por diferentes autores, el más óptimo para obtener este tipo de películas, pues a pesar de tener varios requerimientos importantes en cuanto a equipos y materias primas comparando con los otros procesos estudiados, el resultado final encontrado en los estudios que se tuvieron en cuenta, es

un producto altamente competitivo a nivel industrial y con características propias y comparables frente a los polímeros convencionales.

### **2.2.2. Esquema de trabajo, materias primas**

La materia prima principal para obtener la película bioplástica será el almidón extraído de las cáscaras y el cotiledón de la semilla del mango, que se consideran generalmente como residuos; el almidón extraído de la almendra del mango contiene un 99,35% de carbohidratos, 0,11% de proteína, 0,52% de grasa, 0,01% de fibra y 0,01% de cenizas, además, de no poseer taninos ni microorganismos tóxicos que puedan alterar la preparación de alimentos<sup>[35]</sup>, generalmente, este almidón contiene un porcentaje de amilosa de 39,67%. Para su extracción, es importante tener en cuenta que se emplean sustancias químicas como el ácido ascórbico y bisulfito de sodio con el fin de facilitar la extracción y evitar el daño del almidón por agentes microbianos externos.

Por otro lado, se tienen en cuenta las materiales que cumplirán funciones como dar consistencia a la película de bioplástico como una solución de ácido acético al 5% que actúa como modificador del almidón natural extraído disminuyendo la fragilidad de los gránulos y además estabiliza el pH de la película esperada, también se emplearán alcohol polivinílico (PVA) y glicerina como agentes plastificantes y aditivos con los cuales se busca suplir cualquier tipo de deficiencia que pueda presentar al material en su matriz y de este modo mejorar sus propiedades mecánicas. Así, se tiene en cuenta que la preparación del bioplástico a través del proceso de matriz reforzada constará de dos etapas globales: la extracción del almidón y la preparación del biopolímero, estas a su vez estarán divididas en etapas diferentes con la finalidad de asegurar su correcta ejecución y control de cada variable involucrada en la preparación del biopolímero.

La extracción de almidón de la semilla de mango se realizará a través de dos métodos diferentes con el fin de comparar los rendimientos obtenidos y emplearlos en las diferentes formulaciones de bioplástico, contrario a la obtención del almidón que se extrae de las cáscaras de mango que se realiza a través de un método único; adicionalmente, el proceso de producción de la película bioplástica se dividirá en secciones en las cuales se prepararán pre-mezclas de materias primas y se irán

añadieron hasta conseguir el biopolímero esperado. De este modo, la primera pre-mezcla está constituida por almidón, ácido acético 5% y la segunda pre-mezcla está comprendida por los agentes plastificantes, es decir, la glicerina y el alcohol polivinílico (PVA). En esta primera etapa del proceso las pre-mezclas se realizan a temperatura ambiente y sin generar agitación alguna, mientras que la segunda etapa del proceso se realiza a un rango de temperatura de 50 a 70 °C añadiendo en primer lugar un volumen de agua destilada, seguido de la primera pre-mezcla y en último lugar la segunda pre-mezcla, esta última etapa se debe realizar manteniendo agitación constante con el fin de estimular la mezcla de todos los componentes de la película bioplástica y facilitando su gelatinización. De acuerdo a los procesos revisados en los numerales anteriores, se tiene en cuenta el desarrollo del proceso seleccionado con algunas modificaciones y se realizan las etapas establecidas en la Figura 9 buscando la mayor efectividad en el proceso de síntesis de la película bioplástica esperada.

**Tabla 5.**

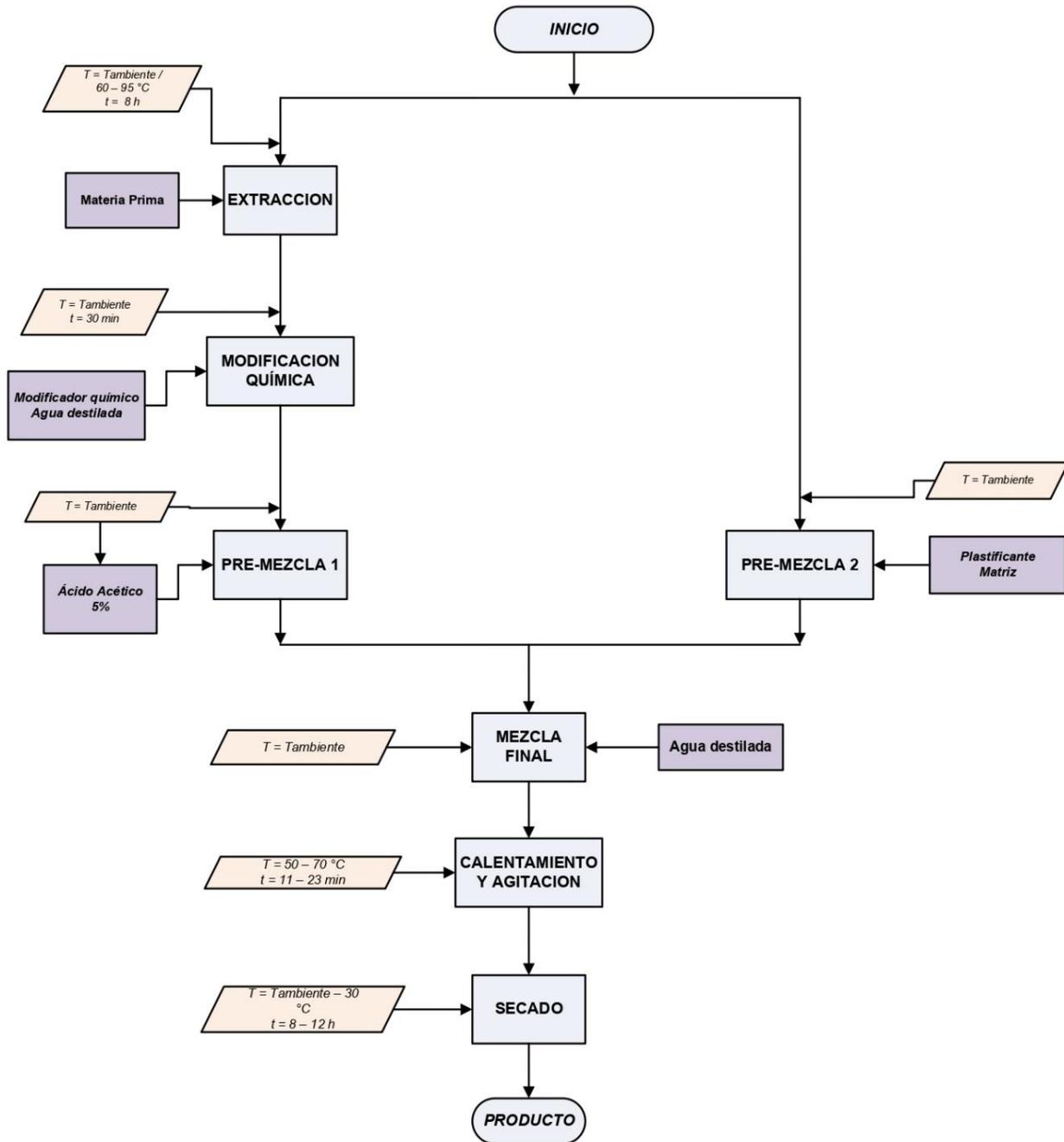
*Materias primas del proceso*

<b>PROCESO</b>	<b>MATERIA PRIMA</b>
<b><i>Extracción de almidón semillas y cáscara de mango.</i></b>	Cáscaras de mango. Semillas de mango secas. Bisulfito de sodio 0,16% v/v. Agua desionizada. Ácido ascórbico 4% v/v. Ácido acético 5% v/v.
<b><i>Obtención película bioplástica.</i></b>	Glicerina natural. Ácido acético 5% v/v. Agua desionizada. Alcohol polivinílico (PVA). Almidón modificado.

**Nota.** Esta tabla presenta las materias primas involucradas en cada uno de los subprocesos a tener en cuenta durante la obtención de la película bioplástica.

**Figura 9.**

*Esquema de trabajo obtención de bioplástico*



**Nota.** La figura muestra el esquema de trabajo para la obtención de una película bioplástica a partir del método seleccionado.

### **3. DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE FORMULACIÓN MÁS APROPIADOS PARA LA OBTENCIÓN DE UNA PELÍCULA BIOPLÁSTICA**

A través de la revisión bibliográfica se permite establecer una correcta comparación entre los diferentes procesos posibles para la obtención de una película bioplástica y los métodos de extracción de almidón, empleando cualquier material orgánico como materia prima; de este modo en el siguiente capítulo, luego de evaluar cada proceso opcional y seleccionar uno de estos, se pretenden establecer las etapas, parámetros y variables que afecten directamente el proceso de obtención de una película bioplástica, y así mismo, encontrar la formulación correcta que relacione la composición de almidón, el contenido de aditivos y demás componentes que pueden ser determinantes para las características finales de la película esperada. Dado que las características finales se ven directamente afectadas por las condiciones anteriormente mencionadas, y que además, se pretende obtener resultados que sean comparables cuantitativamente tanto en la obtención de almidón en relación a la cantidad de materia prima inicial, y en las propiedades mecánicas de la película bioplástica obtenida experimentalmente se toman en cuenta normas, como la ASTM D-882 y la ASTM D-638 para poder evaluar dichas características, y también se realizarán los cálculos pertinentes para encontrar rendimiento de producción de almidón a partir de residuos de mango, que es la materia prima central de este trabajo.

#### **3.1. Materias primas**

El proceso de síntesis de una película bioplástica, ya sea a nivel laboratorio o a nivel industrial, está ligado directamente a otros procesos que tienen que ver con la obtención de materias primas, en este caso del almidón que es el componente principal de la mezcla final con la cual se espera obtener un biopolímero de alta calidad. Establecer las condiciones correctas de operación para la extracción de estos materiales tendrá una influencia directa en la calidad de la película bioplástica esperada, es por esto que se estudian las condiciones que sean más óptimas en cada operación involucrada en los procesos de extracción y síntesis permitiendo tener un control más riguroso en cada una

de ellas, garantizando un resultado favorable en cada operación y disminuyendo las pérdidas que se puedan generar teniendo en cuenta la cantidad de materia prima empleada inicialmente.

### **3.1.1. Selección de Frutos**

Ya que durante los diferentes subprocesos involucrados en la síntesis del bioplástico se tiene en cuenta que las materias primas tienen un impacto importante en las características finales de la película esperada, se tiene en cuenta que la selección de los frutos, que serán los precursores del almidón empleado en la síntesis del biopolímero, es determinante durante todo el desarrollo de las etapas planteadas en este primer proceso a desarrollar. De este modo, en base a la norma NTC 1266, se tiene en cuenta que una correcta selección de los frutos se realiza tomando en cuenta criterios, considerados como requisitos mínimos, que deben cumplir los frutos para ser aptos para su distribución, almacenamiento y consumo<sup>[44]</sup>; así, se entiende que entre estos criterios se evalúa la madurez de cada fruto, los olores y sabores, la humedad externa y las características que posean interna y externamente, según la norma, el cuidado durante el desarrollo fisiológico para facilitar la capacidad de maduración y aumentar la resistencia a la manipulación es un factor determinante en la cosecha y selección de los frutos.

Tomando en consideración que los frutos del mango en su grado máximo de madurez desarrollan una cantidad importante de azúcares (glucosa) y luego de pasar este grado comienzan a presentar señales importantes de podredumbre en su cáscara, pulpa y semilla lo que puede afectar el rendimiento del proceso de extracción de almidón del cotiledón, según la norma y su clasificación de los frutos para su distribución, consumo y almacenamiento, los frutos que son aptos para ser empleados en la extracción de almidón de mango son aquellos que se encuentran entre las categorías EXTRA y CATEGORÍA I, pues en estas dos categorías las imperfecciones y el daño en la superficie de la fruta no supera el 5% lo que indica que sus residuos también se encuentran en óptimas condiciones para ser procesados.

### **3.1.2. Extracción de Almidón**

Según la revisión bibliográfica, existen varios procesos para realizar una correcta obtención de almidón a partir de materias primas como frutas, cereales y tubérculos por lo que, para la extracción del almidón de los residuos de mango, se tienen en cuenta procedimientos diferentes para generar resultados comparables y que permitan el máximo aprovechamiento cada uno de los componentes del fruto del mango. De este modo, cada método requiere de condiciones específicas en cada una de sus etapas, pero entre las operaciones comunes que se manejan en cada método se encuentra que el secado del producto final, proceso que se realiza en un horno de bandejas pues se espera que a través de este equipo el secado sea rápido y homogéneo retirando la mayor cantidad de humedad posible, de tal forma que el aire caliente permita conseguir un polvo más fino y con mejores propiedades; aunque este tipo de operaciones también se pueden realizar en un ambiente abierto pero de este modo el proceso de secado tarda más y no se puede controlar la absorción de humedad del almidón. Por otro lado, también se emplean equipos de separación como la centrífuga que es una manera eficiente y rápida de separar los sólidos que se encuentran suspendidos en un medio líquido y la filtración por gravedad; a nivel experimental se puede comprobar que el método que se emplea para la obtención de almidón puede influir de manera significativa en el rendimiento de los almidones obtenidos y en las propiedades del bioplástico obtenido a nivel laboratorio.

3.1.2.1. Secado. Los procesos de extracción de almidón de alguna fruta, semilla o tubérculo pueden estar o no completamente mecanizados, por lo que las condiciones son cambiantes dependiendo del método que se quiera aplicar, en el caso de las etapas de secado para el almidón extraído se pueden realizar de manera mecánica en secadores neumáticos que tienen un tiempo de residencia corto y por ende una rápida evaporación del agua, en este caso el proceso se realiza entre los 120 °C y los 170 °C reduciendo los periodos de tiempo en los que se ejecutará el secado y garantizando que no se absorberá humedad durante éste, previniendo la gelatinización prematura en el proceso con cualquier contenido de agua que pueda ingresar a la operación; también se

tiene en cuenta el secado semi-mecanizado y el totalmente artesanal, en el primero el almidón se seca durante un periodo de tiempo al sol pero se remueve cada cierto periodo de tiempo con la finalidad de remover la humedad que se contiene en el proceso y posteriormente se realiza un proceso de molienda y tamizado, en comparación al segundo que se realiza de manera artesanal en techos hechos a partir de láminas de zinc que se encuentran en estructuras de madera, por lo que se convierte en un proceso demasiado extenso e ineficiente pues al estar expuesto al aire libre no es posible controlar las condiciones climáticas durante todo el tiempo que se exponga el almidón y además, se tienen en cuenta las pérdidas de almidón por arrastre del viento<sup>[22]</sup>.

De esta manera, se entiende que el proceso de secado tiene un alto impacto en la eficiencia del método a realizar, pues al controlar las condiciones de temperatura a las que se ejecutará el proceso se puede optimizar el rendimiento del proceso de extracción y se pueden evitar las pérdidas que se pueden presentar si se desarrolla el proceso a condiciones ambientales, como se mencionó anteriormente. A nivel laboratorio, a pesar de ser el método más antiguo, se plantea la implementación de un horno de bandejas ya que es un equipo cuya implementación aún es bastante común en la actualidad, además de ser un equipo económico el cual se puede programar a altas temperaturas e impide el paso de la humedad al proceso con flujos transversales de aire caliente, con este equipo se reduce el tiempo que tarda el proceso en completarse y puede desarrollar procesos al vacío o permitiendo el paso del flujo de calor de forma normal o forzada. Para comprobar la efectividad del proceso es importante tener en cuenta el grado de humedad resultante luego del paso del almidón por el equipo dispuesto para el secado, mediante la Ecuación 1 presentada a continuación:

### Ecuación 1.

*Porcentaje de humedad.*

$$H = \left( \frac{P_{SH} - P_{SS}}{P_{SS}} \right) \times 100 \quad Ec. 1$$

Donde:

H = Porcentaje de humedad

$P_{SH}$  = Peso del sólido húmedo (kg).

$P_{SS}$  = Peso del sólido seco (kg).

**Nota.** La ecuación presentada muestra las variables a tener en cuenta para el cálculo de la humedad en la muestra. Tomado de: Universidad de las Américas Puebla (s.f.) “A.18 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD” [En línea] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/laec/maldonado\\_z\\_r/apendiceQ.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/laec/maldonado_z_r/apendiceQ.pdf) [Acceso Octubre 22, 2021].

**3.1.2.2.** Rendimiento. Para tener una idea más clara de la rentabilidad y eficiencia del proceso de extracción de almidones, teniendo en cuenta la cantidad de materia prima empleada, se tiene en cuenta que el porcentaje de rendimiento que tienen estos procesos en este caso, la extracción de almidones, es la fracción (%) que resulta después de cada operación unitaria considerando que la materia inicial se encuentra al 100% de composición de este. De esta manera se establece que esta relación se plantea a través de la Ecuación 2 presentada a continuación:

## Ecuación 2.

*Porcentaje de rendimiento*

$$\text{Rendimiento} = \left( \frac{\text{Masa final de almidón}}{\text{Masa inicial de materia prima}} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

**Nota.** La ecuación presentada muestra las variables a tener en cuenta para el cálculo del rendimiento en la muestra frente a la cantidad de materia prima empleada. Tomado de: BIRTLH. “2.1. Cálculo de rendimiento de las materias primas” [En línea] [http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/COC/PREE/PREE02/es\\_COC\\_PREE02\\_Contenidos/website\\_21\\_clculo\\_de\\_rendimiento\\_de\\_las\\_materias\\_primas.html](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/COC/PREE/PREE02/es_COC_PREE02_Contenidos/website_21_clculo_de_rendimiento_de_las_materias_primas.html) [Acceso Octubre 22, 2021].

Considerando que se emplee la ecuación anterior, se puede estudiar también la viabilidad del proceso pues teóricamente el fruto o cereal empleado para la extracción de almidón puede contener una significativa cantidad de fibra, proteína y demás componentes, que son a nivel nutricional bastante importantes, pero que a nivel industrial su extracción puede no ser eficiente y tenga repercusiones en el proceso aplicado.

### 3.2. Otras operaciones unitarias involucradas

Las operaciones unitarias importantes empleadas en el procesamiento de la materia prima y demás componentes del bioplástico comprenden la separación por medio de centrifugación, decantación, filtración por efectos de gravedad, molienda y tamizado. La separación por centrifugación está basada en el uso de la fuerza centrífuga que conseguir la separación o decantación de los sólidos que se encuentran suspendidos en una solución líquida, este tipo de proceso es comúnmente empleado debido a la alta eficiencia de operación y a los bajos costos de operación, en este caso se deben controlar las revoluciones a las que se centrifuga la mezcla durante un tiempo prolongado para conseguir una mayor cantidad de sedimento, estas condiciones de proceso se

tomaron en cuenta a partir del método desarrollado por Ortiz (2019) [29]. Las demás operaciones unitarias ejecutadas en el proceso se realizan a condiciones ambientales pues estas no requieren un control riguroso de humedad, temperatura o presión pues estos procesos solamente consisten en la pulverización del almidón y filtración del agua o las soluciones presentes en el proceso.

### **3.3. Formulación bioplástico**

Durante la formulación de una película bioplástica que posea características comparables a las de un polímero sintetizado convencionalmente es importante tener en cuenta que la temperatura a la que se alcanza la gelatinización tiene una relación directamente proporcional a la concentración de almidón a emplear en cada muestra, además, con el fin de suplir cualquier falencia en la estructura del material polimérico se busca un material que refuerce la matriz de este, como el Alcohol Polivinílico (PVA). En el proceso de gelatinización de la mezcla final, es importante tener en cuenta que la agitación aplicada se hace de forma manual y continua, con la finalidad de facilitar la evaporación del agua que se encuentra formando parte de las pre-mezclas realizadas y además, asegurar la homogenización de todos los materiales que forman parte del biopolímero; por esto, se debe garantizar el control de temperatura a la que se someterá la mezcla, tiempo de gelatinización en las diferentes formulaciones establecidas y las condiciones a las que se secará el producto con el fin de garantizar la evaporación completa del agua y que el grado de humedad sea realmente bajo y poder tener una película con propiedades capaces de resistir pruebas de tracción y dureza.

#### **3.3.1. Diseño de experimentos**

En los procesos previamente revisados, los cuales fueron tomados como referencia para realizar este estudio, se realizan diferentes pruebas con la finalidad de determinar la formulación más óptima para los tipos de bioplásticos estudiados, de este modo se encuentra que, en algunos de ellos evalúan el impacto que tiene la variación de factores como la concentración de almidón, el contenido y el tipo de aditivo empleado en el

proceso de síntesis, la temperatura de operación para lograr la gelatinización, el tiempo y condiciones de secado del producto; al finalizar, se realizan pruebas de resistencia mecánica a las películas obtenidas con el fin de analizar si estos productos podrían ser aptos para ser empleados a nivel industrial y de este modo concluir cuál de las formulaciones aplicadas es la de mejores características.

Para tener una visión más clara sobre la preparación de la película de bioplástico a partir de almidón extraído de residuos de mango, se plantea un diseño de experimentos de dos factores, tres niveles y una réplica por cada experimento realizado (con el fin de tener resultados representativos para cada análisis), en el cual se toma como primera variable la concentración de almidón que se va a emplear con valores entre el 10%, 40% y 70% y como segunda variable la temperatura a la cual se espera que suceda la gelatinización en valores entre 50°C, 60°C y 70°C, así, el resultado de cada una de las formulaciones se evaluará mediante ensayos de resistencia mecánica y dureza, siendo ésta la variable de respuesta que se tiene en cuenta para realizar una comparación de las propiedades del bioplástico con los plásticos convencionales. De acuerdo con el proceso a desarrollar se establecen los equipos que se verán involucrados en las etapas planteadas, como se ve en el Diagrama 4, y las condiciones de operación a las que debe estar cada uno de ellos para obtener un producto de alta calidad como es esperado, esto se evidencia en la tabla 6.

**Tabla 6.**

*Condiciones de operación y equipos de proceso*

<b>EQUIPO / MATERIAL</b>	<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>	<b>IMAGEN</b>
Horno de bandejas WTCbinder	<i>Secado</i> T = 30 °C a 95 °C t = 2 horas a 8 horas	
Centrífuga HERMLE Z230 A	<i>Separación</i> 3000 – 3500 RPM t = 20 min a 25 min	
Planchas de calentamiento DLAB MS-H280-Pro	<i>Calentamiento y gelatinización</i> T = 50 a 70 °C t = 11 min a 23 min	

Mortero	<i>Trituración</i> T = Temperatura ambiente.	
Montaje de vidrio filtrado	<i>Filtración y decantación</i> T = Temperatura ambiente.	

**Nota.** La tabla presentada muestra los equipos empleados en las etapas operativas involucradas en la obtención de una película bioplástica y la extracción de almidón a partir de residuos de mango.

#### **4. SÍNTESIS DE UNA PELÍCULA BIOPLÁSTICA A PARTIR DE ALMIDÓN EXTRAÍDO DE RESIDUOS DE MANGO A ESCALA LABORATORIO**

Como se tuvo en cuenta en los capítulos anteriores, para la obtención de una película de bioplástico la primera etapa importante en el proceso a tener en cuenta es la extracción del almidón a partir de la materia primera a emplear, en este caso lo que se considera como residuos de mango (la cáscara y la semilla), para llegar a esta obtención se pueden emplear diferentes métodos y diferentes reactivos que mejoran características del almidón extraído como el color y la textura de éste<sup>[29]</sup>; generalmente, se realiza una modificación química al almidón generando sustitución en algunas de las moléculas de amilosa o amilopectina que logran que los gránulos de esta materia prima reduzcan su fragilidad y concedan mejores características al biopolímero esperado. Posteriormente, al tener el almidón extraído y modificado, se aplica el método de obtención de bioplástico aplicando las técnicas de autores como Holguin<sup>[20]</sup> que emplea diferentes plastificantes y/o estabilizantes para lograr arreglos en la matriz y, de este modo, obtener una película con mejores características, también se tuvo en cuenta la metodología empleada por Arroyo y otros quienes generaron varios prototipos encontrando una película cuyas propiedades mecánicas puedan ser comparadas con las propiedades de un polímero convencional; así, se plantean variaciones en los métodos encontrados y se plantean las condiciones óptimas de obtención y la formulación del material. De este modo, el tema central de este capítulo es mostrar los procesos empleados para la obtención de la película bioplástica y mostrar sus resultados.

##### **4.1. Obtención de almidón a partir de residuos de mango**

La extracción de los almidones se puede realizar mediante diferentes procesos los cuales constan de etapas diferentes de acondicionamiento y tratamiento de la materia prima, cada uno de estos reciben la influencia de diferentes agentes químicos que modificarán y purificarán las moléculas de amilosa y amilopectina generando como resultado un almidón con una estructura menos frágil y apta para ser empleada en la gelatinización<sup>[20]</sup>.

En este caso, la extracción de almidón mango se realizará a partir de dos materias primas (la cáscara y los cotiledones de la semilla) para de este modo poder establecer una comparación tomando en cuenta sus rendimientos calculados con la *Ecuación 2*; así, también es importante a pesar de diferir en la manera en la que se obtiene el almidón, tener en cuenta que en los procesos de extracción de almidón de fruta es común realizar un tratamiento previo a la materia prima que consiste en el corte y secado previo de los materiales y la remoción de la pulpa, lo que se conoce como acondicionamiento; posterior a su extracción se realizará la modificación química del almidón empleando ácido acético al 5%, que también es el agente que se empleará como agente regulador de pH en la formulación del bioplástico.

#### **4.1.1. Metodologías para la obtención del almidón**

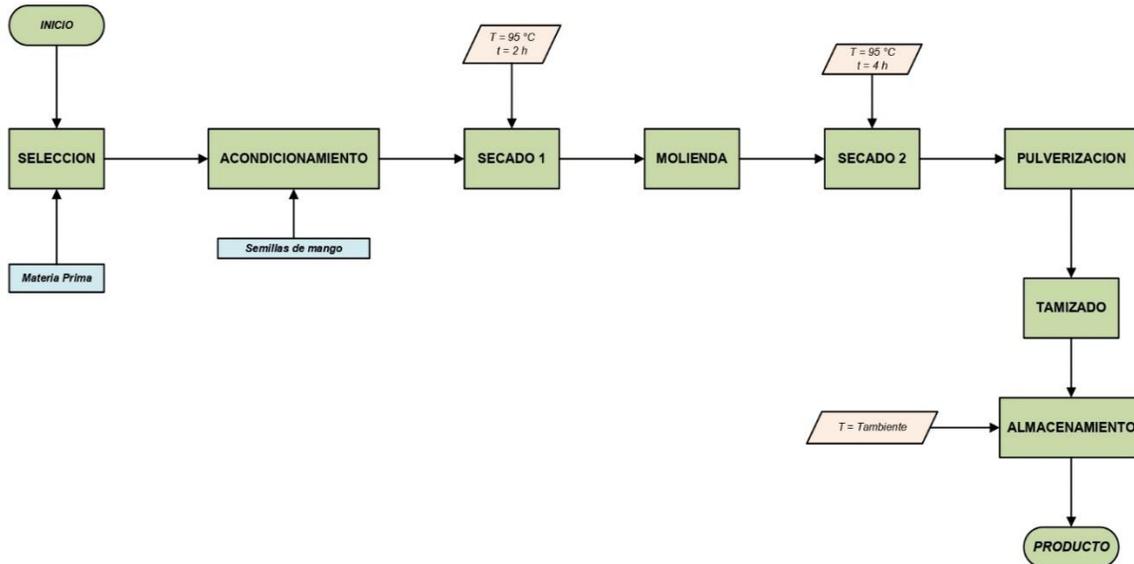
Para el desarrollo de la primera etapa de obtención de almidón a partir de residuos de mango se deben seleccionar los frutos que a simple vista se vean aptos para el consumo y, como se mencionó en el numeral 3.1.1. del capítulo anterior, aquellos que se encuentren en las categorías EXTRA y CATEGORÍA I según se estipula en la norma NTC 1266<sup>[44]</sup>, es decir aquellos que no presenten un grado máximo de madurez y tampoco señales de podredumbre, ya que en los estados previos a este se evidencia mejor calidad de los cotiledones de la semilla de mango y la cáscara presenta mejor apariencia, de este modo la extracción de almidón será mucho más óptima pues los residuos de esta fruta se encuentran en un estado favorable para su procesamiento. Por otro lado, como pretratamiento o acondicionamiento de la materia prima, se debe retirar en su totalidad la cantidad de pulpa presente en la cubierta fibrosa de las semillas y estas se someterán a un tiempo de secado con el fin de remover todo el contenido que se encuentra en el endocarpio, y de este modo lograr una extracción exitosa del cotiledón que se encuentra en el interior, también es importante aclarar que se debe verificar que dicho cotiledón debe estar en condiciones óptimas para su posterior tratamiento, procurando que se encuentre fresco y que no presente manchas o puntos negros, además, tanto las cáscaras como los cotiledones extraídos deben ser seccionados en porciones pequeñas pues de este modo se facilita el proceso de extracción de almidón.

4.1.1.1. Método seco obtención almidón a partir de cotiledones de mango. El método seco de extracción de almidón consiste en, como su nombre lo indica, secar las semillas hasta eliminar la mayor parte de su humedad y triturar la muestra hasta obtener una harina que se someterá a un posterior tamizado y este es el resultado que se emplea como materia prima en el proceso de obtención del bioplástico.

La extracción de almidón de mango a través de este método se realizó tomando en cuenta la metodología descrita por Carrasco y otros (2018) en su documento <sup>[12]</sup> pero realizando algunas variaciones en el proceso, de este modo, después de seleccionar los frutos se retira la pulpa y la cáscara completamente, se lava la semilla para eliminar cualquier otro componente que puedan tener, seguidamente se somete al primer proceso de secado que consiste en ubicar la semilla completa en el horno durante un tiempo de 2 horas a una temperatura de 95°C, esto con la finalidad de hacer que la semilla se abra completamente permitiendo un acces más sencillo al cotiledón que se encuentra en el interior y eliminando parcialmente la cantidad de humedad que contiene este. Posteriormente, el cotiledón extraído se procesa para reducir su tamaño y se somete a la misma temperatura de secado mencionada anteriormente por un tiempo de 4 horas, al finalizar el proceso de secado se muele el almidón resultante en un mortero y este producto, se almacena en un desecador para evitar que absorba humedad del ambiente; este proceso da como resultado un almidón con una consistencia menos refinada en comparación a la observada en un almidón comercial. Como se puede observar en la tabla 7, se muestra la materia prima de la que fue extraída el almidón y las características visuales del producto obtenido, de igual forma, en base a la metodología de Carrasco y otros (2018)<sup>[12]</sup> se establecen las etapas que están involucradas en el proceso de extracción de almidón a través del método seco y se evidencian en la Figura 10 a continuación.

**Figura 10.**

*Proceso de extracción almidón semillas de mango método seco*



**Nota.** La figura muestra las etapas que se seguirán durante la extracción de almidón de semillas de mango mediante un método específico, en este caso, en seco..

**Tabla 7.**

*Resultados extracción de almidón método seco*

MATERIA PRIMA	PRODUCTO
	

**Nota.** En la tabla se evidencia una comparación entre la materia prima empleada (imagen izquierda) y el producto obtenido mediante el proceso anteriormente explicado imagen derecha).

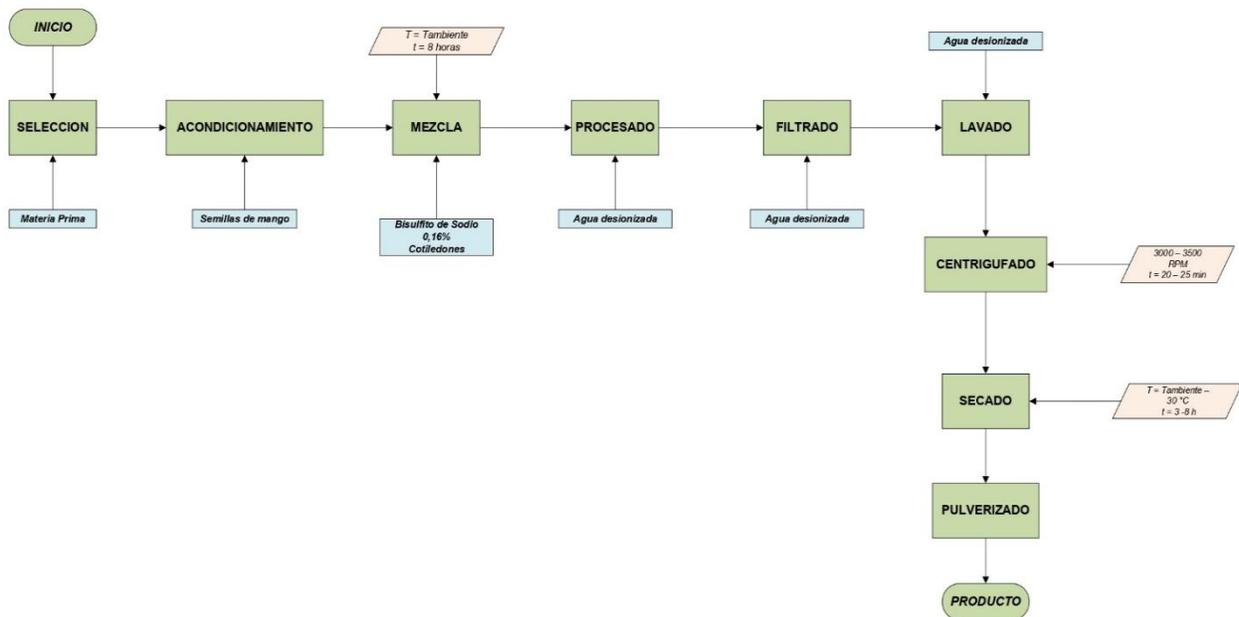
4.1.1.2. Método húmedo obtención almidón a partir de cotiledones de mango. El método húmedo de extracción de almidón consiste, como su nombre lo indica, en la extracción de éste en un medio húmedo ya sea agua o hidróxido de sodio al 25% como se explica en el proceso descrito por Fernandez (1998)<sup>[14]</sup> para fines prácticos se busca aplicar una metodología similar a que fue aplicada por Kaur, Singh, Sandhu, & Guraya (2004)<sup>[22]</sup> pues, al igual que en el método de extracción mencionado en el numeral inmediatamente anterior, se realizan algunos cambios metodológicos en el proceso revisado. De esta manera en este proceso, se hace un acondicionamiento adecuado de las materias primas eliminando el contenido total de pulpa o cualquier exceso que pueda tener la semilla, la cubierta del cotiledón se retira manualmente, esta vez sin ser sometido a secado, y los cotiledones extraídos se sumergen en una solución de Bisulfito de Sodio al 0,16% ( $NaHSO_3$ ) durante un tiempo de 8 horas a temperatura ambiente, esto con la finalidad de emplear el Bisulfito de Sodio como un agente antioxidante e inhibidor de crecimiento microbiano y a su vez de procesos de fermentación en los cotiledones, además contribuye al blanqueamiento del almidón que se obtendrá al finalizar la extracción. La siguiente etapa de proceso, consiste en retirar la solución de bisulfito empleada y someter los cotiledones a procesamiento con un volumen de 250 mL de agua desionizada, para luego filtrar esta mezcla y lavar el residuo con agua desionizada hasta que ésta salga completamente clara durante el proceso de lavado; la solución resultante, se centrifuga durante 20 a 25 minutos a 3000 y 3500 RPM obteniendo en el producto sedimentado, el almidón de las semillas de mango. El sedimento se deja secar en placas de vidrio durante 8 horas a temperatura ambiente o, también, es un método válido dejar secar el sedimento en un crisol a 30°C durante 3 a 4 horas, el resultado del secado se pulveriza en un mortero de tal manera que la textura del almidón encontrado sea más fina<sup>[22]</sup>. Las etapas descritas anteriormente se evidencian más claramente en la Figura 11, en el cual se establecen las condiciones de operación a las que se encontrará cada uno de los equipos que se vean involucrados en la extracción de almidón a partir del método húmedo.

El resultado de este proceso, en comparación al almidón resultante del primer método de extracción mencionado, es un almidón mucho más refinado y con una coloración completamente blanca, lo que concederá una mejor textura a la película bioplástica

obtenida empleado este tipo de almidón, este resultado se puede observar en la tabla 8, en el que se muestra el resultado del proceso de centrifugación, y en la Figura 12 donde muestra el producto final de la metodología descrita.

**Figura 11.**

*Proceso extracción almidón semillas de mango método húmedo*



**Nota.** La figura presenta el proceso a seguir para lograr la extracción de almidón de cotiledones de las semillas de mango a través de un método húmedo.

**Figura 12.**

*Resultado proceso de centrifugación almidón*



**Nota.** La imagen hace referencia al resultado del proceso de centrifugación en el cual se obtiene el sedimento que al secar se convierte en almidón purificado.

**Tabla 8.**

*Resultados extracción de almidón método húmedo*

MATERIA PRIMA	PRODUCTO
 A photograph showing six mango cotyledons (seed halves) arranged in a row. They are white and slightly curved, with some brownish spots on their surfaces.	 A photograph showing a white ceramic bowl filled with a fine, light-colored powder, which is the extracted mango starch.

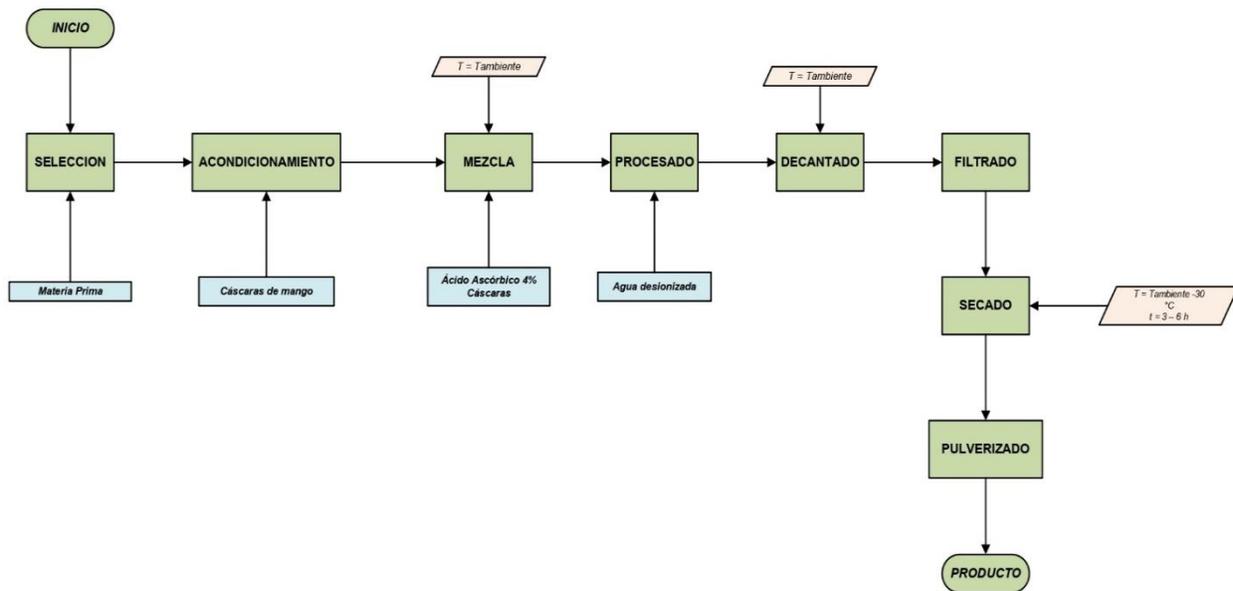
**Nota.** En la tabla se muestra la materia prima empleada para este proceso (cotiledones de la semilla de mango, imagen izquierda) y el producto obtenido (almidón de la semilla, imagen derecha).

4.1.1.3. Método de extracción almidón de cáscaras de mango. Para la obtención del almidón a partir de la cáscara de mango se plantea un procedimiento similar al planteado por Villalta (2018)<sup>[42]</sup>, este tiene en común con los anteriores métodos establecidos de extracción de almidón, la selección materia prima que cumpla con las características de maduración y se encuentren en las categorías mencionadas en el numeral 3.1.1, pues se requiere que que no muestre daños o puntos negros en la superficie y de este modo conseguir un mejor almidón, posterior a la selección de materia prima las cascarras deben seccionarse en tiras de 2 cm de largo y sumergirlos en una solución de Ácido ascórbico al 4% que, al igual que el Bisulfito de Sodio, es un agente químico con propiedades antioxidantes y conservantes que también se emplea con el fin de mejorar la calidad del almidón y evitar la acción microbiológica en las cáscaras. Esta solución se procesó y se agitó manualmente durante 5 minutos, el sobrante se decantó por acción de gravedad y el proceso se repitió hasta que la solución salió completamente clara y el precipitado, que sería el almidón extraído, se veía de color blanco. De igual forma, se sometió a un proceso de secado a 30°C durante 6 a 8 horas hasta que se observaba un polvo completamente fino y seco. Este último proceso, al igual que el mencionado en el numeral 4.1.1.2., genera un almidón con textura comparable a almidones comerciales como el de maíz o papa, este resultado se puede observar en Figura 14.

Teniendo en cuenta el proceso establecido por Villata (2018)<sup>[42]</sup> en su estudio, se toman en cuenta las etapas desarrolladas y, teniendo en cuenta algunas modificaciones en estas, se plantean las condiciones a través de las cuales será obtenido el almidón de las cáscaras de mango como se observa en la Figura 13.

**Figura 13.**

*Proceso extracción almidón a partir de cáscaras de mango*



**Nota.** La figura muestra las etapas correspondientes al proceso de extracción de almidón a partir de las cáscaras de mango y sus correspondientes condiciones de operación.

**Figura 14.**

*Almidón extraído cáscaras de mango*



**Nota.** La figura muestra el resultado del proceso anteriormente descrito.

#### **4.1.2. %Rendimiento y %Humedad**

De acuerdo a lo establecido en el numeral 3.1.2. del capítulo inmediatamente anterior, durante la extracción de almidón es importante tener en cuenta los porcentajes de rendimiento y humedad ya que estos resultados facilitan el análisis de la viabilidad de estos procesos aplicados, esto en relación a la cantidad de materia prima involucrada inicialmente para la extracción. Para el estudio desarrollado se establece en la tabla 9 el resultado de rendimiento de almidón extraído a través de los métodos anteriormente descritos, con el cual se puede evidenciar que para la misma cantidad total de fruto (kg), el peso del almidón extraído varía considerablemente y en consecuencia, el porcentaje de rendimiento también lo hace, así se evidencia que la metodología aplicada con un rendimiento más alto y con la cual el aprovechamiento del residuo de mango es mayor, es el método descrito en el numeral 4.1.1.1. pues sus etapas de producción son más simples y la cantidad de almidón encontrado es bastante alta; de igual forma, se evidencia que el rendimiento más bajo de producción de almidón lo tiene el método aplicado a las cáscaras de mango, pues este proceso es más largo y tedioso en cuando a las etapas de acondicionamiento y extracción en las cuales los residuos de cada una son altos y por esto el rendimiento es bajo.

Por otro lado el porcentaje de humedad se presenta a través de la tabla 10, valores que fueron calculados empleando la ecuación 1, teniendo en cuenta el mismo peso (kg) del fruto inicial se toma como el peso del sólido húmedo y el peso del sólido seco corresponde a la cantidad de almidón que resulta de los procesos de secado, se encuentra que los porcentajes de humedad entre los almidones extraídos de los cotiledones de las semillas son similares, a pesar de diferir tanto en su proceso de obtención, en comparación al porcentaje de humedad del almidón extraído de las cáscaras, en este último caso a pesar de ser un proceso que resulta ser el menos eficiente en cuanto al porcentaje de rendimiento el contenido de humedad es bajo por lo que, se concluye que en las condiciones de operación son óptimas para extraer almidones que se puedan emplear en el proceso de síntesis de una película bioplástica.

**Tabla 9.***%Rendimiento almidón extraído por tres métodos.*

RENDIMIENTO ALMIDÓN				
Materia prima	Peso fruto (kg)	Peso semillas (kg)	Peso almidón (kg)	%Rendimiento
Cotiledones (método seco)	10,886	0,21034	0,04817	22,901
Cotiledones (método húmedo)	10,886	0,19051	0,02712	14,235
Cáscaras	Peso fruto (kg)	Peso cáscaras (kg)	Peso almidón (kg)	%Rendimiento
	10,886	0,23078	0,028032	12,147

**Nota.** La tabla evidencia los resultados del cálculo de porcentajes de rendimiento de almidones teniendo en cuenta la cantidad inicial de materia prima empleada en cada una, empleando la ecuación 2.

**Tabla 10.***%Humedad almidón extraído por tres métodos.*

HUMEDAD ALMIDÓN				
Materia prima	Peso fruto (kg)	Peso sólido húmedo (kg)	Peso sólido seco (kg)	%Humedad
Cotiledones (método seco)	10,886	0,21034	0,04817	1,49
Cotiledones (método húmedo)	10,886	0,19051	0,02712	1,501
Cáscaras	Peso fruto (kg)	Peso sólido húmedo (kg)	Peso sólido seco (kg)	%Humedad
	10,886	0,23078	0,028032	1,862

**Nota.** La tabla muestra los resultados del cálculo de porcentajes de humedad de cada almidón extraído, empleando la ecuación 1.

#### 4.2. Síntesis película bioplástica

Para la ejecución del proceso seleccionado para la síntesis de la película bioplástico se deben realizar correctamente las pre-mezclas establecidas en el esquema de trabajo con

la finalidad de evitar la formación de grumos al mezclar todos los componentes, y así, facilitar el proceso de homogenización, de este modo se reduce el tiempo de operación en el que se logra la gelatinización de los materiales involucrados. En la tabla 11 se presentan las materias primas involucradas en la producción de la película bioplástica, así mismo las etapas de producción en las que se emplearán y las condiciones de operación en cada una de estas, para así tener más claridad en el desarrollo del esquema de trabajo presentado en la Figura 15.

**Tabla 11.**

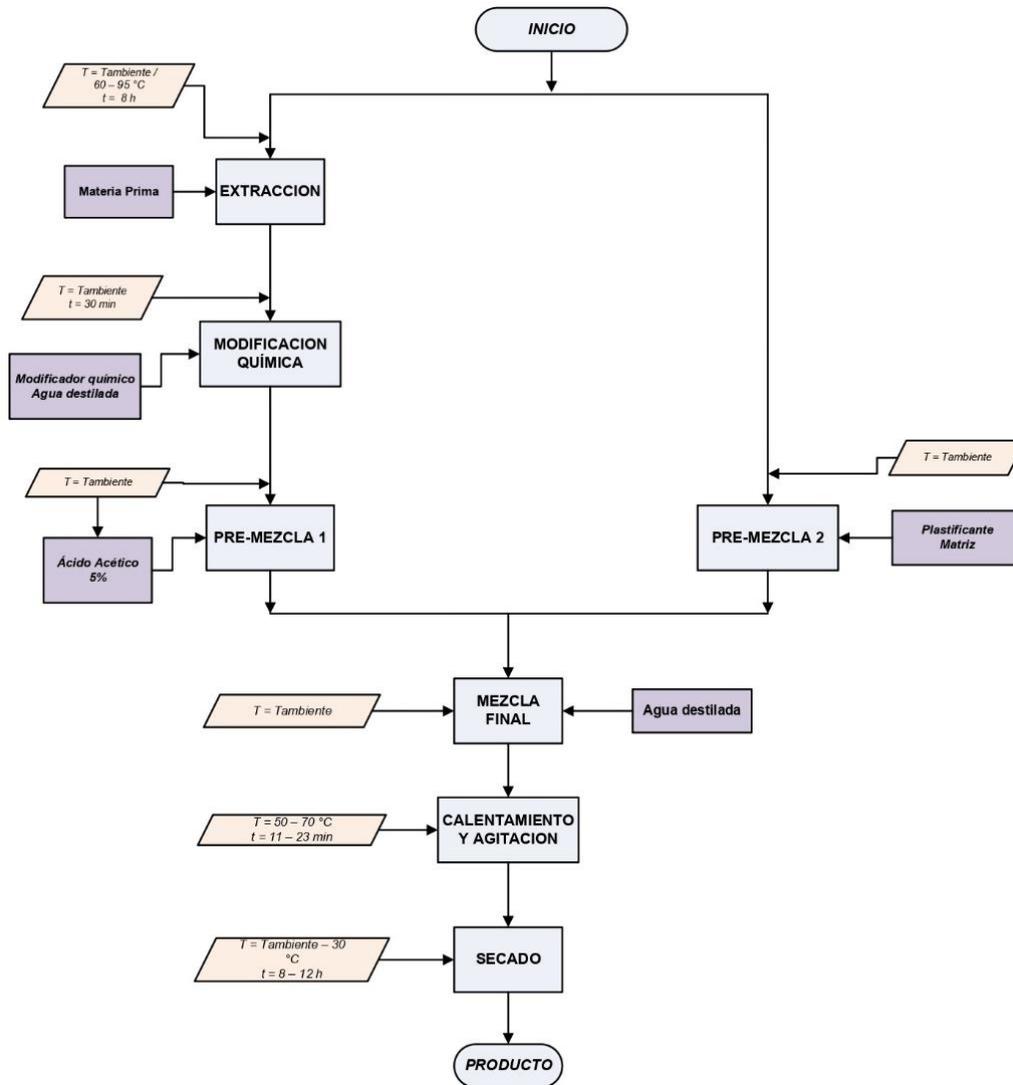
*Materias primas y condiciones de operación.*

<b>MATERIA PRIMA</b>	<b>ETAPA PRODUCCIÓN</b>	<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>
Almidón nativo	Modificación química	Temperatura ambiente
Ácido Acético 5%	Modificación almidon / Pre-mezcla 1	Temperatura ambiente t = 30 min
Agua desionizada	Modificación química / Mezcla final	Temperatura ambiente Agitación constante
Alcohol polivinílico	Pre-mezcla 2	Temperatura ambiente Agitación constante
Glicerina	Pre-mezcla 2	Temperatura ambiente Agitación constante
Mezcla final de bioplástico	Calentamiento y agitación	T = 50 – 70 °C t = 11 – 23 min
Mezcla final de bioplástico	Secado	T = 30 - 50 °C t = 8 – 12 horas

**Nota.** En la tabla presentada se muestran las materias primas involucradas en cada una de las etapas de obtención de una película de bioplástico a nivel laboratorio, las condiciones a las que fueron sometidas y la etapa correspondiente en la que fue empleada.

**Figura 15.**

*Esquema de trabajo obtención de bioplástico*



**Nota.** La figura muestra el esquema de trabajo que se siguió para la obtención de la película de bioplástico a partir de almidón extraído de residuos de mango.

Después de realizar el proceso de extracción y modificación previa de almidón con ácido acético al 5% se realiza la primera pre-mezcla en la que se añade agua desionizada, el almidón modificado y una cantidad más de ácido acético, el cual en esta etapa del

proceso cumplirá con la función de estabilizar el pH del bioplástico; esta primera pre-mezcla se lleva a cabo a temperatura ambiente y, de manera simultánea y a las mismas condiciones, se lleva a cabo la pre-mezcla que contiene el Alcohol polivinílico (PVA) que actuará como refuerzo en la matriz del bioplástico y Glicerina que cumplirá la función de plastificante, estos dos procesos simultáneos deben llevarse a cabo con agitación manual o magnética con el fin de evitar la creación de cúmulos de material y por ende fallos en la formulación del bioplástico. Es importante aclarar que las concentraciones de todos los componentes son constantes, pues siguiendo la formulación establecida según el diseño de experimentos, la única composición que cambiará dentro de la formulación será la composición de almidón, variando entre los valores del 10% y el 70% con el fin de encontrar la mejor formulación; la concentración de alcohol polivinílico se mantuvo constante en un 20% con respecto al total del volumen de mezcla preparado.

Para unificar completamente las pre-mezclas realizadas, se procede a formar una mezcla final a temperatura ambiente para posteriormente aumentar su temperatura durante un tiempo determinado hasta lograr su completa homogenización, durante este proceso de calentamiento se añade un volumen de agua desionizada que promoverá dicha mezcla y además se mantiene agitación manual, que también puede ser magnética, durante el tiempo que dura el proceso de calentamiento y previo a la gelatinización. Se busca obtener prototipos a diferentes temperaturas de gelatinización para estudiar el efecto de la temperatura en este proceso, por eso se evalúa el cambio de temperaturas, desde una temperatura mínima de 50°C en la cual el proceso completo de gelatinización tarda aproximadamente 23 a 25 minutos, hasta una temperatura máxima de 70°C con la que este proceso tarda entre 10 y 15 minutos para después proceder a someter la mezcla a secado.

El material resultante se distribuye en placas de acrílico que permitirán el secado total de las muestras obtenidas, este tipo de placas facilitarán el desmoldado de las probetas obtenidas una vez alcanzado el tiempo máximo de secado, este proceso se realizó inicialmente, y en promedio de las muestras realizadas, a una temperatura entre 30°C – 50 °C durante un tiempo de 8 a 12 horas máximo, logrando muestras totalmente secas y películas de bioplástico totalmente compactas. Debido a que la extracción del almidón

se realizó a través de métodos diferentes, las probetas se realizaron siendo distribuidas en dos grandes grupos que responden a las iniciales B1 y B2, para ser diferenciadas entre bioplástico 1 y 2 durante la experimentación; las probetas que son denominadas como B1 son aquellas que se obtuvieron a partir del almidón extraído por el método seco y las probetas denominadas como B2 resultaron de una mezcla de almidón extraído por el método húmedo y el almidón extraído de las cáscaras debido a que sus características eran similares. En respuesta al diseño de experimentos planteado inicialmente en el que se tiene en cuenta como factores a considerar la temperatura y el porcentaje de almidón, y los niveles se componen de las características previamente mencionadas, se ejecutó la obtención de 18 muestras de bioplástico de las cuales 9 de ellas corresponden a las réplicas de cada una de las probetas, estas fueron nombradas conforme se fueron procesando, es decir, cada una corresponde (junto con su réplica).

Posterior a su obtención y secado, las probetas fueron sometidas a ensayos mecánicos que se aplican comúnmente a este tipo de materiales teniendo en cuenta las normas ASTM que regulan las propiedades de los materiales, ya que como variable de respuesta en el diseño de experimentos la elasticidad y tenacidad del biopolímero resultante, serán las características que permitan definir si el producto es satisfactorio o no. En la tabla 12 se plantean las composiciones y condiciones a las que se obtendrán las muestras teniendo en cuenta el desarrollo del diseño experimental planteado previamente.

**Tabla 12.**

*Distribución de pruebas.*

TEMPERATURA	% ALMIDÓN		
	10%	40%	70%
50 °C	F - B1	A - B1	E - B1
	F - B1 R	A - B1 R	E - B1 R
60 °C	B - B1	A - B2	D - B1
	B - B1 R	A - B2 R	D - B1 R
70 °C	B - B2	C - B1	C - B2
	B - B2 R	C - B1 R	C - B2 R

**Nota.** En la tabla presentada se evidencia la distribución de las pruebas realizadas a partir de los diferentes tipos de almidón extraídos, generando dos tipos de películas (B1 – B2).

En base a lo enunciado previamente, las composiciones de cada película bioplástica varían de acuerdo a la concentración de almidón requerido en cada una pero con la finalidad de evaluar únicamente el cambio de la composición de almidón la concentración de aditivo para la matriz polimérica, en este caso alcohol polivinílico (PVA), se mantuvo constante en un 20%; el porcentaje restante de cada composición se dividió en agua, glicerina y ácido acético y para cada muestra se tomó una base de cálculo de 200 mL. De este modo, estas variaciones en las composiciones y el desarrollo de cada una de las muestras se evidencia en la tabla 13 y los resultados de las diferencias entre las placas de plástico obtenidas a partir de los almidones extraídos se muestran en el la tabla 14.

**Tabla 13.**

*Composición de películas bioplásticas*

Prueba	Temperatura (°C)	% Almidón	% PVA	% Ácido Acético	% Agua	% Glicerina
A - B1	50	40%	20%	15%	30%	25%
A - B1 R	50	40%	20%	15%	30%	25%
B - B1	60	10%	20%	10%	20%	10%
B - B1 R	60	10%	20%	10%	20%	10%
C - B1	70	40%	20%	10%	20%	10%
C - B1 R	70	40%	20%	10%	20%	10%
D - B1	60	70%	20%	0,75%	3,5%	2,50%
D - B1 R	60	70%	20%	0,75%	3,5%	2,50%
E - B1	70	70%	20%	15%	30%	25%
E - B1 R	70	70%	20%	15%	30%	25%
F - B1	50	10%	20%	0,75%	3,5%	2,50%
F - B1 R	50	10%	20%	0,75%	3,5%	2,50%
A - B2	60	40%	20%	15%	30%	25%
A - B2 R	60	40%	20%	15%	30%	25%
B - B2	50	10%	20%	10%	20%	10%
B - B2 R	50	10%	20%	10%	20%	10%
C - B2	70	70%	20%	0,75%	3,5%	2,50%
C - B2 R	70	70%	20%	0,75%	3,5%	2,50%

**Nota.** La tabla muestra las composiciones de cada una de las materias primas empleadas para la formulación de cada película.

Como se mencionó anteriormente se realizó la mezcla de almidón extraído a través del método húmedo y de las cáscaras de mango, este tipo de biopelícula con mezcla de almidones se referencia con las letras B2. Ya que el método con mayor rendimiento de extracción fue el método seco, con ese producto en particular se sintetizaron las películas que corresponden a las letras B1, que resultan formar parte de la mayoría de las formulaciones

**Tabla 14.**

*Resultados síntesis de bioplástico*

MÉTODO SECO	MÉTODO HÚMEDO + CÁSCARAS DE MANGO
	

**Nota.** Se presentan los resultados de las dos películas de bioplástico desarrolladas como se mencionó anteriormente, a partir de los diferentes tipos de almidón extraídos de residuos de mango.

Debido a que el método seco de extracción de almidón de mango dio como resultado un mejor rendimiento en relación a la cantidad de materia prima que se utilizó para todo el proceso, la cantidad de muestras procesadas con este tipo de almidón fue más amplio en relación a las muestras procesadas con el almidón extraído por métodos húmedos;

sin embargo, en la tabla 14 se puede observar que con el almidón extraído por este último se obtiene una película de bioplástico más clara y con una textura menos rugosa pues este almidón es mucho más fino, esto se debe a que el procesamiento del almidón fue más riguroso y se realizó un pre-tratamiento con agentes antioxidantes que evitaron el cambio de color en el almidón, además que la textura del almidón posee características similares a los que son comúnmente comercializados.

Por otro lado, durante el desarrollo de la síntesis de las películas bioplásticas se tiene en cuenta que la temperatura tiene una influencia importante en cada una de las etapas llevadas a cabo durante la producción de este material, pues a partir de esta se evalúa el tiempo que tarda la gelatinización de la mezcla realizada y por ende, la eliminación parcial de la humedad del polímero, además, gracias al efecto de la temperatura se evalúa cuánto tarda este producto en secar completamente. Otro componente que genera un impacto importante en el resultado obtenido durante la síntesis del biopolímero es la concentración de almidón que posee cada una de las formulaciones, pues esta cantidad de almidón condicionará bastantes características de las formulaciones, en conjunto con el material que se empleó para reforzar la matriz polimérica, en este caso PVA.

## **5. COMPARAR LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA PELÍCULA OBTENIDA FRENTE A OTROS COMPUESTOS POLIMÉRICOS CONVENCIONALES.**

Las propiedades mecánicas de un material describen la manera en la que este responde bajo la acción de fuerzas externas o cargas continuas o discontinuas, estas propiedades pueden ser la elasticidad, plasticidad, maleabilidad, dureza, fragilidad y otras que facilitan la caracterización de los materiales que son sometidos a las pruebas respectivas para cada estudiar cada una de las propiedades mencionadas<sup>[21]</sup>. Los respectivos ensayos de mecánicos se pueden clasificar como ensayos estáticos que simulan el comportamiento del material a diferentes velocidades de aplicación de carga y los ensayos dinámicos que modelan el comportamiento frente a cargas variables en intervalos de tiempo; uno de los ensayos estáticos más importantes y aplicados para la caracterización de materiales es el ensayo de tracción, pues a partir de este se pueden conocer propiedades de resistencia que tienen distintos materiales a temperatura ambiente; por otro lado, los ensayos de dureza son básicos para establecer de forma rápida las características de tracción de los materiales<sup>[40]</sup>.

Además, las pruebas de mecánicas aplicadas a los materiales describen los campos de aplicación en los cuales los materiales se puedan desempeñar eficientemente y los ensayos aplicables para cada material son diferentes pues no a todos es necesario evaluarles las mismas propiedades. Por ejemplo, a los polímero es muy común someterlos a ensayos de resistencia a tracción, ensayos de elongación y dureza, los cuales están regulados por la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) y, para efectos de este estudio, por las Normas Técnicas Colombianas (NTC), de este modo, la norma que regula los ensayos de resistencia es la norma ASTM D638, la dureza de un material polimérico está regido bajo la norma ASTM D2240. Así, el contenido de este capítulo refleja los resultados de la aplicación de varias de estas pruebas y ensayos de materiales aplicados a las probetas obtenidas con variaciones en su composición y temperatura para alcanzar la gelatinización; cabe aclarar que a pesar que los ensayos de cizalla aplican también para compuestos poliméricos, para efectos de este estudio no se toma en cuenta pues el material obtenido bajo experimentación no tiene un aditivo fibroso que refuerce su matriz.

## 5.1. Resistencia a tracción de los materiales

Como se observó en el capítulo anterior de este trabajo, se planteó un diseño de experimentos que permitió la obtención de 18 prototipos de material bioplástico con diferentes composiciones de almidón extraído de residuos del mango y de los demás componentes que hacen parte del polímero resultante, de este modo se obtuvieron películas de bioplástico con diferentes características y texturas, esto se realiza con el fin de encontrar cuál de las probetas obtenidas a través del proceso de matriz reforzada es la más apta para ser comparada con un material polimérico convencional y de ese modo, ser un producto competitivo frente a estos.

Los ensayos de tracción hacen referencia al comportamiento que tiene el material frente a la acción de esfuerzos externos aplicada a cada extremo de la probeta, para medir la resistencia a la tracción de un material se deben evaluar las deformaciones del material, en este caso, al ser un material plástico se deben estudiar fenómenos de deformación y tensión, para la realización de esta prueba en específico se tomaron probetas de dimensiones específicas establecidas bajo la norma ASTM D-882 la cual establece el método de ensayo estándar de las propiedades de tracción de láminas de plástico delgadas, la norma sugiere que las probetas empleadas en el ensayo tengan dimensiones de 10 mm x 270 mm y que sus condiciones de espesor sean de 1 mm o menos, este tipo de ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos con rangos de carga entre los 5 N hasta 5KN Modelo AG-IS 5KN Shimadzu, se puede apreciar en la figura 16<sup>[5]</sup>.

**Figura 16.**

*Máquina universal de ensayos*



**Nota.** La imagen corresponde a la máquina de ensayo universal empleada durante la evaluación de las probetas obtenidas. Tomado de: MÁQUINAS DE ENSAYO UNIVERSAL SHIMADZU. [En línea] <https://www.cromtek.cl/producto/ensayo-de-materiales-e-inspeccion/> [Acceso Noviembre 4.2021]

El ensayo aplicado para las probetas obtenidas en el laboratorio se realizó a condiciones normales de temperatura y humedad, es decir, a las condiciones a las que se encuentra el medio; a las probetas se les aplicó una fuerza máxima entre un rango de de 2,60156 N - 18,4703 N, y a partir de esta cantidad de fuerza aplicadase registraron datos de

desplazamiento a ruptura, esfuerzo a fuerza máxima, deformación a ruptura y módulo de elasticidad de cada una de las muestras analizadas. De este modo, en la Tabla 15 se muestran los resultados para cada una de las probetas analizadas.

**Tabla 15.**

*Resultados estrés máximo y porcentaje tensión máxima para cada ensayo*

PARÁMETRO	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Prueba	N	mm	N/mm <sup>2</sup>	%
A - B1	11,4766	434,341	11,4766	173,736
A - B1 R	13,2547	438,846	13,2547	175,538
B - B1	2,63281	336,233	2,63281	134,493
B - B1 R	2,64746	333,418	2,60156	150,469
C - B1	14,5844	434,734	14,5844	173,894
C - B1 R	14,6687	458,15	14,6687	183,26
D - B1	3,46094	407,499	3,46094	163
D - B1 R	3,81562	433,541	3,81562	173,416
E - B1	7,05	460,45	7,05	184,18
E - B1 R	6,6879	474,31	6,6879	192,576
F - B1	2,60156	371,117	2,60156	371,117
F - B1 R	2,6453	342,897	2,6453	198,7687
A - B2	4,625	434,368	4,625	173,747
A - B2 R	5,07813	437,45	5,07813	174,98
B - B2	3,2	417,117	3,2	417,117
B - B2 R	2,9843	420,275	2,9843	420,275
C - B2	16,9688	457,045	16,9688	182,818
C - B2 R	18,4703	476,311	18,4703	190,524

**Nota.** Para cada una de las probetas a las cuales se les aplicó el ensayo de resistencia a tracción y elongación bajo la norma ASTM D882 se obtienen resultados para el esfuerzo máximo resistido previo a la ruptura del elemento de estudio.

En relación a lo presentado en la tabla anterior en la donde se organizan los resultados registrados por la máquina de ensayos universal, en las figuras 17 – 19 se evidencia la

manera en la que fueron aplicados los ensayos de tensión para una de las probetas (ya que el ensayo se realiza de manera similar en cada una de las probetas), y de igual forma en las figuras 20 y 21 se muestra el resultado de las probetas antes de someterse al ensayo mecánico y después de este, respectivamente.

**Figura 17.**

*Ensayos de tensión en probetas*



**Nota.** La imagen evidencia la probeta de la película bioplástica durante el ensayo de resistencia a tracción y elongación.

**Figura 18.**

*Ensayos de tensión a probetas con fallo*



**Nota.** La figura muestra el ensayo de tensión de una de las probetas ue presentó fallos en su estructura durante la aplicación del mismo.

**Figura 19.**

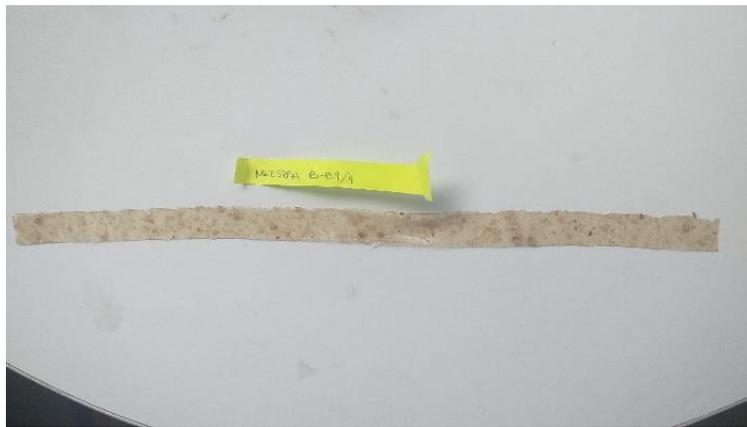
*Ensayos de tensión a probetas con alto grado de elongación*



**Nota.** La imagen evidencia el alto grado de resistencia a tracción y elongación que presentaron algunas de las probetas sin generar rupturas en su estructura y retomando la forma inicial.

**Figura 20.**

*Probetas después del ensayo de tensión sin ruptura*



**Nota.** La imagen muestra una de las probetas empleadas para la evaluación de las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido que no mostró fallos.

**Figura 21.**

*Probeta de ensayo con ruptura*

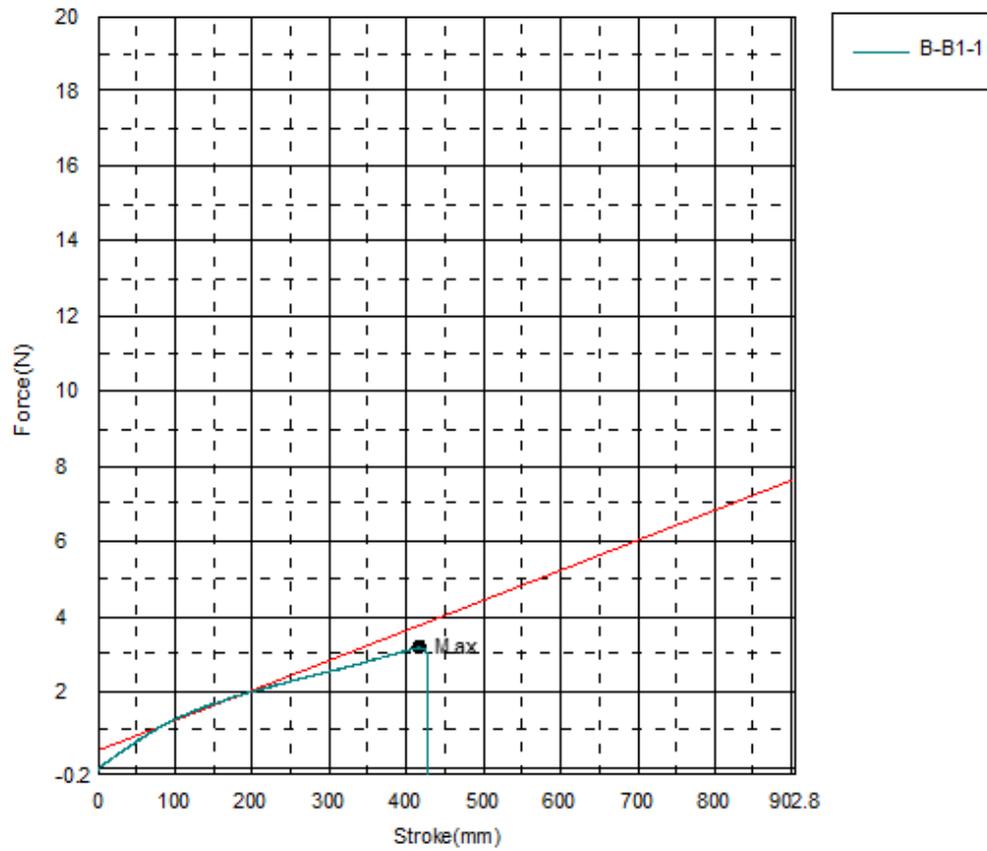


**Nota.** La imagen muestra una de las probetas que mostraron ruptura durante la evaluación de las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido.

Después de realizar los ensayos y registrar los datos que arroja el equipo, se evidencia que tan solo tres de las formulaciones empleadas para el estudio fallaron ante la fuerza a la que fueron sometidas por la máquina de ensayos universal, las cuales corresponden a las muestras B-B1, F-B1 Y B-B2 cuya fuerza máxima soportada durante el ensayo fue de 2,63281 N, 2,60156 N y 3,200 N, respectivamente; es importante aclarar que al ser la misma formulación analizada, las réplicas que fueron sometidas a este estudio también fallaron con esfuerzos similares a los de la muestra original. Por otro lado, las muestras que no presentaron falla durante el estudio realizado soportaron fuerzas de hasta 18,4703 N, estos resultados se ven claramente en la tabla anterior. De acuerdo a esto, las tres muestras que mostraron ruptura presentaron un módulo de elasticidad menor en comparación a los módulos que presentaron las demás muestras sometidas al estudio, en este caso se confirma que la cantidad de fuerza requerida para generar una deformación importante en estas tres únicas muestras es mínima en comparación a las demás muestras y que las muestras que no mostraron ruptura tienen una alta resistencia a la deformación por las propiedades conferidas por los componentes de la mezcla, por otro lado, se evidenció que algunas probetas que tenían una forma irregular al alguna zona, especialmente las que se obtuvieron a partir de almidón de mango extraído por medio del método seco, fueron tomando una forma un poco más regular a medida que se imprimía más fuerza en ellas. En la gráfica 1 se puede observar que el punto marcado como punto máximo es la fuerza que pudo resistir la probeta antes de romperse a la mitad, por otro lado, para la misma probeta se obtiene la gráfica 2 que refleja el esfuerzo de deformación en el cual se evidencia la carga que resistió la muestra antes de deformarse completamente.

### Gráfica 1.

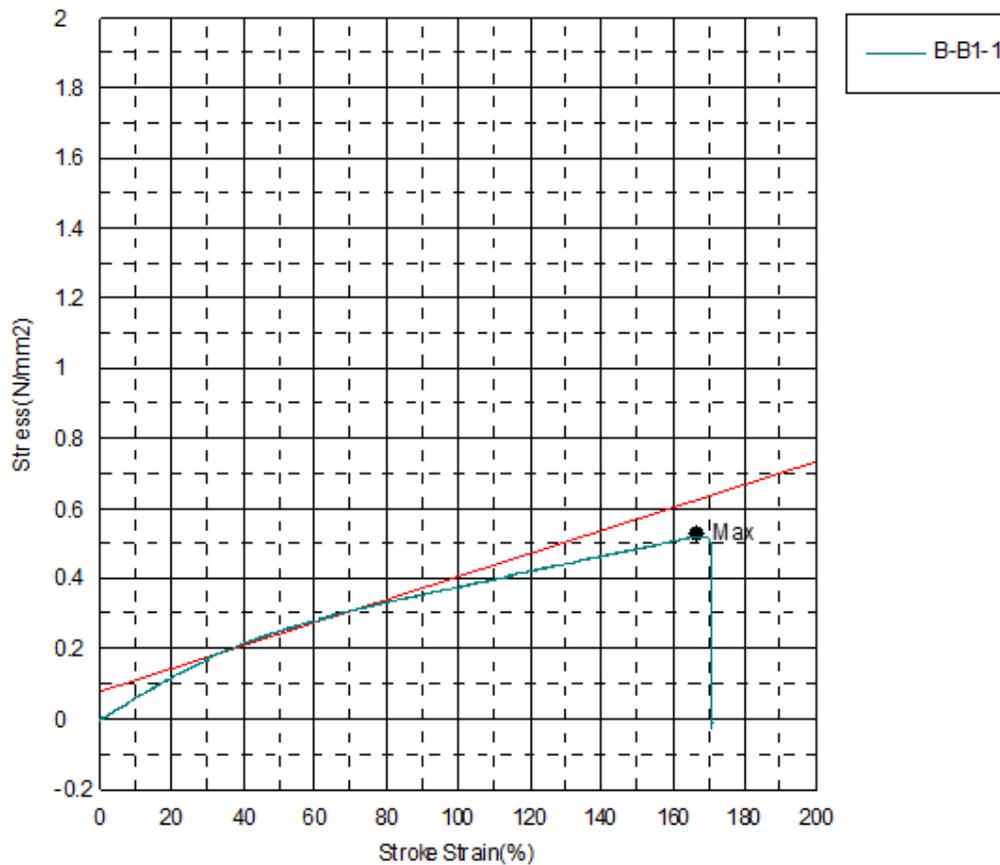
Gráfica fuerza máxima soportada por la probeta antes de la ruptura



**Nota.** La gràfica mostra el punt màxim en la relació de desplaçament de la probeta i la força aplicada, en la que ésta generó ruptura.

## Gráfica 2.

Gráfica esfuerzo deformación por la probeta antes de la ruptura



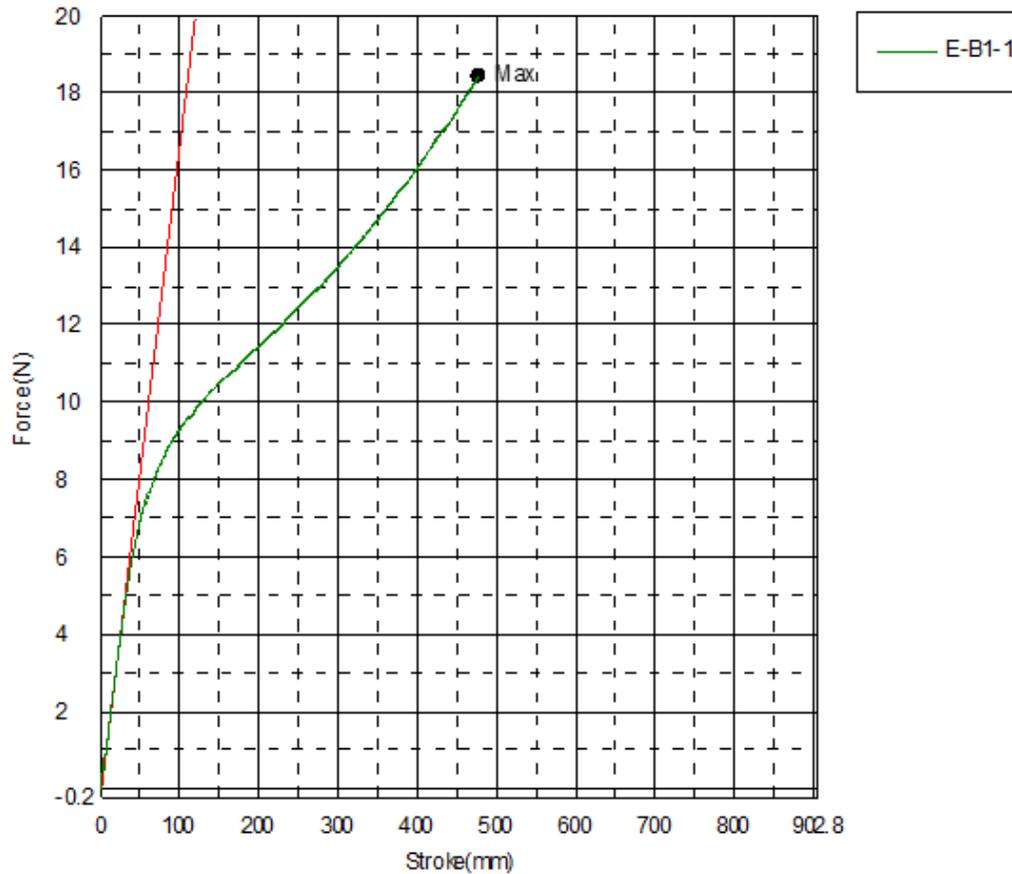
**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo en la relación de desplazamiento de la probeta y porcentaje de esfuerzo aplicada resistido en la que ésta mostró fallas.

Con fines comparativos se suministra la gráfica 3 correspondiente a la fuerza aplicada a una muestra con composiciones diferentes a la mencionada anteriormente, la cual no sufrió ruptura sino una elongación máxima a la capacidad que tenía el equipo durante un periodo extendido de tiempo sin lograr éxito con la ruptura del material, además, la gráfica 4 que permite evidenciar el comportamiento de la probeta como un plástico bastante flexible, pues por su resultado se evidencia que a pesar de resistir bastante bien la carga máxima a la que fue sometida (5KN) cede ante esta y cambia en algún punto su forma original, por lo que no es considerado un elastómero en su totalidad. Aunque algunas de

las formulaciones estudiadas por sus resultados poseen características de un elastómero como se evidencia en la gráfica 5, ya que este tipo de materiales son una clase de copolímeros que dan lugar a características bastante elásticas pues, al estirar bajo cargas importantes y a longitudes considerables tienen a capacidad de recuperar su forma original sin generar una deformación permanente en la forma original.

### Gráfica 3.

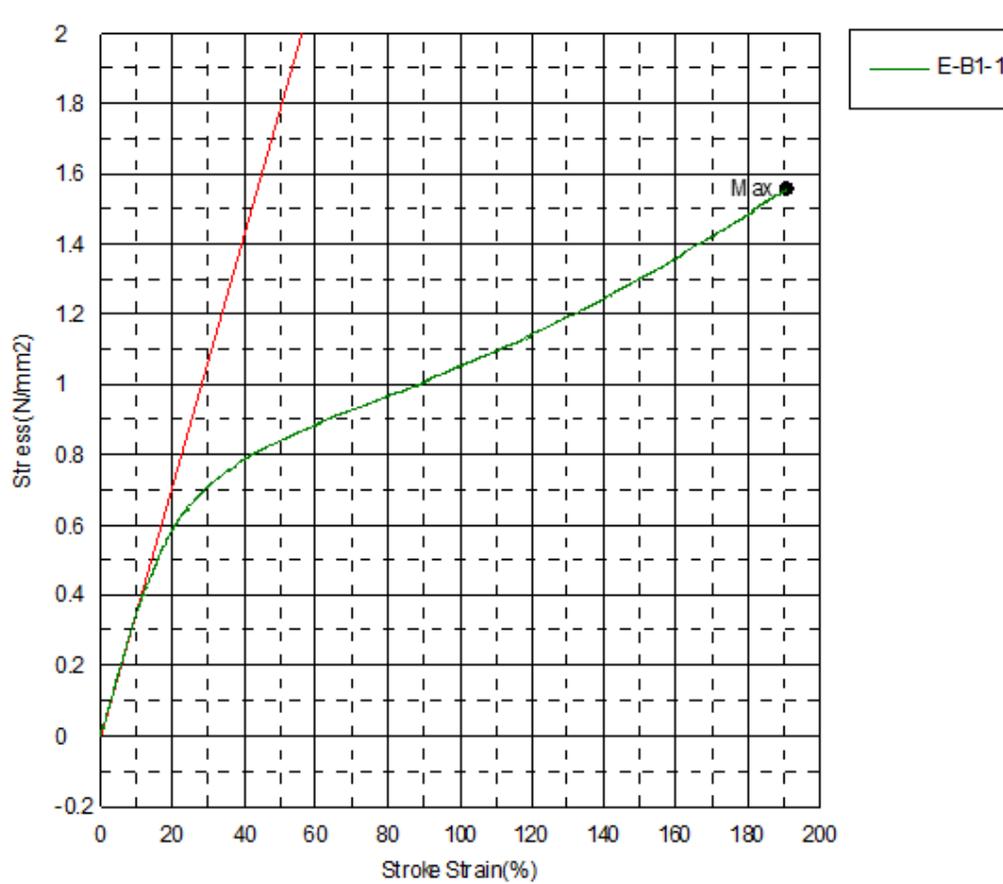
Gráfica fuerza máxima soportada por la probeta sin generar ruptura



**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo en la relación de desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada para una de las probetas que resistió la máxima cantidad de fuerza ejercida durante el ensayo, sin generar ruptura.

#### Gráfica 4.

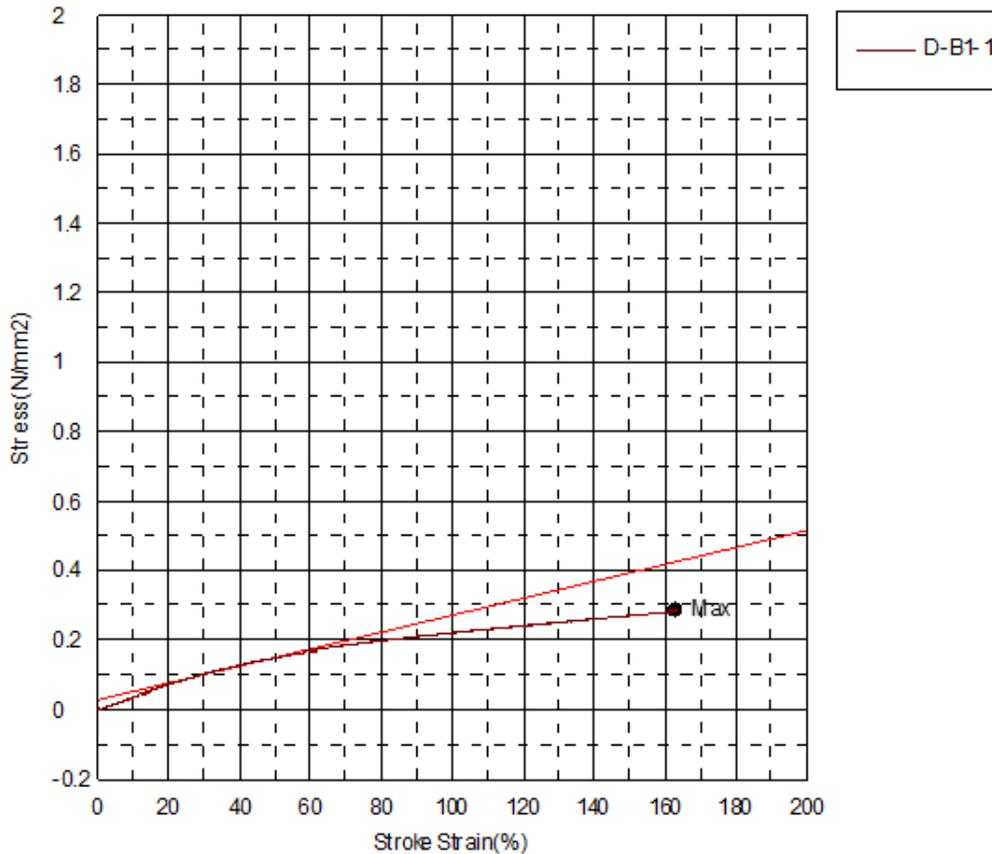
Gráfica esfuerzo deformación por la probeta sin presentar ruptura



**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo en la relación de desplazamiento de la probeta y el esfuerzo generado durante el ensayo para una de las probetas que resistió la máxima cantidad de éste durante el ensayo, sin presentar falla en su estructura.

### Gráfica 5.

Gráfica esfuerzo deformación por la probeta sin presentar ruptura y con características de un elastómero.



**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo en la relación de desplazamiento de la probeta y el esfuerzo aplicado para una de las probetas que presentó características propias de un elastómero.

Con los resultados evidenciados para las formulaciones analizadas en su totalidad (Ver anexos) se puede decir que, en promedio, las formulaciones realizadas más resistentes son aquellas que contienen una cantidad alta de almidón extraído a partir de residuos de mango, pues debido a las formulaciones planteadas, a mayor cantidad de almidón la cantidad de plastificante, modificador químico y agua desionizada que se incluye en el procesamiento es menor, en este caso se puede decir que la temperatura máxima influye considerablemente en la correcta gelatinización de la mezcla, igual forma, las películas obtenidas con valores medios de almidón también resultaron ser resistentes pues

seguramente, el componente que se empleó como refuerzo a la matriz de cada probeta (Alcohol polivinílico PVA) le concedió a la mezcla propiedades como las descritas anteriormente en los casos tomados como ejemplo para el análisis. Así se entiende que, en su gran mayoría, las formulaciones planteadas en el diseño de experimentos de este trabajo pueden llegar a resistir altos niveles de esfuerzo, los cuales para este caso en particular, son los valores de esfuerzo máximo aplicados en sus extremos por el equipo de ensayos universal, es decir 5KN (500 kilogramos fuerza), empleado en el análisis y de esta forma evidenciar que la deformación no fue permanente y evitar la posterior ruptura de la probeta durante el ensayo.

## **5.2. Prueba de dureza**

La dureza es una propiedad que combina los conceptos de resistencia al rayado, la penetración y otros, en plásticos la dureza es la medida de la resistencia de estos materiales a la compresión e indentación <sup>[24]</sup> de su superficie bajo una carga constante, a menudo estas son indicativas de la resistencia al desgaste y a abrasión de material o como un indicador de control de calidad del material. Generalmente, la medición aplicada a los plásticos se realiza con el durómetro SHORE cuyo resultado son números producto de la indentación de la superficie plástica con una barra de acero definida, debido a que su escala se aplica a materiales blandos diferentes a los metales. Los equipos existentes para medir dureza Shore se identifican por las letras de la A a la D, los cuales están diseñados para diferentes lecturas a materiales espumados hasta a polímeros compuestos por unas partes que contengan vidrio.

**Figura 22.**

*Durómetro*



**Nota.** La imagen muestra el durómetro empleado para evaluar las propiedades de dureza de las probetas obtenidas, empleando la escala Shore D como unidad de medida.

El durómetro empleado en la medición de la dureza de los diferentes prototipos de bioplástico obtenidos en el laboratorio, es un equipo de uso manual que contiene un indentador el cual se debe incrustar en la muestra y de la resistencia que tiene esta a ser perforada es lo que se lee como dureza, en este caso en particular, Shore D, de esta forma en la tabla 16 se presentan los resultados a manera de rango pues las mediciones pueden llegar a ser variables en algunas zonas de cada película debido a la textura que poseen algunas a raíz del almidón del que están producidos.

**Tabla 16.***Resultados Dureza Shore D por cada formulación de bioplástico*

<b>Prueba</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>% Almidón</b>	<b>Dureza Shore D Rango</b>
A - B1	50	40%	40 - 45
A - B1 R	50	40%	35 - 40
B - B1	60	10%	25 - 30
B - B1 R	60	10%	25 - 30
C - B1	70	40%	45 -50
C - B1 R	70	40%	45 -50
D - B1	60	70%	20 - 25
D - B1 R	60	70%	25 - 30
E - B1	70	70%	30 - 35
E - B1 R	70	70%	35- 40
F - B1	50	10%	25- 30
F - B1 R	50	10%	25 - 30
A - B2	60	40%	20 - 25
A - B2 R	60	40%	20 - 25
B - B2	50	10%	20 - 25
B - B2 R	50	10%	25 - 30
C - B2	70	70%	30 -35
C - B2 R	70	70%	25 - 30

**Nota.** En la tabla se muestran los resultados de la prueba de dureza aplicada para cada uno de los prototipos de bioplástico desarrollados, en escala Shore D.

La medición y calibración de este equipo en particular está soportada por la norma DIN 53505 la cual establece como valor más bajo, es decir un material muy suave aquel que tenga un valor de 30 o inferior y como valor máximo de medición, es decir un material mucho más duro y difícil de penetrar aquellos que igualan o superan el valor de 90. De este modo, y para efectos de comparación en este estudio, se tiene en cuenta que las formulaciones realizadas como prototipos a composiciones de almidón y temperaturas diferentes muestran valores variables entre 20 y 45 por lo que, en este caso el primer valor se tomaría como el más bajo, es decir la formulación más suave y poco resistente a la penetración, y el segundo se tomaría como el valor más alto, es decir, la formulación

más resistente a la indentación y por ende, es más resistente a la penetración o abrasión de otros materiales. En este caso en particular, los materiales más susceptibles a la perforación son aquellos que tienen las concentraciones de almidón más bajas ya que, al igual que en el literal anterior, al mantener la composición de PVA constante durante todas las formulaciones y reducir la cantidad de almidón, la gran parte de la película está compuesta de glicerina, agua y ácido acético 5% por lo que el producto de la gelatinización de estos materiales no arroja películas tan rígidas como los prototipos que contienen almidón de residuos de mango en cantidades más altas<sup>[39]</sup>.

### 5.3. Comparativo frente a propiedades mecánicas de polímeros convencionales

Durante el desarrollo de esta sección se aplicaron varios ensayos de materiales, con el fin de comprobar las características de cada una de las formulaciones realizadas en el laboratorio, de este modo se evidencia que cada una de las probetas obtenidas (en conjunto con su réplica) registran valores comparables con los valores teóricos de cada algunos polímeros convencionales. De acuerdo a esto, en la tabla 17 se evidencia la carga máxima de rotura que pueden llegar a soportar polímeros flexibles o elastómeros comúnmente empleados a nivel industrial.

**Tabla 17.**

*Carga máxima de rotura polímeros convencionales*

<b>POLÍMERO</b>	<b>CARGA MÁXIMA ROTURA (MPa)</b>
<b>Polisopreno</b>	21
<b>Polibutadieno</b>	23
<b>Polibutileno</b>	28
<b>Neopreno</b>	24
<b>Butadieno-estireno</b>	4-21
<b>Butadieno-acrilonitrilo</b>	5

**Nota.** La tabla muestra la resistencia máxima que tienen diferentes tipos de polímeros convencionales.

Basándose en los resultados hallados durante los ensayos mecánicos y ya que varias muestras presentaron características propias de polímeros bastante flexibles o elastómeros, se realiza una comparación frente a la carga máxima que resisten algunos elastómeros comúnmente empleados a nivel industrial como el Poliisopreno, el Polibutadieno, Polibutileno, Neopreno, Butadieno-estireno y Butadieno-acrilonitrilo; de acuerdo a los resultados presentados en la tabla 15 y la tabla 17 se puede observar que las muestras de bioplástico que están referenciadas como C – B1, C – B2 y sus respectivas réplicas son aquellas que tienen resultados de carga máxima (MPa) más cercanos a lo que podría ser el Poliisopreno y el Polibutadieno ya que sus valores oscilan entre 14,5844 MPa y 18,4703 MPa para las muestras mencionadas; por otro lado, las cargas máximas soportadas por polímeros como el Butadieno-estireno y Butadieno-acrilonitrilo son altamente comparables con los resultados registrados por las muestras referenciadas como E – B1 y A – B2 cuyos resultados se encuentran entre 7,05 MPa y 5,07813 MPa, teniendo en cuenta que las réplicas aplicadas tienen resultados bastante similares pues están formuladas con la misma composición. Así, se evidencia que las muestras de bioplástico que contienen una cantidad media – alta de almidón, es decir, para cuestiones de este estudio y según el diseño de experimentos planteado, una composición de 40% y 70%, son aquellas que resistieron mucho mejor a los ensayos de tracción y son estas muestras las que presentaron los valores más altos de carga máxima de rotura, aunque es importante aclarar, que estas son muestras que no fallaron durante el estudio; las muestras que presentaron fallas durante el estudio registraron valores de carga máxima de rotura entre de 2,63281 MPa y 3,2 MPa, estas probetas en particular tienen composiciones muy bajas de almidón.

Por otro lado, ya que se entiende como plásticos flexibles aquellos que soportan bien la deformación hasta cierto punto y cierta cantidad de fuerza, pero de igual forma no consiguen romperse cuando se les imprime algún tipo de fuerza pues su módulo elevado es elevado, entre estos plásticos flexibles se pueden encontrar el polietileno y el polipropileno que son los materiales principales para la fabricación de bolsas plásticas y otros materiales de uso diario. De este modo, se tiene en cuenta que la gran parte de las formulaciones ensayadas mostraron un comportamiento de un plástico flexible pues su deformación tomó bastante tiempo y la acción de una carga muy alta, aún así no se

consiguió la ruptura del material después de cierto tiempo en el que se alcanzara la capacidad máxima que tiene el equipo de ensayos universal para aplicar fuerza a las muestras <sup>[31]</sup>.

Los materiales poliméricos convencionales generalmente son más rígidos y muestran una dureza más alta debido a que su estructura es mucho más consistente por lo que son resistentes los choques y a las penetraciones por otros objetos, es por esto que materiales como el Polipropileno presentan valores muy altos en su módulo de elasticidad, pues la fuerza que requieren para sufrir una deformación es considerable, contrario a las probetas analizadas en este estudio, cuyo módulo de elasticidad varió entre 0,327 MPa y 3,573 MPa a pesar de requerir demasiado esfuerzo para conseguir ruptura en la mayoría de estas.

La dureza de materiales más comunes como el Poliestireo se encuentra entre valores de 85 a 90 Shore-D y materiales como el Polipropileno muestra valores de 73 Shore-D, por lo que de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 16, en este estudio ninguna de las muestras presenta valores cercanos a la dureza de este tipo de materiales pues el valor máximo registrado se encuentra en el rango de 45-50 Shore-D y corresponde a la muestra C – B1 que contiene una composición de almidón de 40% y se preparó a una temperatura de 70°C, las muestras que regeraron ruptura durante la aplicación del ensayo son aquellas que evidencian los valores más bajos de dureza entre 20 Shore-D y 30 Shore-D. Dando a entender con estos valores que algunas de las formulaciones obtenidas aún pueden llegar a ser muy blandas para representar algún tipo de competitividad con estos materiales, en cuánto a su dureza; sin embargo, haciendo referencia a la resistencia a tracción y elongación de los prototipos ensayados en este trabajo, los valores de resistencia a la tracción de las probetas que sufrieron ruptura son bastante similares a los valores que resisten materiales como el Polipropileno mientras que los valores soportados por las muestras que no sufrieron ruptura son mucho más altos, lo que representa que pueden llegar a ser competitivos frente a este tipo de plásticos flexibles comunmente usados. El resultado de la experimentación deja en evidencia que las formulaciones que resultaron comportarse como una plástico flexible

o como un elastómero son aptos para generar competitividad frente a los polímeros convencionales<sup>[34]</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

Por medio de la revisión del estado del arte se seleccionó de manera adecuada el proceso a través del cual se esperaba la síntesis correcta de una película bioplástica a partir de almidón extraído de almidón de mango, la matriz de selección arrojó un valor de 8 resultado como el criterio ponderado más alto por lo que se aplicó el proceso de matriz reforzada como el más favorable y eficiente.

Se establecieron diferentes tipos de proceso para la extracción de almidón de los residuos de mango, con el fin de aprovechar al máximo cada uno de los componentes de lo que se considera como un residuo y el que se desecha después de aprovechar todo el contenido de la pulpa. Gracias al planteamiento de diferentes métodos de extracción, se pudo establecer que el método seco de extracción de almidón de los cotiledones de la semilla de mango presenta un rendimiento más alto, del 22,901% en comparación a las otras dos metodologías de extracción cuyos resultados fueron de 14,235% y 12,157%, esto se debe a que la primer metodología aplicada no requiere etapas adicionales además de las operaciones unitarias planteadas, es decir, el desperdicio de materia prima es bajo por medio de este proceso y, debido a que el aprovechamiento es mayor, la cantidad de películas que se permitieron producir durante el estudio fue bastante numerosa; sin embargo, es importante recalcar que a través de la síntesis de la película bioplástica se pudo observar que este tipo de almidón, al no recibir un pretratamiento como se pudo evidenciar en las metodologías húmedas, se oxida y confiere a la placa de bioplástico un color café y una textura rugosa que puede no ser muy agradable a la vista como se pudo observar en los resultados de la síntesis de las películas bioplásticas.

Durante la preparación del bioplástico se determinó el impacto que tiene la concentración de almidón en cada una de las formulaciones pues se evidenció que las muestras que contienen la cantidad más baja aplicada en el estudio, es decir, una concentración de 10% de almidón son aquellas que, a simple vista, se ven mucho más frágiles que las demás producidas, contrario a las propiedades de aquellas que contienen entre 40% y 70% de almidón. Esto quiere decir que su presencia en un alto o bajo grado define gran

parte de las características del biopolímero obtenido, sin embargo, es importante recalcar que el efecto de la temperatura también es significativo durante la preparación de la mezcla final de bioplástico pues las muestras que se prepararon empleando la temperatura más alta de operación, es decir, 70°C fueron aquellas que fueron más resistentes, además, que la temperatura afecta directamente el tiempo de gelatinización y por ende, el rendimiento energético del proceso desarrollado; además, según los resultados se comprobó durante la preparación del bioplástico que las temperaturas más altas promueven la rápida evaporación del agua empleada durante la mezcla y gracias a esto el proceso de secado será más eficiente.

La síntesis de una película bioplástica a partir de almidón de mango a nivel laboratorio fue satisfactoria pues, al someter las probetas resultantes de la experimentación a ensayos mecánicos se encontró que las muestras que estaban compuestas por la cantidad más alta de almidón (70%) y a 70°C registraron una carga máxima soportada de 16,9688 MPa y su réplica tuvo como resultado 18,4703 MPa, por lo que se concluye que la cantidad más alta de almidón genera una película más rígida y de una mejor calidad con resultados comparables a los polímeros convencionales. En contraste, a las películas producidas con una cantidad más baja de almidón (10%) y a diferentes temperaturas 50 °C, 60°C y 70°C cuyos resultados fueron de 2,60156 MPa, 2,63281 MPa y 3,2 MPa respectivamente, que fueron aquellas que generaron ruptura durante los ensayos mecánicos establecidos.

De igual forma, las películas que registraron valores de dureza entre 45 – 50 Shore-D son aquellas que incluyen una concentración de almidón del 40% y 70%, por lo que se concluye que estas cantidades de almidón permiten obtener un producto altamente competitivo y comparable frente a polímeros convencionales que tienen características propias de los elastómeros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Acosta y C. Blanco. *Obtención y caracterización de almidones nativos colombianos para su evaluación como posibles alternativas en la industria alimentaria*. Tesis de pregrado. Cartagena de Indias, Colombia: Universidad de Cartagena, 2013. 50 p.
- [2] Alvis, A.. Vélez, C. A.. Villada, H. S. y Rada-Mendoza, M. (2008). *Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas*. *Información tecnológica*, 19(1). [Acceso en línea] <https://doi.org/10.4067/s0718-07642008000100004>
- [3] A. Ramírez García. *Caracterización Química de la semilla de Mango (Mangifera indica L.) y la valorización de algunos de sus componentes*. XII encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia.
- [3] E. Arroyo, H. Alarcón. *Obtención de biopolímeros de papa como una alternativa al desarrollo de materiales inocuos al medio ambiente*. En: TECNIA. Junio, Vol. 24, No 2, pp. 13 – 21.
- [4] D Arzapalo Quinto, K Huamán Cóndor, M. Quispe Solano, y C Espinoza Silva, *Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (Chenopodium quinoa Willd) NEGRA COLLANA, PASANKALLA ROJA Y BLANCA JUNÍN*. Artículo 44. (2015).
- [5] ASTM D882 Propiedades de tensión de películas/láminas de plástico delgadas. (s. f.). *Método de ensayo nota técnica materiales plásticos*, 2.
- [6] L, Averous, et al. *Blends of thermoplastic starch and polyesteramide: processing and properties*. En: Revista Applied Polymer Science. Mayo, Vol. 76, No 7, pp. 1121-1135.
- [7] G. Avilés Ruiz. *Polímeros Biodegradables a partir de almidón de Yuca*. Medellín, 2005 p (11).
- [8] , L. V Ballesteros Paz. (s. f.). *Los bioplásticos como alternativa verde y sostenible de los plásticos basados en petróleo*. Universidad De San Buenaventura Cartagena, 22.

- [9] , L. D Carrasco Huanca. (2018). *Extracción de almidón* [Trabajo de grado no publicado]. Universidad Nacional Autónoma de Chota.
- [10] A. Corrales-Bernal, M. E. Maldonado, L. A. Urango, M. C. Franco, B. A. y Rojano, *Mango de azúcar (Mangifera indica), variedad de Colombia: Características antioxidantes, nutricionales y sensoriales Sugar mango (Mangifera indica), variety from Colombia: Antioxidant, nutritional and sensorial characteristics. Revista chilena de nutrición, 14(3). 2014.*
- [11] Cluster de Comunicación Gráfica. Cámara de Comercio de Bogotá. “Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar”. Encontrado en: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar>
- [12] *Extraccion de almidón.* (s. f.). calameo.com. <https://es.calameo.com/read/005193087c8fe3b2314cf>
- [13] M. Espina, J.P Cruz Tirado, R. Siche. *Propiedades mecánicas de bandejas elaboradas con almidón de especies vegetales nativas y fibras de residuos agroindustriales.* En: Scienta Agropecuaria. Junio, Vol. 7, No. 2. pp. 15-18.
- [14] E. Fernández, 1998. *Aprovechamiento integral del mango (Mangifera indica L.). Utilización de la semilla como fuente de almidón.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Biología. Caracas. 120 p.
- [15] *Matriz de selección de procesos críticos está matriz permite...* (s. f.). ResearchGate. [Acceso en línea] [https://www.researchgate.net/figure/Matriz-de-seleccion-de-procesos-criticos-Esta-matriz-permite-seleccionar-los-procesos\\_fig2\\_297735060](https://www.researchgate.net/figure/Matriz-de-seleccion-de-procesos-criticos-Esta-matriz-permite-seleccionar-los-procesos_fig2_297735060)
- [16] E. Flores-Gorosquera, J. García-Suárez, F. E. Flores-Huicochea, M. C., Núñez-Santiago, R. A. González-Soto, y L. A Bello-Pérez, . (2004). *Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (Musa paradisiaca). estudio en planta piloto. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del IPN., 6.*

- [17] J A Florez, *Acetilación de almidón nativo de batata (Ipomeas batata L)*. Tesis de pregrado, Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, 2016, pp, 30 – 45
- [18] A. V. García Quiñonez, *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz.*, Tesis de pregrado. Santa Tecla, San Salvador: Universidad Especializada en Ingeniería, 2015
- [19] H. S. Hernandez, (s. f.). *Matriz de producto-proceso*. Academia.edu - Share research.[Acceso en línea] [https://www.academia.edu/29915304/MATRIZ\\_DE\\_PRODUCTO\\_PROCESO](https://www.academia.edu/29915304/MATRIZ_DE_PRODUCTO_PROCESO)
- [20] J. S Holguin Cardona, *Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa* [Trabajo de grado no publicado]. Fundación Universidad de América. . (2019).
- [21] Ifunam. (s. f.). Instituto de Física - UNAM. [Acceso en línea] [https://www.fisica.unam.mx/es/areas\\_investigacion/propiedades\\_mecanicas\\_magneticas\\_materiales.php](https://www.fisica.unam.mx/es/areas_investigacion/propiedades_mecanicas_magneticas_materiales.php)
- [22] Kaur, M., Singh, N., Sandhu, K., & Guraya, H. (2004). *Physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of starches separated from kernels of some Indian mango cultivars (Mangifera indica L.)*. *Food Chemistry*, 85, 131-140 ARISTIZABAL, JOHANNA. SANCHES, TEREZA. MEJÍA LORÍO, Danilo Guía Técnica Para La Producción Y Análisis De Almidón De Yuca. BOLETIN D SERVICIOS AGRICOLAS DE LA FAO
- [23] L. Cadavid Rodriguez y I. Bolaños Valencia, *"Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana"*, *Energética*, no. 46, p. 24, 2015. [Accessed 22 August 2020].
- [24] *La dureza en los plásticos*. (s. f.). [Acceso en línea] <https://todoenpolimeros.com/2019/07/08/la-dureza-en-los-plasticos/>

- [25] *Matriz de ponderacion.* (s. f.). Share and Discover Knowledge on SlideShare. [Acceso en línea] <https://es.slideshare.net/gsaenz/matriz-de-ponderacion>
- [26] C. Medina, A. Paredes, M. E. Rodríguez, M. Moreno, D. Belén-Camacho, D. García, y C. Ojeda, C. *Evaluación de dos métodos de extracción de almidón a partir de cotiledones de mango.* *Bioagro*, 22(1), 9. (2010).
- [27] *Método de los factores ponderados | PDF | naturaleza | science.* (s. f.). Scribd. [Acceso en línea] <https://es.scribd.com/doc/86242280/METODO-DE-LOS-FACTORES-PONDERADOS>
- [28] M. A Narvaes Guerrero. *Optimización de las propiedades mecánicas de bioplásticos sintetizados a partir de almidón.* Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito, 2016
- [29] M. A Ortiz Ramirez, *Evaluación de un bioplástico de almidón de semillas de mango (mangifera indica) con aplicación potencial en envases* [Trabajo de grado no publicado]. Universidad El Bosque. (2019).
- [30] *Propiedades mecánicas.* (s.f.). Tecnología de los Plásticos. [Acceso en línea] <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>
- [31] *Propiedades mecánicas de los polímeros.* (s. f.).[Acceso en línea] Polymer Science Learning Center. <https://pslc.ws/spanish/mech.htm>
- [32] , O. I., Peñaranda Contreras, J. E Perilla Perilla, y N. A Algecira Enciso. *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos.* *Revista ingeniería e investigación*, 28(3), 47–52. (2008).
- [33] I. Ruiloba, Li, M., Quintero, y J. Correa. *Elaboración de bioplástico a partir de almidón de semillas de mango.* *Revista de Iniciación Científica*, 4, 28–32. [Acceso en línea] [https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1815\(2018\)](https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1815(2018)).

- [34] SANMETAL, S.A. - *division termoplásticos : Polipropileno - PP.* (s. f.). SANMETAL, S.A. - Metal - Estanqueidad. [Acceso en línea] <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/polipropileno-pp/18>
- [35] D. S. Sayago Ayerdi, y D. E. Álvarez Parrilla, *Alimentos vegetales autóctonos iberoamericanos subutilizados.* CYTED. (2018).
- [36] SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN POLÍMERO BIODEGRADABLE A PARTIR DEL ALMIDÓN DE YUCA Revista EIA, núm. 8, diciembre, 2007, pp. 57-67 Escuela de Ingeniería de Antioquia Envigado, Colombia
- [37] Universidad de las Américas de Puebla(s. f.). Colecciones Digitales UDLAP. [Acceso en línea] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/laec/maldonado\\_z\\_r/apendiceQ.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/laec/maldonado_z_r/apendiceQ.pdf)
- [38] [Acceso en línea] (s. f.). [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/Bol\\_Insumos31\\_ene\\_2015.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/Bol_Insumos31_ene_2015.pdf)
- [39] Materials Standard (s. f.). materialstandard – standard. [Acceso en línea] <http://materialstandard.com/wp-content/uploads/2019/07/DIN-53505:2000-EN-POOBLic8.pdf>
- [40] UPV Universidad Politécnica de Valencia. *Unidad 2: Características mecánicas de los materiales.* (s. f.). [Acceso en línea] [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2\\_1.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2_1.html)
- [41] M. A. Heredia Castiblando y H. A. Pineda Salinas. Universidad Católica de Colombia. “Extracción de almidón a partir de residuos orgánicos para la fabricación de utensilios biodegradables”, 2016.
- [42] A. A. Villalta Estrada. *Evaluación de la biodegradabilidad de diferentes formulaciones de un bioplástico sintetizado, a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango (Mangifera indica L.) a escala laboratorio.* [Trabajo de grado no publicado]. Universidad de san carlos de guatemala. (2018).

[43] UPV Universidad Politècnica de València. *Unidad 15. Materiales Poliméricos y Compuestos.* (s. f.). [Acceso en línea] [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_5.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_5.html)

[44] ICONTEC. (1994). Norma Técnica Colombiana. *NTC 1266, Segunda actualización,* 9.

## GLOSARIO

**Acetilación.** Reacción química en la que un grupo acetyl se añade a otras moléculas.

**Ácido acético.** Compuesto orgánico incoloro con olor a arce y son sabor agrio bastante marcado.

**Ácido ascrórbico.** Compuesto químico con propiedades antioxidantes que impide el paso de sustancias químicas muy reactivas al tejido que se adhiere.

**Almidón.** Sustancia con textura de polvo, inodora y generalmente de color blanco con propiedades variadas.

**Bioplástico.** Material derivado de diferentes fuentes vegetales con capacidades de biodegradación.

**Bisulfito de sodio.** Sal ácida que se comporta como un agente reductor y funciona como conservante e inhibidor de crecimiento microbiano.

**Centrifugación.** Proceso de separación en la que se emplea la diferencia entre los sólidos y el fluido en el que se encuentra suspendido.

**Copolímero.** Polímero formado por dos o más tipos diferentes de monómeros que están unidos a la cadena polimérica.

**Cotiledón.** Parte más interna de la semilla de un fruto donde se conserva el germen.

**Elastómero.** Elastómeros son materiales flexibles que se pueden deformar fácilmente y vuelven rápidamente a su forma y tamaño original una vez liberados de la tensión.

**Secado.** Operación unitaria de conservación basada en la eliminación de agua libre del material.

**pH.** potencial de hidrógeno de una solución, mide acidez o alcalinidad.

**Polímero.** Macromolécula compuesta de moléculas más pequeñas denominadas monómeros.

## **ANEXOS**

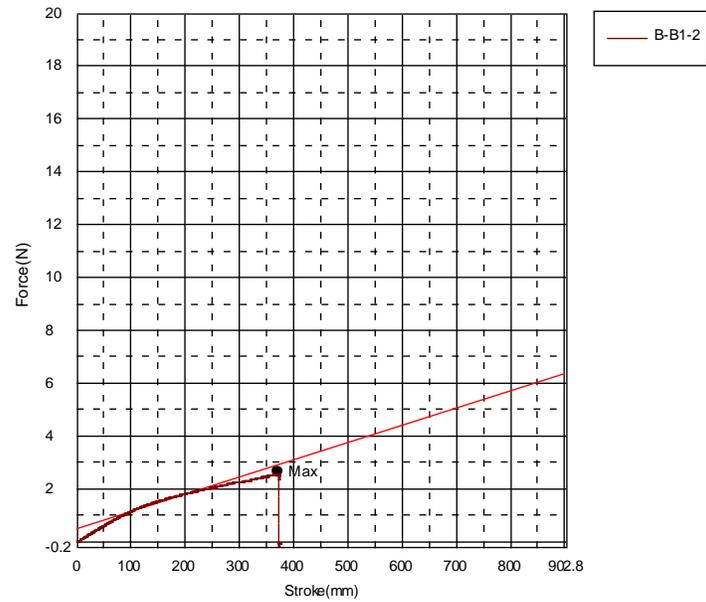
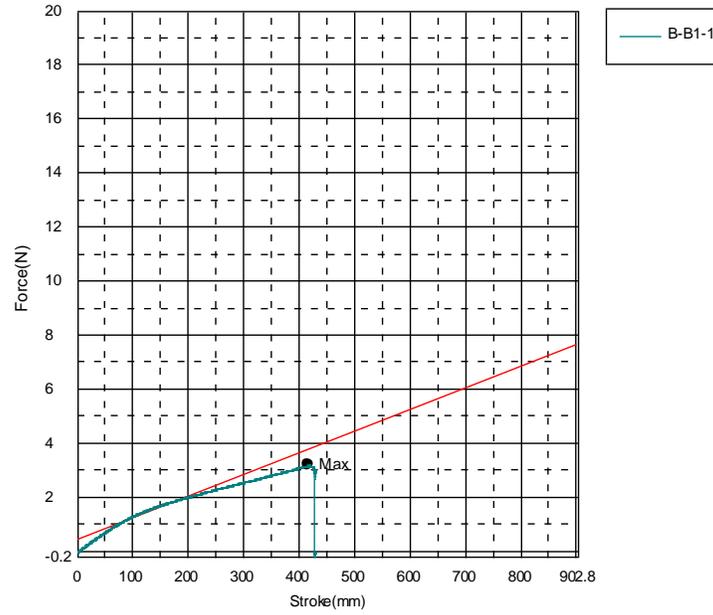
## **ANEXO 1**

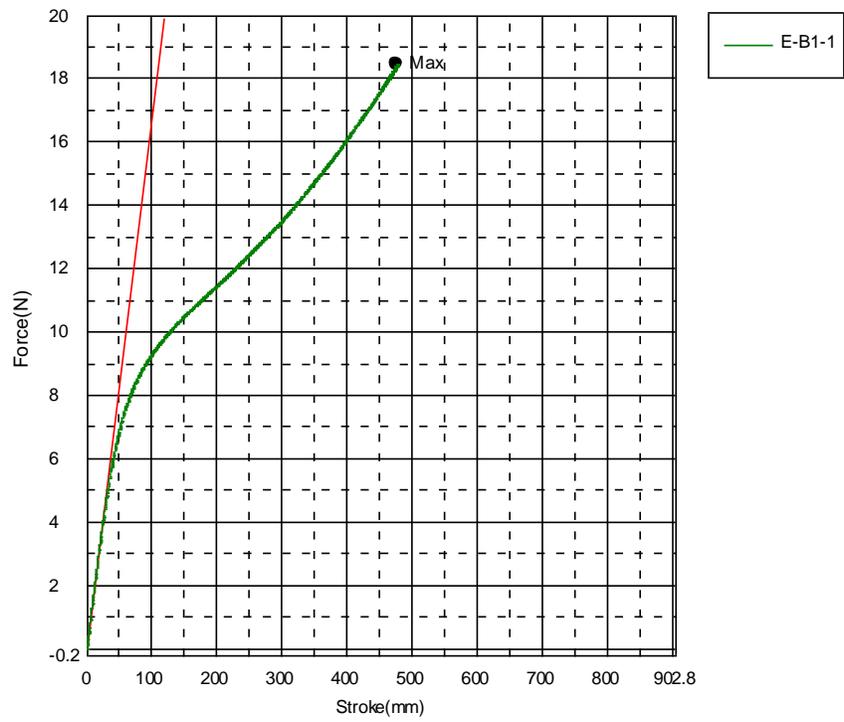
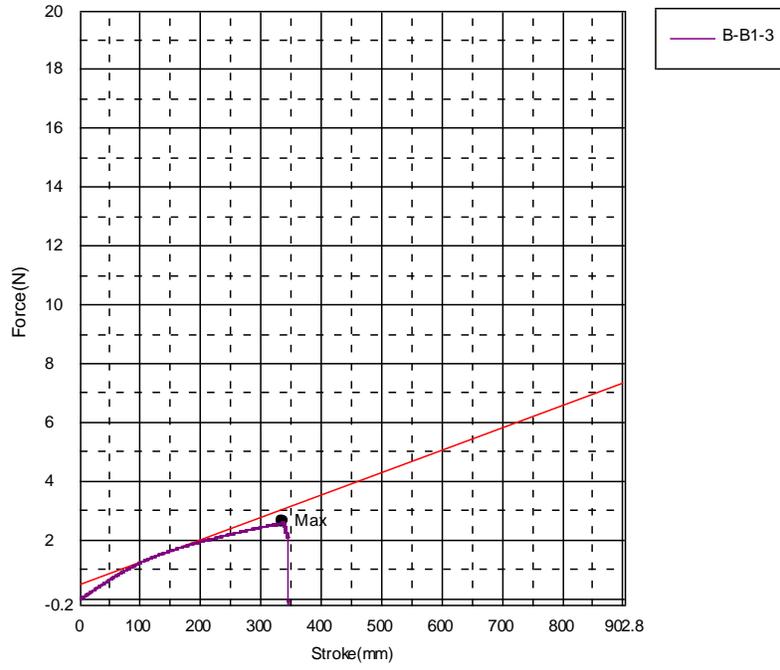
### **RECOMENDACIONES**

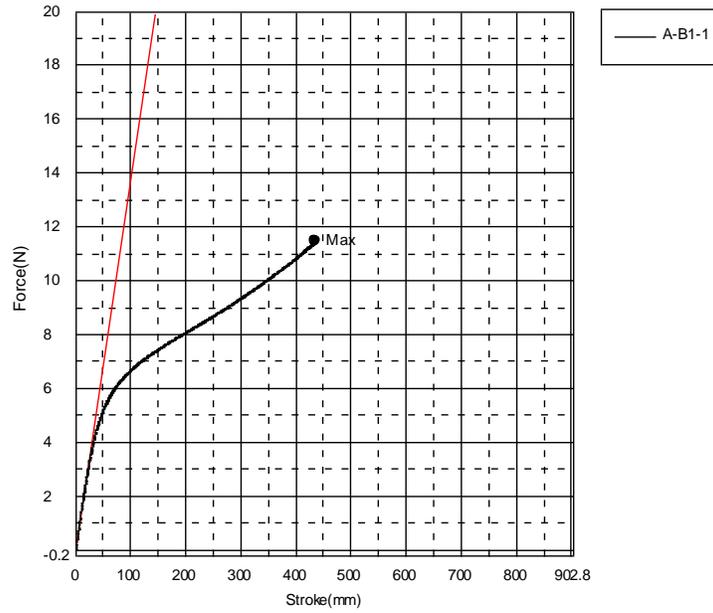
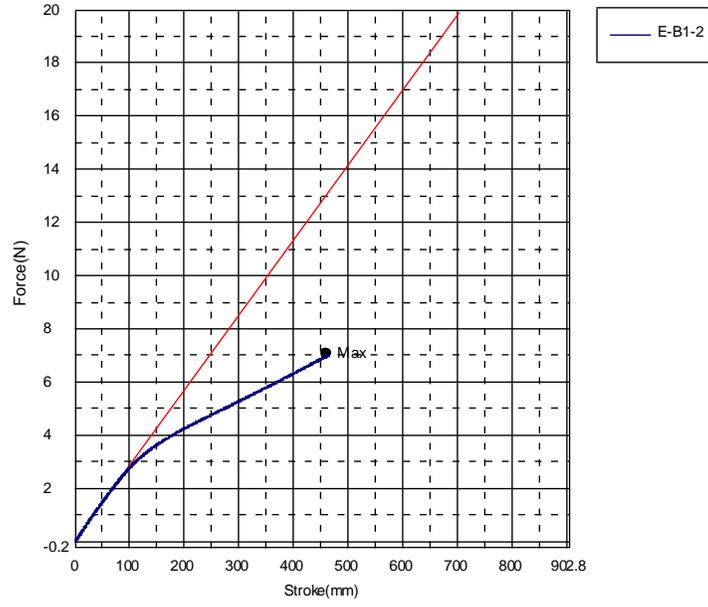
- 1.** Proponer la investigación de la biodegradabilidad del producto obtenido, pues luego de unos días de almacenamiento libera cierta cantidad de humedad que aún se contiene en su estructura, lo que puede indicar un alto grado de biodegradabilidad.
- 2.** Estudiar la posibilidad de emplear un componente que refuerce la matriz que sea de origen orgánico con el fin de asegurar que el biopolímero será 100% natural.
- 3.** Escalar el proceso a nivel laboratorio a un proceso a nivel industrial para estudiar la viabilidad económica del mismo.
- 4.** Es importante definir las condiciones de operación de cada etapa del proceso pues gracias a esto, se puede tener un mejor control de cada una, evitando de esa manera pérdidas de materia prima y de energía que pueden llegar a ser importantes en caso de escalar a nivel industrial un proceso de este tipo.

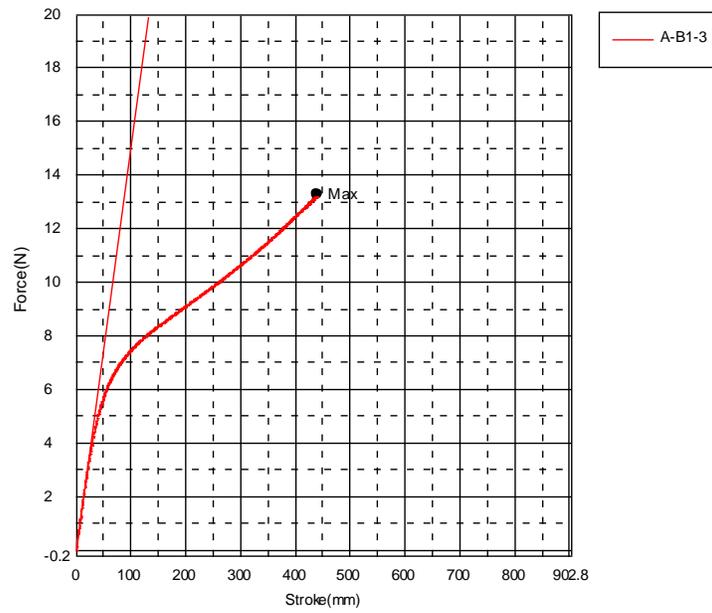
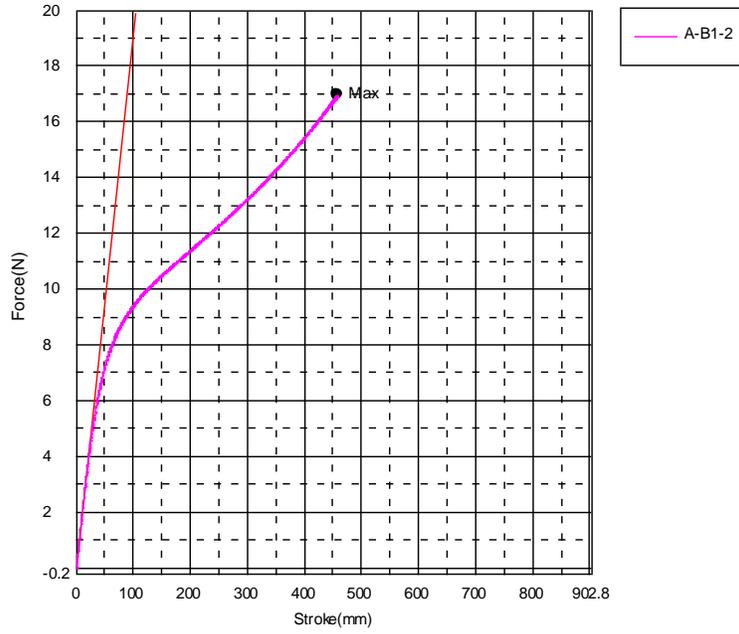
## ANEXO 2.

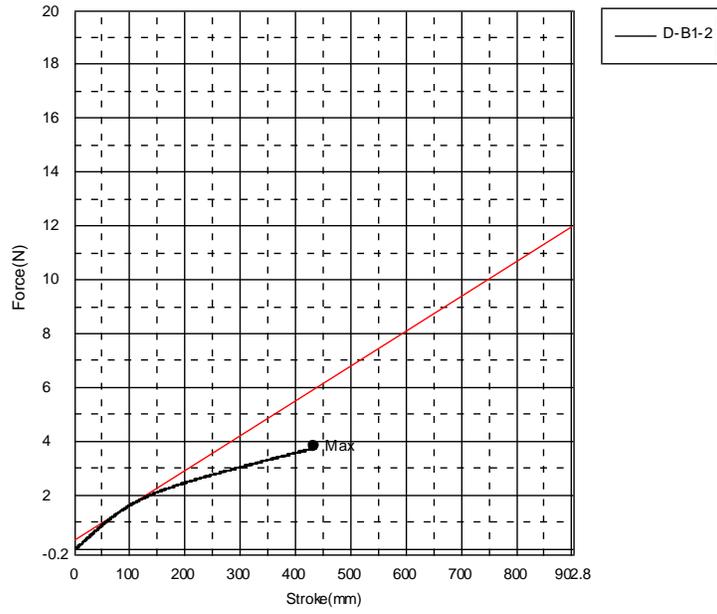
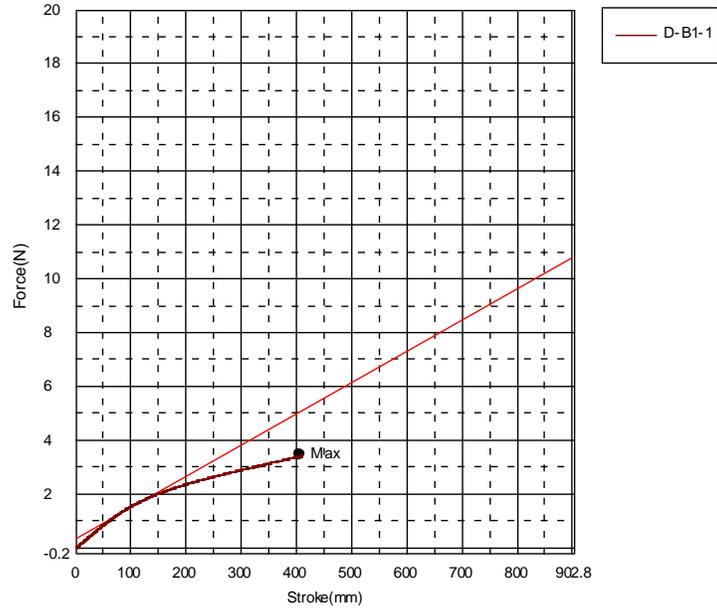
### GRÁFICAS FUERZA- DESPLAZAMIENTO

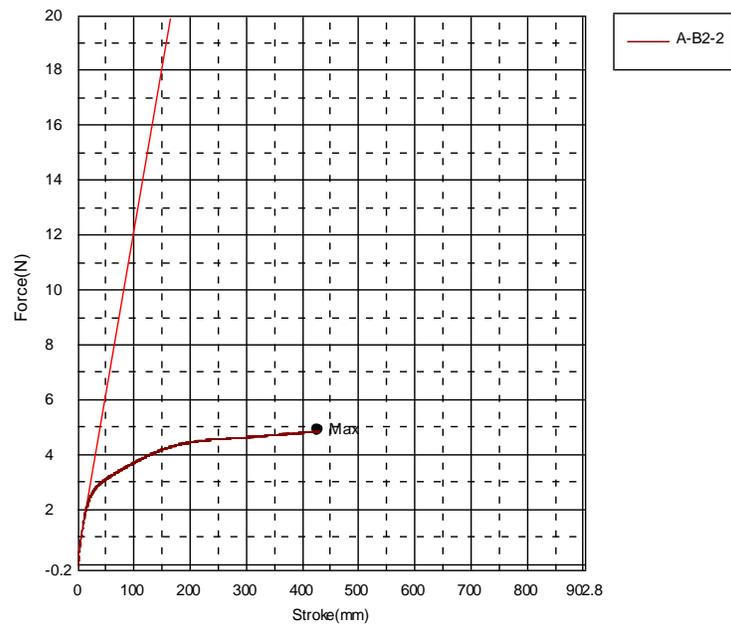
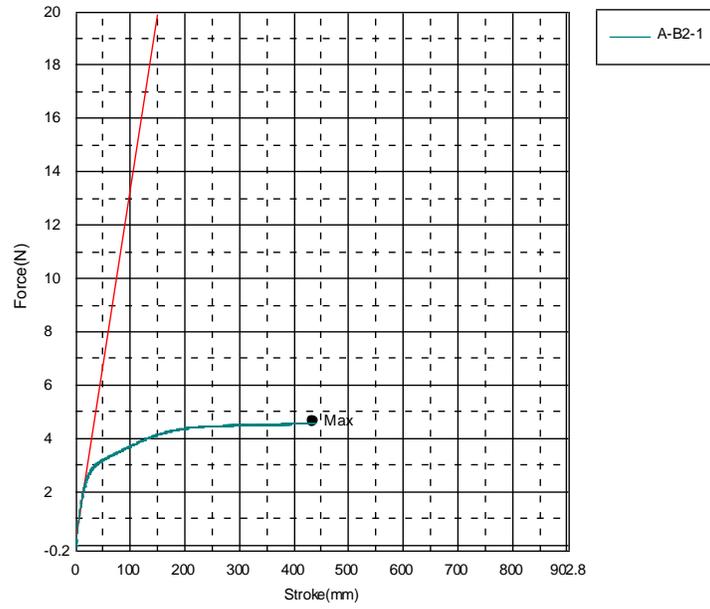


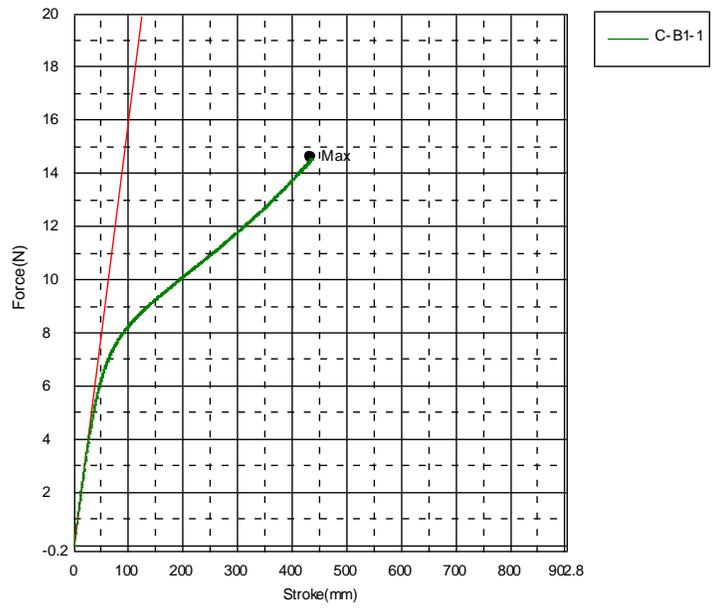
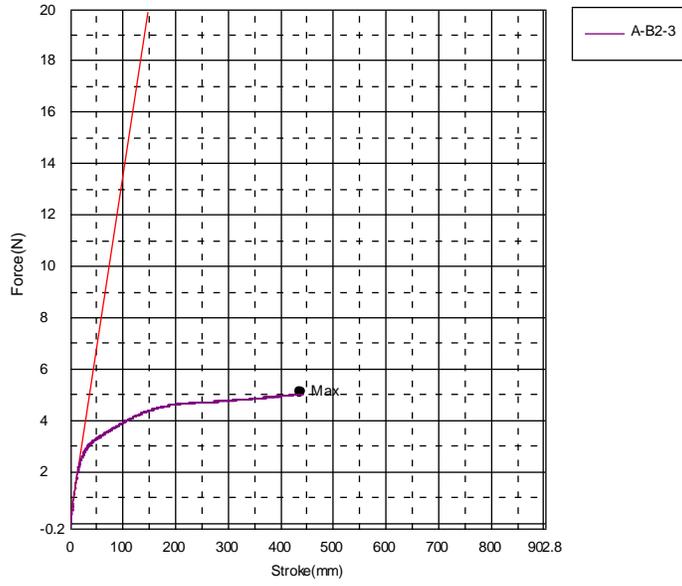


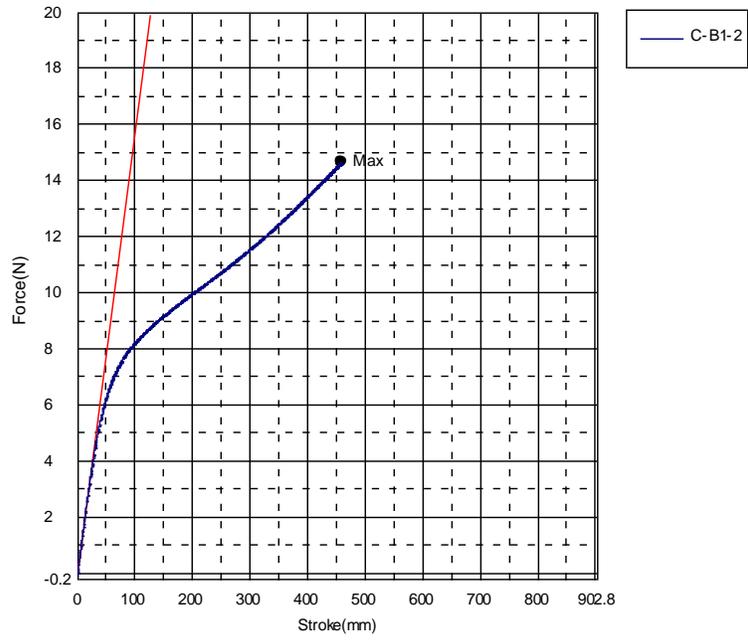












### ANEXO 3.

### GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN

