

**OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE CASCARILLA DE CAFÉ**

**JUAN SEBASTIAN DUARTE BETANCUR**

**FABIAN HUMBERTO GRANADA SACRISTÁN**

**Proyecto de Grado para optar al título de**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Orientador**

**Felipe Correa Mahecha**

**Ingeniero Químico**

**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2024**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

FIRMA DIRECTOR

---

FIRMA DEL PRESIDENTE JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

Bogotá D.C, Enero de 2024

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Concejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dr. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y de Extensión

Dr. Susan Margarita Benavides Trujillo

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa de Ingeniería QuímicaIng.

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.

## **DEDICATORIA**

Hoy, al culminar este emocionante capítulo de mi vida con la realización de mi proyecto de grado, quiero dedicar estas palabras llenas de gratitud y amor hacia cada uno de ustedes. Su apoyo incondicional ha sido la brújula que me ha guiado a lo largo de este arduo viaje, y no puedo expresar con palabras cuánto significa para mí.

Mamá, tú has sido mi fuente constante de inspiración. Tu sacrificio, dedicación y amor infinito me han motivado a esforzarme cada día, recordando que puedo lograr cualquier cosa que me proponga. Tus palabras de aliento y tus abrazos en los momentos difíciles han sido mi refugio, y estoy eternamente agradecido por tenerte como madre.

Familia, su apoyo inquebrantable ha sido mi ancla en los días turbulentos. Cada uno de ustedes ha estado a mi lado, compartiendo mis alegrías y consolándose en los momentos de incertidumbre. Saber que cuento con su respaldo me ha dado la confianza para perseverar y seguir adelante, incluso cuando las cosas parecían imposibles.

Hoy, este logro no solo es mío, sino también de ustedes. Cada sacrificio, cada palabra de ánimo y cada gesto de amor han contribuido en gran medida a que alcance este momento. Mi corazón se llena de gratitud al pensar en todo lo que han hecho por mí.

Así que, desde lo más profundo de mi corazón, quiero dedicar este proyecto de grado a ustedes, mi querida mamá y mi amada familia. Son mi razón de ser, mi mayor fortaleza y mi eterna fuente de amor. Sin su apoyo, nada de esto sería posible.

Con amor y gratitud infinitos,

## **DEDICATORIA**

En estos ultimo días donde culminare mi carrera y me graduare con honores de la universidad que me inspiro y me ayudo demasiado en mi crecer y mi diario vivir, quisiera dedicarle esta gran meta de mi vida que se esta cumpliendo, a mis padres principalmente que han sido el apoyo mas incondicional que he tenido desde que empecé el camino de la vida escolar hasta donde he llegado hasta el momento que es mi vida universitaria.

También a mis compañeros y amigos que me ha regalado este camino, por las experiencias vividas y por los buenos consejos que me han ayudado a poder llegar a este momento donde estoy.

Y por último a los profesores que han sido un gran apoyo para este constante aprendizaje y proceso que está a punto de culminar y a abrirme las puertas de un mundo nuevo.

Fabian Humberto Granada Sacristán

Juan Sebastian Duarte Betancur

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a cada uno de ustedes. Su apoyo inquebrantable ha sido mi faro en los momentos de oscuridad y mi fuente de inspiración constante a lo largo de este emocionante viaje.

A la Universidad,

Quiero reconocer y agradecer a esta institución que ha sido mucho más que un lugar de aprendizaje. Ha sido mi hogar intelectual, un refugio donde he crecido tanto académica como personalmente. Gracias por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para convertirme en el profesional que soy hoy. Cada profesor, cada compañero de clase y cada oportunidad de aprendizaje han sido piezas fundamentales en mi formación.

Y a esa persona especial que me ayudó a crecer como persona y profesional,

No puedo pasar por alto el impacto que has tenido en mi vida. Tus consejos, tu orientación y tu apoyo inquebrantable me han ayudado a crecer en todos los aspectos. Has sido un mentor excepcional, una fuente constante de sabiduría y un ejemplo a seguir. Mi éxito no habría sido posible sin tu guía y amistad.

En este día tan significativo, quiero que sepan que su contribución ha sido esencial en mi camino hacia la graduación. Su confianza en mí, su paciencia y su amor han sido los cimientos sobre los cuales he construido mi éxito. Espero que se sientan tan orgullosos como yo de lo que hemos logrado juntos.

Con profunda gratitud,

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a mis padres y mi familia, porque nunca desconfiaron de mí y nunca me han dejado de apoyar en este camino de tantos obstáculos que nos presenta la vida y la universidad, donde nunca dejaron que me rindiera y estuvieron día a día en la lucha conmigo.

Igualmente, a los profesores por su paciencia y comprensión y a su vez las enseñanzas que nos dan cada día no solo en el ámbito académico si no también personal que es fundamental para la vida profesional y para vivir en sociedad.

También agradecer a mis compañeros por el apoyo por siempre luchar para poder culminar esta etapa de nuestras vidas con honores.

Y a la universidad por abrirme las puertas y poder vivir esta experiencia tan agradable donde conocí un nuevo mundo donde maduré, conocí nuevas personas que son importantes y apreciadas por mí.

Muchas gracias a todos los nombrados, y este proyecto también es de ustedes.

Juan Sebastian Duarte Betancur



## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEORICO	18
1.1 Problemática de los plásticos	18
1.2 Residuos orgánicos	19
1.3 Café	20
<i>1.3.1 Café arábigo</i>	21
1.4 Cascarilla de café	22
1.5 Uso de la cascarilla de café	23
1.6 Celulosa	24
<i>1.6.1 Estructura Química de la Celulosa</i>	24
<i>1.6.2 Origen natural</i>	25
1.7 Producción Industrial	25
1.8 Lignina	26
1.9 Hidróxido de sodio	28
1.10 Técnicas de preparación de biopelículas	28
<i>1.10.1 Extrusión</i>	28
<i>1.10.2 Hidrólisis Ácida</i>	29
<i>1.10.3 Casting</i>	30
<i>1.10.4 Fermentación enzimática</i>	30
<i>1.10.5 Pirólisis de celulosa</i>	31

1.11 Plásticos	31
<i>1.11.1 Bioplásticos</i>	31
2. CARACTERIZACIÓN DE LA CASCARILLA DE CAFÉ	32
2.1 Determinación del % de humedad	32
2.2 Determinación del % de cenizas	32
2.3 Determinación del % de lignina	33
2.4 Densidad aparente y densidad relativa	33
2.5 Determinación del % de celulosa	33
2.6 Resultados de la caracterización	33
2.7 Análisis de resultados	36
<i>2.7.1 Diagrama de cajas y bigotes</i>	36
3. OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO	39
3.1 Obtención del bioplástico por método casting	39
3.2 Plastificante	40
<i>3.2.1 Glicerina</i>	40
<i>3.2.2 Alcohólo polivinílico (PVA)</i>	41
<i>3.2.3 Alginato de Sodio</i>	42
3.3 Diseño de experimentos	42
4. PROPIEDADES MECÁNICAS	44
4.1 Características físicas del bioplástico	44
4.2 Resistencia a la elongación	45
4.3 Resultados estrés promedio máximo y porcentaje tensión promedio máximo para cada ensayo	46
4.4 Análisis ANOVA	52

<i>4.4.1 Fuerza máxima y estrés</i>	53
<i>4.4.2 Tensión</i>	54
<i>4.4.3 Desplazamiento</i>	55
4.5 Comparativo frente a propiedades mecánicas de polímeros convencionales	56
4.6 Determinación del % de humedad del bioplástico	57
5. CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	
ANEXOS	

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Cascarilla de café</i>	23
Figura 2 <i>Estructura química de la celulosa</i>	25
Figura 3 <i>Molde del método casting</i>	30
Figura 4 <i>Comparativa composición cascarilla de Café</i>	38
Figura 5 <i>Métodos usados para la fabricación de bioplástico</i>	40
Figura 6 <i>Estructura química de la glicerina</i>	41
Figura 7 <i>Estructura química del PVA</i>	42
Figura 8 <i>Prueba de fuerza y tensión del bioplástico</i>	47
Figura 9 <i>Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 1</i>	48
Figura10 <i>Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 2</i>	49
Figura11 <i>Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 3</i>	50
Figura12 <i>Fuerza máxima soportada por la probeta que menor fuerza resistió con generación de ruptura formulación 4</i>	51

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Características del café Arábigo y el café robusto</i>	21
Tabla 2 <i>Composición de cascarilla de café Arábigo</i>	24
Tabla 3 <i>Densidad aparente</i>	36
Tabla 4 <i>Composición de la cascarilla de café</i>	37
Tabla 5 <i>Diseño de experimentos</i>	43
Tabla 6 <i>Características físicas del bioplástico obtenido por replica</i>	44
Tabla 7 <i>Características físicas del bioplástico promedio</i>	45
Tabla 8 <i>Estrés y tensión promedio máximo</i>	46
Tabla 9 <i>Fuerza máxima y estrés ANOVA</i>	53
Tabla 10. <i>Tensión ANOVA</i>	54
Tabla 11. <i>Desplazamiento ANOVA</i>	55
Tabla 12. <i>Carga máxima de polímeros</i>	56
Tabla 13. <i>Porcentaje de humedad del bioplástico</i>	57

## RESUMEN

Con el objetivo de reducir la contaminación ambiental producto de la inadecuada gestión de los residuos y trabajar en pro del aprovechamiento de los mismos, se busca reincorporar un residuo sólido aprovechable a un nuevo proceso, por lo anterior el proyecto de grado se centra en la extracción de celulosa de la cascarilla de café para usarla como materia prima para la obtención de un bioplástico, comenzando con su caracterización desde un punto de vista fisicoquímico y así seleccionar los parámetros adecuados que permitan la producción del bioplástico y evaluar sus propiedades mecánicas. Un subproducto que a menudo se descarta en grandes cantidades, es el caso de la cascarilla de café, que contribuye a la contaminación del medio ambiente. La transformación de este desperdicio en un material útil y sostenible es el objetivo de este proyecto para reducir su impacto en el medio ambiente.

Para lograr este objetivo, se realizaron varias acciones, comenzando por la recolección y preparación de la cascarilla de café, la cual consistió en realizar un método de cuarteo y posteriormente la limpieza de la misma, luego se llevaron a cabo pruebas fisicoquímicas para determinar las propiedades y así seleccionar los parámetros óptimos para la obtención de la biopelícula. Para la producción del bioplástico por medio del método de casting se tuvieron en cuenta variables como, cantidad de celulosa, glicerina, alcohol polivinílico (PVA), agua y rango de temperatura, en donde mediante un diseño experimental se realizaron diferentes combinaciones y muestras que permitieron la obtención del producto, al obtener el producto deseado se realizaron pruebas mecánicas en el laboratorio utilizando la máquina universal de ensayos, la cual permite la evaluación de las propiedades mecánicas del producto logrando determinar así la resistencia, flexibilidad y otras características importantes del material producido. Con lo realizado se logró definir que para la elaboración del bioplástico a partir de la cascarilla de café es necesario la adición de 14 g de celulosa, 12 ml de glicerina, 3,75 g de PVA y 30 ml de agua a una temperatura de 90°C, ya que con esta combinación las pruebas mecánicas presentaron resultados de interés que permitieron que el bioplástico sea incorporado en una nueva cadena productiva y propender por la no utilización de plásticos de un solo uso.

Palabras clave: Bioplástico, Cascarilla de café, Casting, Glicerina, Alcohol polivinílico, Celulosa

## INTRODUCCIÓN

El panorama actual respecto a la producción de plástico enmarca una problemática latente frente a la inadecuada disposición de los residuos sólidos, En las últimas décadas, la producción mundial de plástico ha experimentado un crecimiento significativo, para el año 1950 la producción anual era de aproximadamente 2 millones, y para 2019 se estimó que superaba los 359 millones de toneladas.[1] Según un informe del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en Colombia se producen alrededor de 12.6 millones de toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales alrededor del 11% son plásticos.[2], se sabe que existe una mala disposición de los residuos lo que ha traído consigo impactos negativos sobre el medio ambiente y sobre el ser humano directamente, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas más sostenibles y amigables respecto al manejo de residuos plásticos específicamente. En el mismo marco de generación de residuos se encuentran los de carácter orgánico como es el caso de la cascarilla de café, residuo proveniente de la industria del café, según la Organización Internacional del Café (ICO), las exportaciones mundiales de café ascendieron a 10,88 millones de sacos en diciembre de 2022, en comparación con 9,89 millones en diciembre de 2021[3], por lo que en el país es fundamental para la economía y desarrollo del mismo y este al ser procesado genera más de 700.000 toneladas de residuos orgánicos anuales.[4]

Este proyecto tiene como objetivo investigar la viabilidad de incorporar la cascarilla de café, dada su rica composición en celulosa y lignina, en el proceso de fabricación de bioplásticos mediante técnicas de extracción y modificación química. El propósito es integrar este producto en una nueva cadena productiva, en consonancia con el paradigma de la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible, especialmente los objetivos 11, 12 y 14, que abordan las áreas de ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumo responsables, y vida submarina.

Estos objetivos buscan reducir el impacto ambiental asociado a la generación de residuos sólidos, promoviendo una gestión efectiva mediante la reducción, el reciclaje y la reutilización de dichos residuos. Asimismo, se pretende identificar ecosistemas estratégicos para la preservación y conservación de la vida submarina. En el contexto colombiano, se ha avanzado en la gradual disminución de la producción y consumo de productos plásticos de un solo uso, conforme a la legislación establecida por la ley 2232 de 2022. Estas acciones tienen como finalidad transformar el entorno en un espacio más sostenible y garantizar un ambiente saludable para la población en general.

Por lo tanto, la obtención de bioplásticos es de suma importancia para el desarrollo y las políticas de gestión sobre la reutilización de residuos, se presentan retos en función de la calidad de la materia prima y de la formulación de los aditivos para el proceso de modificación, para este trabajo se contempló la adición de plastificantes como glicerina y alcohol polivinílico (PVA) y ácido acético como entrecruzante, esto agregado a la celulosa extraída de la cascarilla de café, ya que en revisión bibliográfica se determina dichas adiciones como las variables con mejor comportamiento y respuesta y que mediante pruebas obtuvo la combinación adecuada para la elaboración del bioplástico, los hallazgos de esta investigación podrán beneficiar no solo el campo de los materiales sostenibles, sino también la industria del café, al agregar valor a un desecho que comúnmente es desperdiciado.



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Producir un bioplástico aprovechando la cascarilla del residuo de café con adición de un plastificante.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente la cascarilla del café arábica para la producción del bioplástico.
- Seleccionar los parámetros para la producción de un bioplástico empleando lacascarilla de café.
- Evaluar las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido empleando métodos estandarizados.

## 1. MARCO TEORICO

La idea principal de este fragmento del documento es brindar información fundamental para poder entender de mejor manera los términos que fueron considerados para la realización del proyecto, fundamentalmente para explicar el uso que se le puede dar a los residuos de café, en este caso a la cascarilla de café.

### 1.1 Problemática de los plásticos

El desarrollo de compuestos basados en productos naturales representa una tarea compleja en vista del diseño de nuevos materiales de embalaje ecológicos alternativos a los polímeros sintéticos, la industria actualmente en el mundo está migrando a implementar dentro de sus compañías áreas de proyectos las cuales están encargadas principalmente de generar ideas innovadoras con el fin de optimizar los procesos actuales y con ello generar una disminución de tiempos de producción, mejora de procesos y sobre todo de aumentar las rentabilidades. [3]

De acuerdo con un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), cada año se producen 300 millones de toneladas de plástico en todo el mundo, y se estima que aproximadamente el 50% de este plástico se utiliza una sola vez antes de ser desechado. Además, se estima que alrededor de 8 millones de toneladas de plástico terminan en los océanos cada año, lo que equivale a descargar un camión lleno de plástico en el océano cada minuto [3]. El impacto del plástico en la vida marina es uno de los problemas más evidentes. Según el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), se estima que aproximadamente el 80% de los desechos plásticos en los océanos provienen de la tierra, y los desechos plásticos que flotan en los océanos pueden matar a animales como tortugas, ballenas y aves marinas, que ingieren trozos de plástico o quedan atrapados en él. Además, los micro plásticos, que son partículas de plástico de menos de 5 mm de diámetro, pueden ser ingeridos por peces y otros animales marinos, lo que afecta la salud y la calidad de la cadena alimentaria marina [5]

El problema del plástico también tiene un impacto negativo en el medio ambiente terrestre. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se estima que solo el 9% del plástico producido en todo el mundo se recicla, lo que significa que la gran mayoría termina en vertederos o en el medio ambiente. Los desechos plásticos que se acumulan en los suelos y en los ríos pueden afectar la fertilidad del suelo y la calidad del agua, y su quema puede generar gases contaminantes y tóxicos que pueden ser perjudiciales para la salud humana [5]

El plástico tiene un impacto económico y social. La limpieza y la gestión de residuos plásticos son costosas y pueden ser un desafío para los países más pobres y para las comunidades más vulnerables. Además, según la Fundación Ellen MacArthur, se estima que la economía global pierde alrededor de 80 mil millones de dólares anuales debido a la falta de recuperación y reciclaje del plástico. [6] El uso masivo del plástico y su inadecuada gestión de residuos son uno de los mayores problemas ambientales de nuestro tiempo. Es esencial que tomemos medidas para reducir nuestro consumo de plástico y para gestionar adecuadamente los desechos plásticos existentes a través de políticas y prácticas más sostenibles y responsables En todo el mundo, se estima que se utilizan aproximadamente 5 billones de bolsas de plástico cada año, lo que equivale a 160 000 bolsas por segundo. Solo en la Unión Europea, se utilizan alrededor de 100 billones de bolsas de plástico de un solo uso cada año.[5]

En 2020, China fue el principal productor de plástico en el mundo, con una producción total, de 38,6 millones de toneladas, seguido de Estados Unidos con 19,5 millones de toneladas.[3], así mismo se estima que, en 2018, se produjeron 359 millones de toneladas de plástico en todo el mundo, y se prevé que esta cifra aumente a 619 millones de toneladas en 2030 según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) [4], estas cifras contemplan el panorama de contaminación plástica, por ejemplo el 80% de los desechos plásticos en los océanos provienen de la tierra, y el plástico de un solo uso es uno de los principales contribuyentes a esta contaminación [6]

En Colombia en el año 2019, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible lanzó una campaña llamada "Colombia Limpia", con el objetivo de reducir el uso de plásticos de un solo uso en el país, la campaña se centró en promover la separación y el reciclaje de residuos, y en fomentar el uso de alternativas sostenibles a los plásticos de un solo uso, esto se ha fundamentado en la Ley 2232 de 2022, que para el presente año 2023 se continua en las labores para adicionarlo dentro del Decreto 1076 de 2015 (decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible)[7]

## **1.2 Residuos orgánicos**

Los residuos orgánicos, se perciben comúnmente como elementos desaprovechados y no destinados al consumo humano. No obstante, es fundamental destacar que una porción significativa de estos residuos puede contribuir positivamente a la mejora de las condiciones del

suelo. Estos residuos provienen de productos como frutas, verduras y ciertas leguminosas, los cuales a menudo no se utilizan debido a la falta de conocimiento sobre sus propiedades beneficiosas. [8]

El manejo que se le da a estos residuos consiste principalmente en: recolección, transporte y disposición final en el relleno sanitario. Dicho proceso conlleva problemas ambientales asociados, ya que los residuos depositados en el relleno pierden su utilidad y las condiciones anaerobias de descomposición de esta materia orgánica dentro del relleno liberan diversos gases nocivos a la atmósfera (el efecto invernadero), así como lixiviados que generan contaminación del agua y del suelo; además se incurre en un gasto energético considerable para transportar estos residuos por largas distancias hasta el único relleno sanitario de la ciudad.[8]

### **1.3 Café**

El café es una de las bebidas más populares en todo el mundo. Detrás de cada taza de café caliente de buen gusto se puede presentar de muchas maneras diferentes, una es el género *Coffea*, que pertenece a la familia Rubiaceae, abarca dos de las especies vegetales más importantes del comercio internacional del café: *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* Pierre, ampliamente conocidas como Arábica y Robusta.[9]

Las bayas del café se obtienen de dos de las más de 100 especies de arbustos del café *Coffea arabica* y *Coffea Canephora*. Sus granos, después de tostarse y molerse, sirven para preparar la deliciosa bebida del café, que es mundialmente famosa por ser altamente estimulante, siendo una de las tres bebidas más consumidas en el mundo junto con el agua y el té. [10]

**Tabla 1.**

*Características del café Arábigo y el café robusto*

<b>Café Arábigo</b>	<b>Café Robusto</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Calidad de taza superior</li><li>➤ Características organolépticas más apreciadas</li><li>➤ Menor contenido de sólidos solubles totales</li><li>➤ Más vulnerable a plagas y Enfermedades</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Tamaño de frijol más pequeño</li><li>➤ Generalmente más barato</li><li>➤ Doble contenido de cafeína</li><li>➤ Mayor rendimiento de sólidos extraíbles</li><li>➤ Más resistente a plagas y enfermedades</li></ul>

*Nota.* La tabla representa las características del café arábigo y del café robusto. Tomado de: G. Charis, Handbook of Coffee Processing By-Products Sustainable Applications

### **1.3.1 Café arábigo**

El café arábigo, también conocido científicamente como Coffe arábica, es una de las variedades de café más populares y cultivadas a nivel mundial. Debido a su sabor único y aroma envolvente, este café es originario de las tierras altas de Etiopía, donde se ha cultivado durante siglos. [11]

**Origen y Cultivo:** El café arábigo es una planta que crece principalmente en regiones montañosas tropicales, a altitudes que oscilan entre los 600 y 2100 metros sobre el nivel del mar. Esto le otorga su sabor único, ya que las condiciones de crecimiento influyen significativamente en las características de los granos. Las principales regiones productoras de café arábigo incluyen Etiopía, Colombia, Brasil, Costa Rica, y otros países de América Latina y África. [12]

**Sabor y Características:** El café arábigo se distingue por su sabor suave y equilibrado, con notas de frutas, flores, cítricos y un suave dulzor. Los granos de café arábigo tienden a tener menos cafeína en comparación con otras variedades de café, lo que contribuye a su perfil de sabor más suave y menos amargo.

Proceso de Cultivo: El cultivo del café arábigo es un proceso laborioso y meticuloso. Los agricultores deben cuidar las plantas con esmero, proporcionando sombra, manteniendo la humedad del suelo y cosechando los granos en el momento adecuado para garantizar la calidad. La recolección se realiza a mano, seleccionando solo los granos maduros, lo que hace que el proceso sea más intensivo en mano de obra, pero resulta en una mejor calidad.

Beneficios para la Salud: El café arábigo, como otros tipos de café, contiene antioxidantes y compuestos bioactivos que pueden tener beneficios para la salud, como la reducción del riesgo de enfermedades cardíacas y el aumento de la concentración mental. [13]

Impacto Económico: La producción y exportación de café arábigo representan una parte significativa de la economía de varios países en desarrollo. Además, la industria del café genera empleo para millones de personas en todo el mundo, desde los agricultores que cultivan los granos hasta los baristas que preparan las deliciosas bebidas. [13]

#### **1.4 Cascarilla de café**

La capa gruesa de la cereza es la cascarilla de café, se reconoce por ser aquella que envuelve puntualmente al grano, representa cerca del 43% de su peso, esta se obtiene en el proceso de beneficio de café seco el cual se realiza con el producto del beneficio del café húmedo, con el fin de extraer la cascarilla para eliminarla del grano de café, está compuesta por celulosa, lignina y otros compuestos orgánicos.[14]

Debido a que es el residuo que aporta el mayor porcentaje de contaminación al balance global, se considera una gran fuente de investigación para la fabricación de nuevos productos debido a la cantidad que representa en peso. Como resultado de su alto contenido de azúcares, tiene un gran potencial industrial, la cascarilla del café tiene un poder calorífico de alrededor de 4180 cal/g a 7458 kcal/kg, lo que quiere decir que el potencial energético es significativo y libera energía térmica cuando se quema y permite su uso como fuente de combustible, una proporción de material volátil es 87,7% y un diámetro de aproximadamente 0,425 a 2,36mm.[14]

## **Figura 1.**

### *Cascarilla de café*



**Nota.** La imagen muestra la cascarilla de café que se utilizó en el proceso

### **1.5 Uso de la cascarilla de café**

La cascarilla de café se usa principalmente para hacer sustratos para la siembra de almácigos de café y otras plantas, así como para hacer abonos orgánicos. La cascarilla se utiliza en las empresas tostadoras y torrefactoras para hacer mezclas de caféscorrientes tostados y molidos de baja calidad. La utilizan también para alimentar los silos desecado de café. La cascarilla es un buen ingrediente para hacer suplementos alimenticios paraganado porque es casi 100% fibra.[15]

La cascarilla de café se utiliza en la fabricación de bioplástico y, debido a su alto contenido de celulosa, se utiliza como refuerzo para otros materiales. [15]

## Tabla 2.

### *Composición de cascarilla de café Arábica*

Componentes	% Total base seca
Cenizas	10,5
Fósforo	0,10
Potasio	3,03
Calcio	0,25
Magnesio	0,05

*Nota.* Tabla de la composición de la cascarilla de café, Tomado de CENICAFE, «CENICAFE,» Federación Nacional de Cafeteros, 2023. [En línea]. Available: <https://www.cenicafe.org/>. [Último acceso: 2023].

## 1.6 Celulosa

La celulosa es un polisacárido esencial en la biología y la industria, con una amplia gama de usos y un impacto significativo en la vida diaria. Este compuesto orgánico de la familia de los carbohidratos es fundamental para la estructura y función de las plantas, así como para muchos procesos industriales. A lo largo de este texto, discutiremos la estructura química de la celulosa y cómo se utiliza en varios campos. [16]

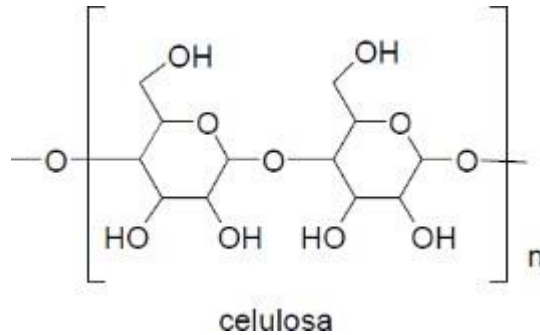
### *1.6.1 Estructura Química de la Celulosa*

Unidades de glucosa unidas entre sí por enlaces glucosídicos  $\beta$ -1,4 constituyen el polímero lineal de la celulosa. Estos enlaces únicos permiten la disposición lineal de las moléculas de glucosa y, al mismo tiempo, permiten la formación de puentes de hidrógeno entre las cadenas de glucosa. La celulosa tiene una gran resistencia y rigidez debido a esta estructura de enlaces de hidrógeno. [16]



**Figura 2.**

*Estructura química de la celulosa*



**Nota.** Imagen de la estructura química de la celulosa tomado de Tejedor, A. S. (s.f.). Escuela de ingenierías industriales-UVA. “Tecnología de la celulosa. La industria papelera”

### ***1.6.2 Origen natural***

La celulosa es el componente principal de las paredes celulares de las plantas, lo que les da a las células vegetales resistencia y rigidez. Se puede encontrar en una variedad de fuentes vegetales, como la caña de azúcar, el lino, el algodón, la madera y muchos otros materiales vegetales. El proceso a través del cual las plantas sintetizan glucosa, que luego se utiliza para construir cadenas de celulosa, se conoce como fotosíntesis.[16]

### **1.7 Producción Industrial**

También se produce a gran escala celulosa a partir de fuentes vegetales como la pulpa de madera y el algodón de forma industrial. El proceso de obtención de celulosa consiste en descomponer las fibras vegetales en pulpa a través de procesos químicos o mecánicos. Luego, la pulpa se blanquea y procesa para producir una variedad de tipos de celulosa, incluida la celulosa de viscosa, la celulosa de acetato y la celulosa de rayón, entre otros. [17]

**Usos y Aplicaciones:** La celulosa es muy versátil y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como:

**Papel y cartón:** La celulosa se utiliza principalmente en la fabricación de papel y cartón. El papel, desde el periódico hasta el papel de alta calidad para libros y revistas, se fabrica con pulpa de madera. [18]

**Textiles:** En la industria textil, la celulosa también se utiliza para fabricar fibras como el rayón y el acetato. Estas fibras son conocidas por ser cómodas y asemejarse a la seda.

**Alimentos:** La celulosa se utiliza como aditivo alimentario (E460) en la industria alimentaria y se encuentra en productos como pan, productos de panadería, helados y algunos tipos de queso. Funciona tanto como espesante como estabilizador. [19]

**Industria Farmacéutica:** La celulosa se utiliza como agente aglutinante y para la liberación controlada de medicamentos en tabletas y cápsulas farmacéuticas.

**Construcción:** La celulosa se utiliza como aislante térmico y acústico en la construcción para fabricar paneles de yeso y otros materiales. [20]

**Biocombustibles:** Como puede convertirse en etanol y otros biocombustibles a través de procesos de fermentación y destilación, la celulosa tiene un gran potencial para producir biocombustibles. [21]

### **Importancia Ambiental**

La celulosa se produce en las plantas como parte de su crecimiento y juega un papel importante en la absorción de dióxido de carbono de la atmósfera. Además, su uso en productos biodegradables ayuda a reducir la cantidad de desechos plásticos que se acumulan en el medio ambiente. [22]

### **1.8 Lignina**

La lignina es un componente esencial de las plantas que contribuye a la estructura, la función y la resistencia de los tejidos vegetales. Este texto explicará qué es la lignina en detalle, así como su composición química, funciones biológicas, aplicaciones industriales y relevancia para la investigación científica.

#### **Composición Química de la Lignina:**

La lignina es un polímero complejo compuesto principalmente por tres monómeros fenólicos: coniferalcohol (coniferyl), sinapalcohol (sinapyl) y p-cumarilalcohol (p-coumaryl). Estos monómeros se unen a través de enlaces covalentes para formar una estructura tridimensional

altamente ramificada y resistente. La variabilidad en la composición de estos monómeros y los tipos de enlaces resultantes hacen que la lignina sea una molécula altamente heterogénea.

#### Funciones Biológicas de la Lignina:

La lignina desempeña un papel crucial en las plantas vivas. Sus principales funciones son:

- **Soporte estructural:** La lignina proporciona rigidez y resistencia a los tejidos vegetales, permitiendo que las plantas crezcan verticalmente y soporten su propio peso. Esto es especialmente importante en árboles y plantas leñosas.
- **Conductividad de agua:** La lignina impide la pérdida excesiva de agua al sellar las paredes celulares y contribuye a la formación de tubos de transporte de agua (vasos y traqueidas) en el xilema.
- **Defensa contra patógenos y plagas:** La lignina es resistente a la degradación por enzimas y proporciona una barrera física contra la invasión de patógenos y herbívoros.
- **Resistencia a la descomposición:** Su compleja estructura química hace que la lignina sea difícil de descomponer por microorganismos, lo que contribuye a la formación de materia orgánica en el suelo a lo largo del tiempo.[23]

#### Aplicaciones Industriales de la Lignina:

La lignina tiene diversas aplicaciones en la industria, principalmente en la producción de papel y biocombustibles. Estas aplicaciones incluyen:

- **Industria del papel:** La lignina se utiliza en la fabricación de papel como adhesivo y agente de unión, lo que reduce la necesidad de productos químicos y mejora la calidad del papel.
- **Biocombustibles:** La lignina se puede convertir en biocombustibles, como el etanol y el biodiesel, mediante procesos químicos y microbiológicos.
- **Productos químicos:** La lignina se utiliza en la síntesis de una variedad de productos químicos, como fenoles, resinas y adhesivos.[23]

- **Investigación Científica sobre la Lignina:** la investigación sobre la lignina ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas debido a su importancia en la biotecnología y la sostenibilidad. Algunos de los temas de investigación incluyen:
  - **Biorrefinerías:** Se investiga cómo utilizar la lignina como materia prima en biorrefinerías para producir una variedad de productos, desde bioplásticos hasta productos químicos de alto valor. [23]
  - **Mejora de cultivos:** Los científicos trabajan en el desarrollo de plantas modificadas genéticamente con lignina reducida o modificada para facilitar la producción de biocombustibles y reducir la pulpa de papel. [24]
  - **Degradación de lignina:** Se estudian enzimas y microorganismos capaces de degradar la lignina de manera más eficiente, lo que podría tener aplicaciones en la gestión de residuos y la producción de bioproductos. [25]

## 1.9 Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio  $NaOH$ , se conoce como un sólido de características cristalinas, incoloro, inodoro que se compone ágilmente de dióxido de carbono y la humedad en el aire, en la industria recibe el nombre de soda caustica, este compuesto es que más se utiliza para separar la lignina de la celulosa [26]. Este compuesto es de peligrosidad debido a que causa graves quemaduras en la piel y es de riesgo para los ojos. [27]

## 1.10 Técnicas de preparación de biopelículas

### 1.10.1 Extrusión

En la producción de bioplásticos a partir de celulosa y otros materiales biodegradables, se utiliza ampliamente el método de extrusión. En este proceso, la celulosa se mezcla con plastificantes y otros aditivos, se calienta y se forja a través de una máquina extrusora para dar forma a los productos finales. [28]

- **Mezcla de ingredientes:** Un plastificante, que es necesario para aumentar la flexibilidad y la procesabilidad del material, se combina con la celulosa. Según las características deseadas del bioplástico, se pueden agregar otros aditivos como refuerzos, colorantes o estabilizadores. [29]

- Alimentación a la extrusora: La extrusora es una máquina que consta de un tornillo sin fin dentro de un cilindro y recibe la mezcla. Mientras se calienta, el tornillo gira y lleva la mezcla hacia adelante.
- Fundición y mezcla: La mezcla se calienta a temperaturas controladas a medida que avanza a través del tornillo. Esto hace que la celulosa y el plastificante se fusionen, lo que permite que las partes se mezclen íntimamente.
- Formación de la forma deseada: Se usa una boquilla para forzar el material fundido en la forma deseada. Esto puede ser una fina película, filamentos o cualquier otra forma necesaria para el producto final. [30]
- Enfriamiento: Una vez que el material ha tomado su forma, se enfría rápidamente para solidificar. Dependiendo de las especificaciones del proceso, esto puede realizarse mediante enfriamiento por aire o agua.
- Corte y recolección: el bioplástico extruido se corta en trozos del tamaño requerido y se recolecta para su uso o procesamiento posterior si es necesario. [31]

### ***1.10.2 Hidrólisis Ácida***

El proceso químico conocido como hidrólisis ácida descompone la celulosa en azúcares simples como la glucosa. Este proceso utiliza un ácido fuerte, como el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) o el ácido clorhídrico ( $HCl$ ), para catalizar la ruptura de los enlaces glucosídicos que unen las unidades de glucosa a la celulosa. [32]

La celulosa se somete a altas temperaturas y presiones y se disuelve en una solución ácida concentrada, de esta manera los enlaces glucosídicos de la celulosa se rompen, liberando glucosa y otros azúcares simples, para recuperar los azúcares, la solución resultante se neutraliza y purifica. [33]

Estos azúcares se pueden utilizar para crear bioplásticos, biocombustibles o productos químicos [34]

Los métodos para obtención de bioplásticos a partir de azúcares se han estandarizado, por lo que uno de los mecanismos es a través de la Fermentación de Ácido Poliláctico, el cual se adquiere a partir del azúcar contenido en el maíz o en la caña de azúcar, estos se fermentan y como resultado se obtiene el ácido láctico usado en la polimerización, [35] por otro lado, está la producción de

Polihidroxicanoatos la cual con ayuda de microorganismos, dan lugar a la fermentación y así los microorganismos se recolectan y extrae el polímero [36]

### ***1.10.3 Casting***

Es un proceso que implica verter líquido en un molde almacenado bajo condiciones específicas para crear material rígido con la misma forma del molde, además teniendo la solución de los componentes se realiza la evaporación del solvente a temperatura y humedad controladas, así se provoca su reacción, curado o endurecimiento formándose así la biopelícula que reproduce la cavidad del molde. Las ventajas del *casting* son que el espesor se distribuye uniformemente, las películas presentan una gran estabilidad dimensional y planitud. [37]

### **Figura 3.**

*Molde del método casting*



**Nota:** La imagen muestra el molde donde se va a realizar este método

### ***1.10.4 Fermentación enzimática***

La fermentación enzimática es un proceso biotecnológico que utiliza enzimas celulolíticas para convertir la celulosa en azúcares simples. Dado que no requiere el uso de ácidos fuertes, este método es más suave y respetuoso con el medio ambiente que la hidrólisis ácida. [38] La celulosa se somete a un tratamiento previo antes de la fermentación para eliminar impurezas y aumentar su accesibilidad a las enzimas. La molienda, la deslignificación o los pretratamientos físicos y químicos son ejemplos de esto. Las enzimas celulolíticas, como la celulasa, se incorporan a la celulosa. Estas enzimas liberan azúcares simples, principalmente glucosa, después de descomponer los enlaces glucosídicos de la celulosa. [39]

Los microorganismos, como bacterias o levaduras, fermentan los azúcares liberados y los convierten en productos finales, como etanol o ácido láctico, los productos de fermentación se recuperan y purifican para su uso en la fabricación de biocombustibles, bioplásticos y otros productos químicos. [40]

### ***1.10.5 Pirólisis de celulosa***

El pirólisis de celulosa es un proceso térmico en el que la celulosa se descompone a altas temperaturas sin oxígeno para producir productos químicos como el levoglucosano, que se pueden usar para hacer bioplásticos. [41] En una atmósfera inerte o con poco oxígeno, la celulosa se calienta a temperaturas generalmente superiores a 300°C, lo que evita la combustión, el levoglucosano, un azúcar anhidro, es uno de los muchos productos que se producen cuando la celulosa se descomponetérmicamente. [38], además este se puede extraer y luego utilizar para hacer bioplásticos, biocombustibles o productos químicos. [42]

## **1.11 Plásticos**

El concepto de polímero deriva de las palabras griegas Poly y Mers que, literalmente quiere decir "muchas partes". Desde el punto de vista químico, una definición de polímero es que son grandes moléculas - macromoléculas - compuestas por la unión de moléculas más pequeñas denominadas "monómeros". Pese a la aparente complicación de su definición, los polímeros están muy presentes en nuestro día a día, ya que la mayoría de los objetos que utilizamos están formados por algún tipo de polímero. Los parachoques o las ruedas del coche, los vasos desechables, las ventanas, algunos tipos de suelos para exterior o las prendas con las que nos abrigamos son solo algunos de los ejemplos de la aplicación de los materiales poliméricos.[43]

### ***1.11.1 Bioplásticos***

Los bioplásticos son una forma de plástico que deriva de recursos biológicos renovables. Tales como plantas, fuentes de bacterias y algas. El bioplástico se aplica en numerosos tipos de campos, incluidos el envasado de alimentos, la atención médica, la agricultura y la electrónica. Aunque significativo, se han logrado mejoras como una película no quebradiza. Aún quedan algunas restricciones por superar para obtener bioplásticos de bajo coste con las mismas propiedades mecánicas y comparables al material plástico convencional.[44]

Algunas características del bioplástico, como mala capacidad de sellado térmico, inestabilidad térmica, fragilidad y baja resistencia a la fusión, debe ser mejorado. El recubrimiento, la mezcla y la adición de celulosa son algunos de los métodos propuestos para superar las limitaciones de estos bioplásticos como el alto nivel de vapor de agua y la inestabilidad térmica. [44]

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CASCARILLA DE CAFÉ

En este capítulo se proporcionará la información necesaria como ecuaciones y datos tomados para realizar la caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café, paso fundamental del proyecto ya que de esta manera se evidenciará si se utilizara una materia prima acorde a lo investigado y informado previamente en el marco teórico.

Para la caracterización de la cascarilla de café usada en el presente proyecto se hace uso de los protocolos estandarizados por American Society for Testing and Materials para el cálculo de humedad, cenizas, humedad aparente y relativa, el método Klason se usó para el cálculo del porcentaje de lignina, estos procedimientos se adaptan al tipo de residuo que se está trabajando, residuo sólido aprovechable.

### 2.1 Determinación del % de humedad

Para llevar a cabo la determinación se realiza con base en el procedimiento que se encuentra en el Anexo 1 en donde se enlista el paso a paso, en donde se realiza el cálculo con el método American Society for Testing and Materials ASTM D2216, a continuación, se presenta la ecuación para la determinación. [45] [46] [47]

*Ecuación 1 Porcentaje de humedad*

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Masa inicial (g)} - \text{Masa seca (g)}}{\text{Masa inicial (g)}} \times 100$$

### 2.2 Determinación del % de cenizas

La obtención del porcentaje de cenizas de la muestra se realiza teniendo en cuenta el método American Society for Testing and Materials ASTM D3174, en el anexo 2 se presenta el paso a paso, se muestra la respectiva ecuación a continuación. [48] [49] [50] [51]

*Ecuación 2 Porcentaje de cenizas*

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{\text{masa total (g)} - \text{masa despues de mufla (g)}}{\text{masa crisol (g)}} \right) \times 100$$



### 2.3 Determinación del % de lignina

Para calcular el porcentaje de lignina de la muestra se tuvo en cuenta el método Klason en donde se hace uso del ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  al 72%, en el anexo 3 se estipula el procedimiento paso a paso, la siguiente ecuación es la que permite el cálculo del porcentaje [52][53][54]

*Ecuación 3 Porcentaje de lignina*

$$\%lignina = \left( \frac{\text{muestra de masa (g)}}{\text{cantidad de lignina (g)}} \right) \times 100$$

### 2.4 Densidad aparente y densidad relativa

Con respecto a la densidad aparente y relativa se realizó fundamentado en el método ASTM D1895 desarrollado por American Society for Testing and Materials,[56] las ecuaciones usadas se presentan a continuación [54]

*Ecuación 4 Densidad aparente*

$$\text{Densidad aparente } (\rho_{ap}) = \frac{m_1}{v_1}$$

*Ecuación 5 Densidad relativa*

$$\text{Densidad relativa } (\rho_r) = \frac{\rho_{ap}}{\rho_{agua}}$$

### 2.5 Determinación del % de celulosa

Para realizar la determinación del % de celulosa se realiza con el referente de extracción alcalina y acida con la normativa ASTM D1103 [55]

*Ecuación 6 Porcentaje de celulosa*

$$\%celulosa = \left( \frac{\text{papel filtro seco}}{\text{papel filtro humedo}} \right) \times 100$$

### 2.6 Resultados de la caracterización

% de humedad

Masa crisol: 80,238 g

Masa: 97,941g

Masa final: 96,164 g

Masa cascarilla: 17,703 g

Masa final cascarilla: 15,926

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{17,703 - 15,926}{17,703} \right) \times 100 = 10.04\%$$

Masa crisol: 74,481 g

Masa 92,242 g

Masa cascarilla: 17,761 g

Masa final cascarilla: 15,926 g

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{17,761 \text{ g} - 15,926 \text{ g}}{17,761 \text{ g}} \right) \times 100 = 10.01\%$$

% Promedio de humedades = 10,025

Promedio de % de humedad = 10.07%

% Cenizas

1. masa crisol: 17,397 g

masa muestra: 1,5 g

masa total: 18,906 g

masa después de salir de la mufla: 17,453 g

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{18,906 \text{ g} - 17,397 \text{ g}}{17,453 \text{ g}} \right) \times 100 = 8,64 \%$$

2. masa crisol: 17,221 g

masa muestra: 1,79 g

masa total: 19,011 g

masa después de salir de la mufla: 17,256 g

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{18,828 \text{ g} - 16,794 \text{ g}}{16,878 \text{ g}} \right) \times 100 = 10,37 \%$$

% promedio de cenizas = 9,5 %

% Lignina

Masa crisol = 74.481 g

Masa total= 18,827 g

Muestra Masa = 1 g

Papel filtro= 1,5 g

Cantidad de lignina = 3,952

% Lignina =  $\left(\frac{1 \text{ g}}{3,952 \text{ g}}\right) \times 100 = 25,3 \%$

% Celulosa

Peso papel filtro seco: 4,37 g

Peso papel filtro Húmedo: 17,48 g

% Cenizas =  $\left(\frac{4,73 \text{ g}}{17,48 \text{ g}}\right) \times 100 = 25 \%$

Densidad aparente y densidad relativa

### **Densidad aparente**

Masa de recipiente: 111.285 g

1. (136.020 g - 111.285 g) = 24.735 g

2. (135.343 g - 111.285 g) = 24.062 g

3. (134.258 g - 111.285 g) = 22.973 g

**Tabla 3.**

*Densidad aparente*

Masa(g)	Volumen(ml)	Densidad(g/ml)
24,735	100	0,247
24,062	100	0,240
22,973	100	0,229

*Nota.* La tabla consigna los resultados obtenidos de las pruebas de densidad aparente

Promedio de densidades aparentes = 0,238 g/ml

### **Densidad relativa**

Densidad aparente = 0,238 g/ml

Densidad de agua = 1 g/ml

$$\rho_r = \left( \frac{0,238 \text{ g/ml}}{1 \text{ g/ml}} \right) = 0,238$$

Densidad relativa = 0,238

## **2.7 Análisis de resultados**

### **2.7.1 Diagrama de cajas y bigotes**

A continuación, se presenta la tabla comparativa de los porcentajes de composición de la cascarilla de café.

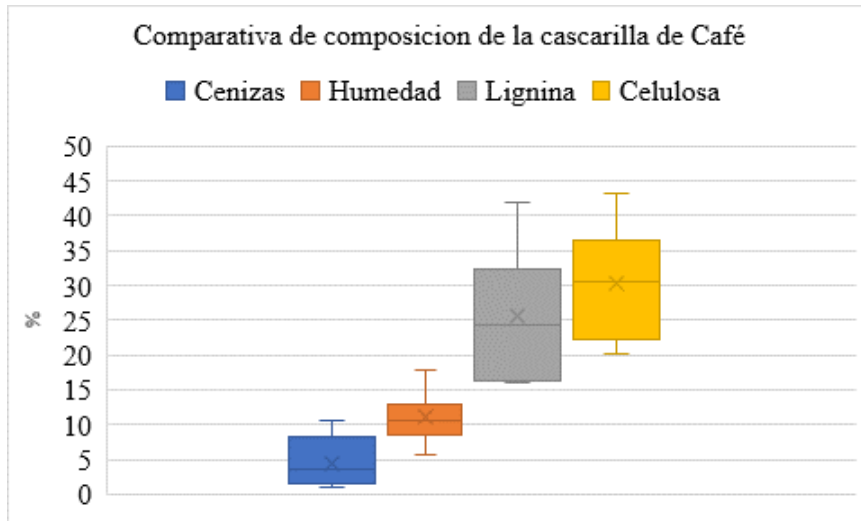
**Tabla 4.***Composición de la cascarilla de café*

% Cenizas	% Humedad	% Lignina	% Celulosa	Referencia
9,5	10,025	25,3	25	Elaboración propia
1,4	17,8	23,2	35,4	[57]
3,67	8,6	15,93	30,7	[58]
3,7	13,1	32,3	21,5	[59]
0,95	11,45	41,86	30,21	[60]
1,72	5,82	32,46	20,2	[61]
4,5	12,8	17,42	43,18	[62]
10,5	8,6	15,93	36,7	[63]

**Nota.** La tabla muestra los diferentes valores obtenidos en las caracterizaciones de la cascarilla de café realizadas por otros autores y la realizada en el presente trabajo

**Figura 4.**

*Comparativa composición cascarilla de Café*



*Nota.* En este diagrama se ilustra una comparación de resultados de la caracterización de la cascarilla de café que han realizado otros autores.

Teniendo en cuenta los datos experimentales hallados por medio de pruebas de laboratorio realizadas en la universidad de América, se analiza que la materia prima es de muy buena calidad basándonos en la información investigada, que se demuestra en la grafica comparativa y la tabla donde se muestran los diferentes datos de otros autores. Teniendo en cuenta que la cascarilla de café se trató desde este punto del proceso, lo que quiere decir que no se realizó el proceso de tostado en este proyecto, por lo cual no se genera un control previo de las diferentes características. Por un lado, uno de los factores fundamentales es la proveniencia de la cascarilla como dice *R. Ortiz* " la cascarilla de café tiene un mayor porcentaje de humedad al ser obtenida de Nicaragua", de igual manera *Hincapié* asemeja esta información al decir que la humedad es menor ya que es proveniente de Ecuador, evidenciando estos dos puntos el porcentaje de humedad obtenido de la cascarilla de café utilizada en este proyecto que fue obtenida y tratada desde Pereira, Colombia es óptimo. Al hablar del porcentaje de cenizas un factor fundamental en este proyecto de igual manera que *Cangussu* informa al tratar cascarilla de café que viene de un proceso seco, el porcentaje de cenizas es alto. Al analizar la lignina y la celulosa esta entre los rangos de máximo y mínimo que se encuentran los datos tomados de los diferentes autores.

### **3. OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO**

Después de realizar la caracterización de la cascarilla de café arábica, se procede a realizar la obtención del plástico, el cual se desarrollará en este capítulo donde se brindará información del proceso casting que es la base de la obtención del bioplástico, además de las materias primas que se utilizarán a parte de la celulosa. Además de esta información teórica se realiza un diseño de experimentos con el apoyo de referencias bibliográficas. El diseño de experimentos es fundamental en un proyecto ya que es la base de este mismo, como tal se puede realizar una analogía y decir que es similar a una “receta”, para así tomar los valores específicos y más acordes para realizar el proyecto y así seguir el paso a paso del método casting para así obtener el producto deseado para ya después realizar las pruebas necesarias y evidenciar si la biopelícula es apta o no.

#### **3.1 Obtención del bioplástico por método casting**

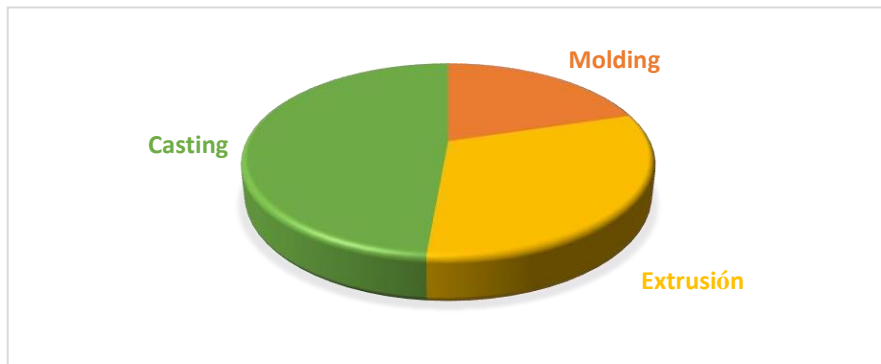
Es el método más simplificado para la obtención del bioplástico, teniendo en cuenta que no se necesita ninguna alteración química de la celulosa. Es un proceso que implica verter líquido en un molde almacenado bajo condiciones específicas para crear material rígido con la misma forma del molde. Las ventajas del casting son que el espesor se distribuye uniformemente, las películas presentan una gran estabilidad dimensional y plenitud. [37]

La velocidad de secado junto con la temperatura y humedad son condiciones determinantes para la calidad del producto (transparencia, consistencia, propiedades mecánicas), por lo tanto, deben ser controladas correctamente. Una vez finalizado el secado se tiene una película que es fraccionada para ser aplicada sobre los alimentos a tratar. [64]

Asimismo, a partir de este método se pueden obtener películas con menores valores de permeabilidad al vapor de agua y de solubilidad, propiedades que son apetecibles cuando las películas se quieren utilizar en contacto con alimentos cuya humedad se pretende mantener constante. Sin embargo, el problema principal de los distintos prototipos desarrollados por este método es el agrietamiento de las láminas. [64]

**Figura 5.**

*Métodos usados para la fabricación de bioplástico*



**Nota.** Imagen que ilustra que estadísticamente el método más utilizado es el método casting.

Tomado de: Cuadros Huamani y e. Alata mayhuire, «formulación y evaluación físico-mecánica de películas biodegradables en base a residuos cítricos y celulosa»

### **3.2 Plastificante**

Los plastificantes son compuestos que se adhieren a materiales plásticos o elásticos para agregar flexibilidad. Los plastificantes hacen todo lo posible para reducir la densidad de la mezcla, la temperatura de transición vítrea o el módulo de elasticidad. Estos aditivos conocidos como plastificantes tienen el potencial de aumentar la flexibilidad, ductilidad y tenacidad de un polímero. La fragilidad y la dureza se reducen con su expresión. El plastificante tiene un bajo peso molecular y una baja presión de vapor. [65]

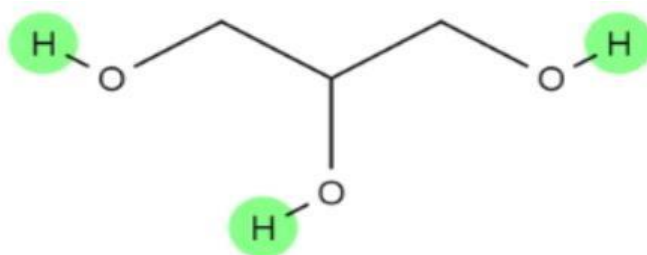
#### **3.2.1 Glicerina**

La glicerina es un líquido viscoso claro que se produce por hidrólisis de grasas y aceites mixtos. Se puede encontrar en alimentos, mercados botánicos y cosméticos. La glicerina es una sustancia con un punto de ebullición alto, un sabor dulce neutro y una pasta espesa y gomosa que se forma al refrigerarse. Contiene características químicas que son beneficiosas para nuestra salud. Existe en todos los tipos de aceites, así como en grasas animales o vegetales esta hace parte de la formulación del bioplástico como el plastificante [66]



**Figura 6.**

*Estructura química de la glicerina*



**Nota.** Imagen de la estructura química de la glicerina

Tomada de: R. Navarro, «Mifarma,» 23 diciembre 2019. [En línea]. Available:

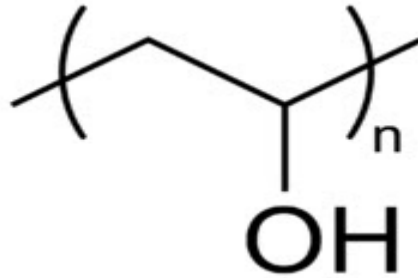
<https://www.mifarma.es/blog/diccionario-farmacia/que-es-la-glicerina-para-quesirve/>. [Último acceso: 18 marzo 2021].

### **3.2.2 Alcoholo polivinílico (PVA)**

El alcohol polivinílico (PVA) se presenta en forma de gránulos o polvo blanco. Comercialmente se encuentra disponible en diferentes grados que difieren en peso molecularo en el contenido de acetato, tiene color estable hasta 140°C. El PVA forma un coloide reversible en agua caliente, es insoluble en agua fría. En agua a 20°C y con un contenido máximo de 10% de acetato se hincha, es soluble entre un 10% y un 38%, forma un gel fino entre 38% y 75% y contenidos mayores lo hacen insoluble.<sup>26, 27</sup> Las viscosidades del PVA con diferentes contenidos de acetato en agua a 20°C se muestran en la tabla 1. El PVA es unpolímero hidrosoluble. Contiene diferentes residuos de grupos acetatos, lo cual explica su viscosidad.[67]

**Figura 7.**

*Estructura química del PVA*



**Nota.** Estructura química del alcohol polivinílico Tomado de: E.

Hernández, R. Cruz, F. Robledo y L. Santoyo, «Caracterización del alcohol polivinílico,»

### **3.2.3 Alginato de Sodio**

Este, también conocido como algi-na, es un tipo de electrolito de macromolécula orgánica entre algas de tipos de algas marrones. Es un componente principal de la membrana de la célula con otros sustratos. El alginato de sodio y sus componentes químicos coinciden con los hidratos de carbono y solo sujetan carboxilo libre con fibrina y almidón. De la misma manera, es un tipo de macromolécula heteropolimero. cadena tipo interpuesto por copolimerización entre ácido manurónico y gulurónico, es una sal de sodio del ácido algínico, un polisacárido que se encuentra en las paredes celulares de algas pardas y algunas bacterias. Es comúnmente utilizado en una variedad de aplicaciones industriales y alimentarias debido a sus propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes [65]

### **3.3 Diseño de experimentos**

Teniendo en cuenta el estado del arte como base para la formulación del diseño de experimentos del presente estudio se fijó la cantidad de agua en 30 ml y el PVA en 3.75 g, de igual forma la cantidad de celulosa se establece en un rango de 7 g – 14 g y de glicerina de 6 g – 12 g ya que se obtienen resultados óptimos con estas cantidades basado en bibliografía donde se produjo bioplástico a partir de celulosa y teniendo en cuenta la dimensión del molde donde se va a realizar el bioplástico se realizó una correlación de los datos.[66] Con lo anterior se construyó el diseño de experimentos para la obtención del bioplástico a partir de la cascarilla de café, y se realizaron 3

réplicas por cada formulación para constatar el resultado obtenido y determinar cuál de las formulaciones permite obtener unas biopelículas con características ideales.

**Tabla 5.**

*Diseño de experimentos*

Formulación	Celulosa (g)	Glicerina (ml)	PVA (g)	Agua (ml)	Ácido acético 5%(ml)	Temperatura (°C)
1	7	6	3,75	30	-	90
2	14	12	3,75	30	-	90
3	14	6	3,75	30	1	90
4	7	12	3,75	30	1	90

**Nota.** La tabla muestra las formulaciones finales para la elaboración de los bioplásticos

## 4. PROPIEDADES MECÁNICAS

Al realizar un producto como lo es una biopelícula se necesitan realizar unas pruebas específicas que en este caso son mecánicas, como lo son pruebas de tensión y elongación, además de realizar una prueba de humedad ya que el producto proviene de desechos orgánicos. Al finalizar estas pruebas se realizan los análisis necesarios y la comparación de estos resultados con diferentes autores y así mismo con productos que ya se han desarrollado a mayor escala.

### 4.1 Características físicas del bioplástico

**Tabla 6.**





*Características físicas del bioplástico obtenido por replica*

<b>Formulación</b>	<b>Largo (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
1	100,9	6,58	2,6
1	104,75	7,57	2,38
1	102,6	7,5	2,5
2	133,35	8,7	2,8
2	130,2	8,5	2,57
2	128	8,15	2,3
3	121	8,2	2
3	119,4	8	2,32
3	120,7	7,95	2,05
4	130	8,4	0,98
4	122	9	1,18
4	124,5	8,82	1

**Nota.** Tabla que muestra los resultados de las características físicas del bioplástico obtenido por replica

**Tabla 7.**

*Características físicas del bioplástico promedio*

Formulación	Largo promedio (mm)	Ancho promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Imagen
1	102,75	7,22	2,49	
2	130,52	8,45	2,56	
3	120,37	8,05	2,12	
4	125,5	8,74	1,05	

*Nota.* Tabla que muestra los valores obtenidos para la caracterización física del bioplástico

Las propiedades mecánicas de un material describen cómo se comporta bajo la acción de fuerzas externas o cargas continuas o discontinuas. Las propiedades mecánicas incluyen parámetros como elasticidad, plasticidad, maleabilidad, dureza, fragilidad y otros que facilitan la caracterización de los materiales que se someten a pruebas. A continuación, se describen las pruebas que se realizaron para cada una de las biopelículas.

#### **4.2 Resistencia a la elongación**

La relación entre la longitud cambiada y la longitud inicial después de la rotura de una sonda de ensayo se conoce como resistencia a la tracción o elongación a la rotura. La capacidad de un material para resistir cambios de forma sin grietas se demuestra. Para medir con mayor precisión la elongación o estiramiento durante la fuerza aplicada en un material de tipo elastómero, se requiere utilizar un extensómetro. La prueba consiste en sujetar cada extremo de la muestra y luego estirarla a una velocidad constante hasta romper la sonda. La fuerza requerida para el estiramiento se mide a medida que se realiza.

Al ser un material plástico se deben estudiar fenómenos de deformación y tensión, para llevara cabo la ejecución de esta prueba se tomaron sondas de dimensiones 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 sondas empleadas en el ensayo tengan dimensiones de 10 mm x 270 mm y que sus condiciones de espesor sean de 1mm o menos este tipo de ensayo se realizó en una máquina universal de ensayos. [69]

### 4.3 Resultados estrés promedio máximo y porcentaje tensión promedio máximo para cada ensayo

**Tabla 8.**

*Estrés y tensión promedio máximo*

Formulación	Prom_Max Force (N)	Prom_Max Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Prom_Max Strain (%)	Prom_Max Disp (mm)
1	7,125 ± 0,319	7,125 ± 0,319	115,542 ± 35,5	69,325 ± 21,3
2	8,699 ± 0,751	8,699 ± 0,751	135,833 ± 19,818	81,499 ± 11,891
3	5,729 ± 0,596	5,729 ± 0,596	98,681 ± 43,129	58,284 ± 26,741
4	3,157 ± 0,239	3,157 ± 0,239	90,577 ± 48,770	54,346 ± 29,262

*Nota.* Resultados de los ensayos de resistencia a tracción y elongación en promedio bajo la norma ASTM D882 para cada una de las probetas junto con desviación de los mismos

## Figura 8.

### *Prueba de fuerza y tensión del bioplástico*



*Nota.* La figura muestra el alto grado de resistencia a tracción y elongación que presentaron algunas probetas

Con relación a lo presentado en la tabla e imagen anterior donde se organizan y representan los resultados que se obtuvieron en la máquina universal de ensayos por cada una de las formulaciones se puede evidenciar que la desviación representa la variabilidad de cada una de las formulaciones y de los parámetros que se midieron, con respecto al promedio máximo de fuerza, se observa una variabilidad mínima en los valores que se obtuvieron, lo mismo sucede con el parámetro de estrés, en cambio con la deformación y desplazamiento, la desviación presenta un valor significativo lo que representa una distancia respecto a la media, con relación a lo obtenido la formulación 1 y 2 son las que presentan un mejor resultado en comparación a las otras dos formulaciones ya que estas primeras dos tienen una resistencia de fuerza mayor en comparación a las otras y adicionalmente presentan una menor desviación de la deformación y desplazamiento.

Al realizar los ensayos mecánicos y registrar los datos generados por la máquina universal de ensayo, se puede determinar que dos de las formulaciones de estudio no resistieron a la fuerza de la máquina de ensayo; estas muestras son las 3 y 4 donde la fuerza máxima soportada fue de 5,729

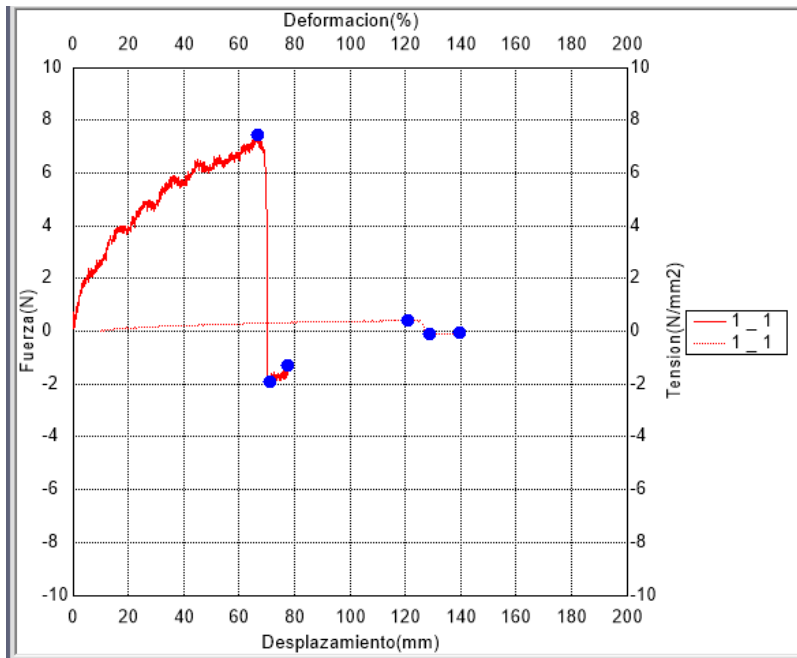
N y 3,157 N respectivamente. De igual manera, la formulación que obtuvo una mayor resistencia fue la 2 la cual soporto una fuerza máxima de 8,699 N seguidamente la formulación 1 con 7,125 N como se evidencia en la tabla 8.

Se puede deducir que las pruebas que no resistieron fuerzas de tracción tenían un módulo de elasticidad menor que las demás formulaciones y presentaron una mayor variabilidad respecto a la media. Por otro lado, debido a las propiedades de los aditivos de la mezcla, las pruebas con un módulo de elasticidad mayor tenían una resistencia a la deformación más alta y menor desviación entre replicas.

A continuación, se ilustran las gráficas de deformación con respecto a la fuerza a la que se somete cada una de las probetas que obtuvieron una mejor resistencia.

**Figura 9.**

*Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 1*



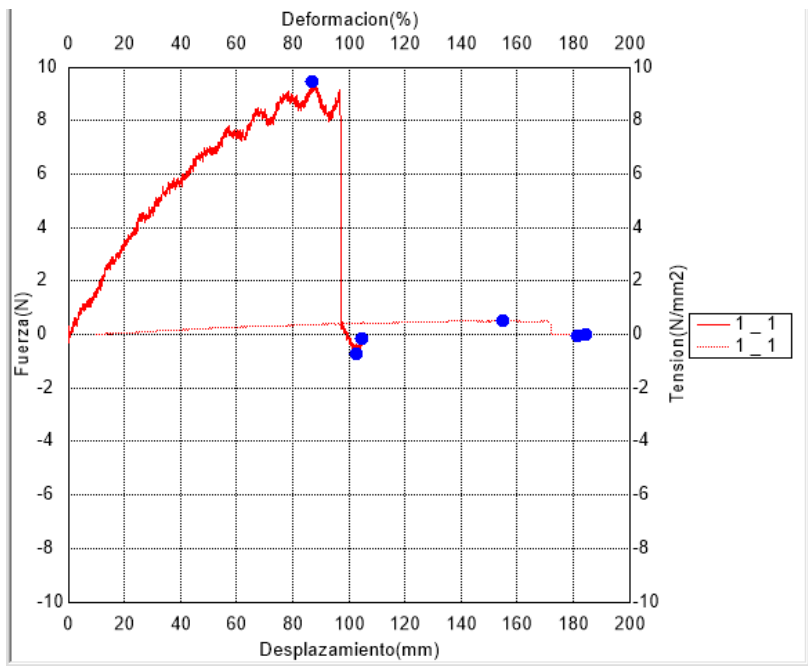
**Nota.** La ilustración muestra el punto máximo de la formulación 1 en la relación de desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada para la probeta que resistió la máxima cantidad de fuerza ejercida durante el ensayo



Con respecto a la gráfica se puede analizar que se aplica una fuerza de 7.947 N siendo esta la fuerza máxima de resistencia hasta el punto de inflexión y presenta un porcentaje medio de deformación lo cual se explica ya que esta formulación es la que está compuesta por cantidades proporcionales de celulosa y glicerina 7 g y 6 g respectivamente, lo cual permite inferir que a mayor cantidad de celulosa y glicerina adicionada y manteniendo la proporcionalidad de estas se presentaría una resistencia mayor del producto.

**Figura 10.**

*Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 2*



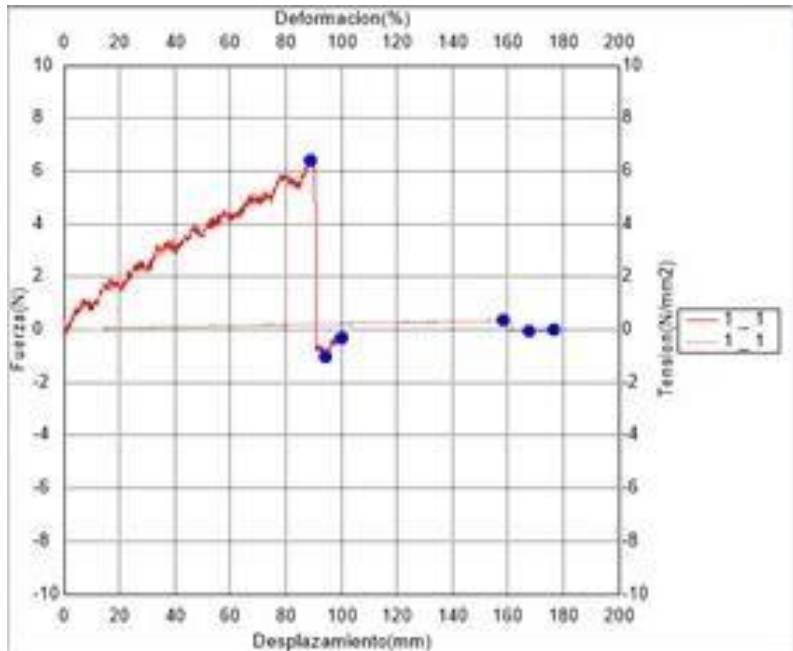
**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo de la formulación 2 en la relación de desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada para la probeta que resistió la máxima cantidad de fuerza ejercida durante el ensayo

Con respecto a la gráfica se puede analizar que se aplica una fuerza de 9.449 N siendo esta la fuerza máxima de resistencia hasta el punto de inflexión y presenta un porcentaje significativo de deformación lo cual se explica ya que esta formulación es la que está compuesta por cantidades

proporcionales de celulosa y glicerina 14 g y 12 g respectivamente, lo cual permite inferir que a mayor cantidad de celulosa y glicerina adicionada y manteniendola proporcionalidad de estas se presentara una resistencia mayor del producto.

**Figura 11.**

*Fuerza máxima soportada por la probeta con generación de ruptura formulación 3*

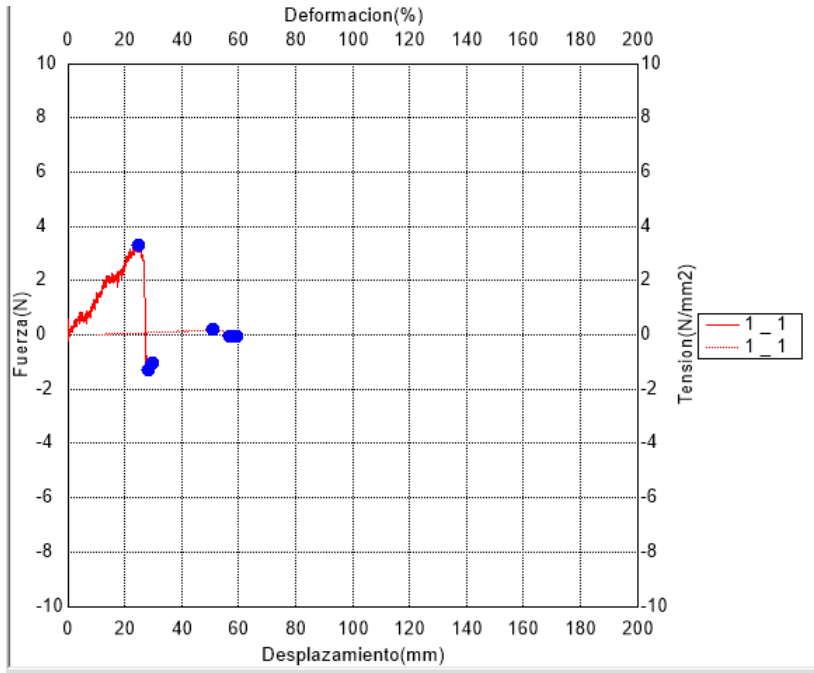


**Nota.** La ilustración muestra el punto máximo de la formulación 3 en la relación de desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada para la probeta que resistió la máxima cantidad de fuerza ejercida durante el ensayo

Con respecto a la gráfica se puede analizar que se aplica una fuerza de 6.413 N siendo esta la fuerza máxima de resistencia hasta el punto de inflexión y presenta un porcentaje significativo de deformación lo cual se explica ya que esta formulación es la que está compuesta por cantidades no proporcionales de celulosa y glicerina 14 g y 6 g respectivamente, lo cual permite inferir que la proporción no es adecuada para la obtención de un bioplástico óptimo, adicional la adición de ácido acético en la formulación aumenta la humedad por lo que afecta negativamente la resistencia del producto.

**Figura 5.**

*Fuerza máxima soportada por la probeta que menor fuerza resistió con generación de ruptura formulación 4*



**Nota.** La gráfica muestra el punto máximo de la formulación 4 en la relación de desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada para la probeta que no resistió la máxima cantidad de fuerza ejercida durante el ensayo

Con respecto a la gráfica se puede analizar que se aplica una fuerza de 3.32 N siendo esta la fuerza máxima de resistencia hasta el punto de inflexión y presenta un porcentaje mínimo de deformación lo cual se explica ya que esta formulación es la que está compuesta por cantidades no proporcionales de celulosa y glicerina 7 g y 12 g respectivamente, lo cual permite inferir que la proporción no es adecuada para la obtención de un bioplástico óptimo, adicional la adición de ácido acético en la formulación aumenta la humedad por lo que afecta negativamente la resistencia del producto.

Al comparar esta formulación basada en celulosa con las pruebas mecánicas realizadas por S. Pascoe y M. Mendoza Arce (2019), se logra destacar la presente formulación ya que los resultados obtenidos denotan un notable desempeño, estos muestran una respuesta favorable en términos de resistencia, ya que en algunos casos la fuerza obtenida supera significativamente las pruebas realizadas por dichos autores. Es interesante señalar que muchos de la obtención de bioplástico también se han buscado mediante el uso de almidón y jugo de nopal en sus bioplásticos, lo cual representa una alternativa distinta a la celulosa. [70]

Sin embargo, los datos recopilados sugieren que la formulación a base de celulosa compite en términos de resistencia ya que la formulación 2 alcanzó un valor de 9.449 N y por ejemplo en el trabajo de R. R. Daniela. A, T. E. Evelin. P (2023) la resistencia máxima que se alcanzó fue de 8.546 N usando almidón como biopolímero, este resultado puede ser atribuido, en parte, al acompañamiento estratégico de plastificantes. Estos aditivos juegan un papel crucial al mejorar las propiedades y el comportamiento de los bioplásticos, potenciando así sus características mecánicas. [71]

La influencia positiva de los plastificantes resalta la importancia de considerar no solo los materiales base utilizados en la formulación, sino también los aditivos complementarios que pueden impactar de manera significativa en el rendimiento final del bioplástico. [72]

Con los resultados obtenidos se puede analizar que las formulaciones más resistentes son las que contienen una alta concentración de celulosa y glicerina en proporciones similares, el alcohol polivinílico y la glicerina se utilizan como agentes plastificantes, Por lo tanto, estos aditivos le conceden a la mezcla propiedades de plástico que permiten tener un buen comportamiento con respecto a la fuerza que resiste y su deformación.

Al realizar una comparación de la carga máxima de ruptura de los plásticos convencionales se encuentra que los resultados obtenidos se asemejan al Butadieno-estireno y Butadieno-acrilonitrilo con un valor de 4-21  $N/mm^2$  y de 5  $N/mm^2$  [73]

#### **4.4 Análisis ANOVA**

Se realizó un análisis estadístico de ANOVA para las réplicas de cada una de las formulaciones, teniendo en cuenta cada uno de los parámetros seleccionados dentro de la evaluación de las pruebas mecánicas

#### 4.4.1 Fuerza máxima y estrés

**Tabla 9.**

*Fuerza máxima y estrés ANOVA*

Fuerza Máxima y estrés			
Formulación	A	B	C
1	7,43	7,152	6,794
2	9,449	8,702	7,947
3	5,451	6,413	5,322
4	3,329	3,258	2,884

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
A	4	25,659	6,41475	6,89602425		
B	4	25,525	6,38125	5,24521158		
C	4	22,947	5,73675	4,77106092		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,16824867	2	0,584124333	0,10361532	0,902631932	4,2564948
Dentro de los grupos	50,7368903	9	5,63743225			
Total	51,9051389	11				

**Nota.** ANOVA de fuerza máxima y estrés

#### 4.4.2 Tensión

**Tabla 10.**

*Tensión ANOVA*

Tensión			
Formulación	A	B	C
1	110,889	153,139	82,597
2	145,115	113,077	149,306
3	74,639	148,473	72,932
4	41,145	91,93	138,657

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
A	4	371,788	92,947	2020,681885		
B	4	506,619	126,65475	855,8716962		
C	4	443,492	110,873	1496,032601		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2275,49002	2	1137,74501	0,7805986	0,4868353	4,2564947
Dentro de los grupos	13117,7585	9	1457,52872			
Total	15393,2485	11				

**Nota.** ANOVA de tensión

#### 4.4.3 Desplazamiento

**Tabla 11.**

*Desplazamiento ANOVA*

Desplazamiento			
Formulación	A	B	C
1	66,533	91,883	49,558
2	87,069	67,846	89,583
3	44,783	89,083	40,985
4	24,687	55,158	83,194

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
A	4	223,072	55,768	727,4455373		
B	4	303,97	75,9925	308,1036777		
C	4	263,32	65,83	582,5885047		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	818,067534	2	409,0337	0,7583416	0,4961770	4,2564947
Dentro de los grupos	4854,413159	9	539,37923			
Total	5672,480693	11				

**Nota.** ANOVA de desplazamiento

El ANOVA compara la variación entre las formulaciones. En este caso, se evidencia que el valor de  $p$  en cada uno de los análisis es mayor que el nivel de significancia comúnmente estandarizado (0.05), lo que conlleva a pensar que no hay suficiente evidencia para rechazarla hipótesis nula. La hipótesis nula en este contexto generalmente sería que no hay diferencias significativas entre los grupos. En resumen, según estos resultados se presenta diferencias significativas entre los grupos A, B y C en la variable de fuerza máxima y estrés, ya que el valor  $p$  es mayor que el nivel de significancia seleccionado.

#### 4.5 Comparativo frente a propiedades mecánicas de polímeros convencionales

Se llevaron a cabo numerosos ensayos de materiales durante el desarrollo de esta sección para evaluar las propiedades de cada una de las formulaciones realizadas en el laboratorio. Como resultado, se demostró que cada una de las probetas obtenidas, junto con su réplica, registró valores que se corresponden con los valores teóricos de algunos polímeros convencionales.

**Tabla 12.**

*Carga máxima de polímeros*

<b>Polímero</b>	<b>Carga máxima (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Poliisopreno	21
Polibutadieno	23
Polibutileno	28
Neopreno	24
Butadieno-estireno	4-21
Butadieno-acrilonitrilo	5

**Nota.** La tabla muestra la resistencia máxima que tienen diferentes tipos de polímeros convencionales [73].

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 4 y 5 se puede observar que las muestras de bioplástico que están referenciadas como formulación 1 y 2 y sus respectivas réplicas son aquellas que tienen resultados de carga máxima (N/mm<sup>2</sup>) más cercanos a lo que podría ser el Butadieno-estireno y Butadieno-acrilonitrilo ya que los resultados obtenidos en cada formulación son 7,430 N/mm<sup>2</sup> y 9,440N/mm<sup>2</sup> respectivamente.



Por otro lado, los plásticos flexibles son aquellos que son resistentes a la deformación y la fuerza, pero no se rompen cuando se le aplica fuerza debido a su módulo elevado. El polietileno y el polipropileno son dos ejemplos de plásticos flexibles que se utilizan en bolsas plásticas y otros artículos de uso diario. De esta manera, se observó que la mayoría de las formulaciones ensayadas demostraron ser un plástico flexible debido a la demora en la deformación y la exposición a altas cargas. Sin embargo, el material no se rompió hasta que el equipo de ensayo universal alcanzó su capacidad máxima (10 N/mm<sup>2</sup>) para aplicar fuerza a las muestras. [74]

#### 4.6 Determinación del % de humedad del bioplástico

Para la determinación del porcentaje de humedad del bioplástico se realizó el mismo proceso que se usó para la cascarilla de café. Donde utilizamos la misma ecuación:

*Ecuación 7 Porcentaje de humedad*

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} \times 100\%$$

**Tabla 13.**

*Porcentaje de humedad del bioplástico*

<b>Formulación</b>	<b>Masa inicial (g)</b>	<b>Masa Final (g)</b>	<b>% Humedad</b>
1	1,97	1,46	26
2	2,24	1,70	24,1
3	1,80	1,39	23
4	2,75	1,98	28
		<b>PROMEDIO</b>	25,72

**Nota.** Tabla que muestra el porcentaje de humedad del bioplástico

Así utilizamos los porcentajes de humedad hallados por cada muestra que se utilizó, y realizamos un promedio para así obtener el porcentaje de humedad aproximado del bioplástico.

El promedio de porcentaje de humedad que resultó fue de: 25,72%.

Al obtener estos resultados en una escala experimental de laboratorio son buenos resultados ya que se maneja un proceso de determinación de humedad que no es el más preciso comparándolo con los que se usan en diferentes industrias de plásticos [75], y se evidencia que el proceso de secado que se realizó con los hornos fue fundamental y efectivo para disminuir los porcentajes de humedad del bioplástico.

La humedad tiene una implicación que es grave en los biopolímeros y los polímeros, si el porcentaje de humedad es alto (mayor al 40 %), la degradación del material ya que por medio de la hidrólisis provoca la degradación de las cadenas del polímero.[75] En el caso de las biopelículas utilizadas en la determinación de la humedad se evidencia que entre menor sea su porcentaje de humedad mayor va a ser su elongación y tensión, además que la humedad al ser biopelículas puede generar el crecimiento de bacterias en el material.[76]

## 5. CONCLUSIONES

Se realizaron las diferentes pruebas fisicoquímicas sobre la materia prima utilizada, así mismo se concluye que evidenciando los resultados y comparándolos con los diferentes autores investigados y previamente referenciados, los resultados obtenidos fueron los óptimos para así poder hacer uso de esta materia prima en la obtención del bioplástico.

Se establecieron los parámetros más acordes por medio de una selección del proceso casting como método más indicado para la obtención de la biopelícula, así mismo se realizó un diseño de experimentos para garantizar mejores resultados.

En conclusión, para determinar la efectividad de este proyecto se realizaron las pruebas mecánicas ya mencionadas en el capítulo 4, donde se evidenciaron resultados óptimos los cuales son respaldados al compararlos con datos de diferentes autores y de diferentes productos convencionales.

## REFERENCIAS

- [1] m. galvez, «climate reality project, » 1 julio 2022. [en línea]. available: <https://www.climatereality.lat/cambio-climatico/cual-es-el-impacto-del-plastico-en-nuestro-planeta/>. [último acceso: 2023].
- [2] m. d. a. y. d. sostenible, «gov.co,» 7 01 2022. [en línea]. available: <https://www.minambiente.gov.co/comunicado-de-prensa/en-2050-habria-en-el-mundo-unos-12-000-millones-de-toneladas-de-basura-plastica-si-no-se-cambian-las-pautas-de-consumo/>. [último acceso: 6 04 2023].
- [3] onu, «onu programa para el medio ambiente,» onu, 21 10 2021. [en línea]. available:<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>. [último acceso: 7 04 2023].
- [4] contexto ganadero, «residuos de café, un potencial para alimentar ganado y contribuir al medio ambiente,» contexto ganadero, 2023.
- [5] b. x. becerra, «la república,» 25 02 2022. [en línea]. available:<https://www.larepublica.co/globoeconomia/hoy-en-dia-se-produce-el-doble-de-desechos-plasticos-en-el-mundo-que-hace-20-anos-3310507#:~:text=de%20acuerdo%20con%20un%20reciente,desechos%20que%20hace%20dos%20d%C3%A9cadas..>[último acceso: 7 4 2023].
- [6] unep, «onu programa para el medio ambiente,» 28 01 2022. [en línea]. available:[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37946/unep\\_ar2021\\_sp.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37946/unep_ar2021_sp.pdf). [último acceso: 8 04 2023].
- [7] f. saavedra, «estas son las bolsas y los elementos de plástico de un solo uso que no se podrán utilizar desde el 2024 en colombia,» infobae, 2023.
- [8] landfillsolutions, «landfillsolutions, » 2023. [en línea]. available: <https://landfillsolutions.es/es/aprovechamiento-de-los-residuos-organicos/>. [último acceso: 2023].

- [9] j. g. ortega, r. c. heydi. n., aptitud *combinatoria general y específica de parentales de café en las cruza de entre arara x geisha y arara x catucaí 25l en vivero*, tesis de ingeniería agropecuaria, universidad estatal del sur de manabí, manabí, ecuador, 2023
- [10] g. charis, handbook of coffee processing by-products sustainable applications, chania: elsevier, 2017, p. 428.
- [11] davis, a. p., govaerts, r., bridson, d. m., & stoffelen, p. (2006). an annotated taxonomic conspectus of the genus *coffea* (rubiaceae). botanical journal of the linnean society, 152(4), 465-512.
- [12] clifford, m. n., & ramirez-martinez, j. r. (1990). phenols in coffee: the story so far. food chemistry, 35(2), 1-41.
- [13] international coffee organization (ico). (2021). coffee market report - october 2021. retrieved from <https://www.ico.org/market-report-20-21-e.asp>
- [14] r. arias y j. meneses, «caracterización físico-química de residuos agroindustriales(cascarilla de arroz y cascarilla de café),como materia prima potencial para la obtención de bioetanol,laboratorios de química unan-managua i-ii semestre2016,» diciembre 2016. [en línea]. available:<https://repositorio.unan.edu.ni/3793/1/53860.pdf>.
- [15]s. gómez, 23 abril 2019. [en línea]. available:  
<https://quecafe.info/usosalternativosubproductoscafe/#:~:text=el%20uso%20m%20c%20a%20com%20de,la%20elaboraci%20de%20abonos%20org%20nicos>
- [16] tejedor, a. s. (s.f.). escuela de ingenierias industriales-uva. "tecnología de la celulosa.la industria pepelera" recuperado el 2023, de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>
- [17] chen, j. synthetic textile fibers: regenerated cellulose fibers. in textiles and fashion (pp. 79-95). woodhead publishing. 2015.
- [18] damon, a., mcgonagal, r., tosto, p., & ward, w. higher level biology: developed specifically for the ib diploma. harlow (reino unido): pearson education. 2007.

- [19] heinze, t., el seoud, o. a., & koschella, a. production and characteristics of cellulose from different sources. in cellulose derivatives (pp. 1-38). springer, cham. 2018.
- [20] kent, m. advanced biology. oxford university press-children. 2015.
- [21] ioelovich, m. cellulose as a nanostructured polymer: a short review. bio resources, 3(4), 1403-1418. 2008.
- [22] sundarraj, a. a., & rangathan, t. v. a review on cellulose and its utilization from agro-industrial waste. drug invent. today, 10(1), 89-94. 2018.
- [23] boerjan, w., ralph, j., & baucher, m. (2003). lignin biosynthesis. annual review of plant biology, 54, 519-546.
- [24] ragauskas, a. j., et al. (2014). lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. science, 344(6185), 1246843.
- [25] vanholme, r., et al. (2010). engineering traditional monolignols out of lignin by concomitant up-regulation of f5h1 and down-regulation of comt in arabidopsis. plant journal, 64(6), 885-897
- [26] l. aguirre y f. enriquez, «comportamiento del hidróxido de sodio y potasio en función de la humedad y temperatura ambiental.» quito, 2013.
- [27] m. aguilar y c. durán, «química recreativa con agua oxigenada,» eureka, vol. viii, pp. 446-453, 2011
- [28] auras, r., lim, l. t., selke, s. e. m., & tsuji, h. (2011). poly(lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications. john wiley & sons. [isbn: 978-0-470-29366-4]
- [29] zhang, y., rempel, c., & liu, q. (2014). mechanical, thermal, and barrier properties of coextruded poly (lactic acid)/cellulose nanocrystal transparent films. journal of applied polymer science, 131(12), 40586.
- [30] kumar, v., yang, t. h., & yang, t. c. (2013). fabrication and characterization of cellulose acetate and poly (lactic acid) blend biodegradable nanofibers by electrospinning. carbohydrate polymers, 93(2), 819-825.

- [31] jonoobi, m., oladi, r., davoudpour, y., oksman, k., dufresne, a., & hamzeh, y. (2015). different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: a review. *cellulose*, 22(2), 935-969.
- [32] zhang, y., & lynd, l. r. (2004). toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: noncomplexed cellulase systems. *biotechnology and bioengineering*, 88(7), 797-824.
- [33] tahezadeh, m. j., & karimi, k. (2008). acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *bioresources*, 3(2), 472-499.
- [34] sun, y., & cheng, j. (2002). hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *bioresource technology*, 83(1), 1-11.
- [35] anderson, r. et al. "poly (lactic acid) production from waste materials: process and cost assessment." *bioresource technology*, vol. 301, 2020, pp. 122786.
- [36] biodegradable polyhydroxyalkanoates - reddy, ch s. et al. (2018). en: biopolymer- based formulations: biomedical and food applications. john wiley & sons, ltd. isbn: 978-1-119-34126-6,
- [37] j. a. escobar, "“elaboración y caracterización de biopelículas elaboradas con quitosano y adicionadas con partículas dealmidón,”" universidad autónoma del estado de México, México, 2020. accessed: mar. 30, 2022. [online]. available: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109321/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [38] l. lynd, l. r., weimer, p. j., van zyl, w. h., & pretorius, i. s. (2002). microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *microbiology and molecular biology reviews*, 66(3), 506-577.
- [39] zhang, y. h., & lynd, l. r. (2006). cellulose utilization by *Clostridium thermocellum*: bioenergetics and hydrolysis product assimilation. *proceedings of the national academy of sciences*, 103(25), 9650-9655.
- [40] l. saddler, j. n., & brownell, h. h. (1985). cellulose conversion. *proceedings of the bioenergy '80, conference*.

- [41] I. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- [42] I. Mok, W. S. I., & Antal Jr, M. J. (1992). Mechanisms of formation of levoglucosan and other compounds from cellulose. In *ACS Symposium Series* (Vol. 474, pp. 222-239).
- [43] Infinitia, «Infinitia,» 14 mayo 2021. [en línea]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-plasticos-tipos-composicion-usos/>. [último acceso: 2023].
- [44] S. Gibbens, «todo lo que necesitas saber sobre los bioplásticos,» *Nat Geo*, 2018.
- [45] ASTM E203-20a, "Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration." *ASTM International*, 2020.
- [46] AOAC International. (2016). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists.
- [47] "Determination of Moisture Content," Department of Chemistry, University of Wisconsin-Madison, <https://chem.wisc.edu/areas/analytical/instruments/moisture-determination>, consultado el 27 de septiembre de 2023.
- [48] "Official Methods of Analysis of AOAC International". Association of Official Analytical Chemists. Método 923.03 (cenizas en alimentos).
- [49] "Food Analysis" by S. Suzanne Nielsen. Capítulo 8: Determination of Ash, p. 211-236.
- [50] "Handbook of Food Analysis Instruments" by Semih Otles. Capítulo 3: Determination of Ash in Food, p. 51-63.
- [51] "Methods of Food Analysis" by W. W. Y. Souci, W. Fachmann, and H. Kraut. Capítulo 3: Ash and Minerals, p. 99-122.
- [52] Klason, P., & Lindgren, B. O. (1929). "The Calculation of the Lignin and Cellulose Content of Wood and Pulp." *Journal of the Society of Chemical Industry*, 48(12), 419-421. Crestini, C., Melone, F., Sette, M., & Saladino, R. (2011). "Mild Methods for Lignin Solation from Wood Pulp and Evaluation of Isolated Lignins." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(15), 7760-7768.



- [53] gonzález-garcía, s., moreira, m. t., & feijoo, g. (2013). "lignin extraction from eucalyptus globulus wood by organosolv pretreatment: an optimization approach." *bioresource technology*, 128, 368-375.
- [54] sun, s. l., wen, j. l., ma, m. g., & sun, r. c. (2014). "structural features and antioxidant activities of lignins from steam exploded bamboo (*phyllostachys pubescens*)." *process biochemistry*, 49(7), 1139-1147
- [55] astm international, «standard test methods for apparent density, bulk factor, and pourability of plastic materials, » 2010.
- [56] e. a. s. parra, «comparación de los parámetros en la síntesis,» universidad de pamplona, p. 51, 2021.
- [57] r. a. arias ortiz y j. d. meneses cruz, «caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol,» universidad nacional autónoma de nicaragua, managua, p. 122, 2016.
- [58] e. manals, d. salas y m. penedo, «caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla decafé”,» scielo, p. 13, 2017.
- [59] l. j. b. pacheco, «evaluación de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de iones plomo pb<sup>2+</sup> presente en soluciones acidas,» universidad libre, p. 67, 2014.
- [60] a. b. á. hincapié, «caracterización fisicoquímica de varios residuos agroindustriales y sus mezclas para la producción de biocombustibles,» universidad santo tomas, p. 85, 2016.
- [61] l. milian, m. hernández, j. falcon y a. otero, «obtención de bioproductos por pirólisis lenta de cascarillas de café y cacao para su posible uso como fuentes de energía y fertilizantes,» rcq - unal, p. 7, 2020.
- [62] l. b. cangussu, j. c. melo, a. s. franca, and l. s. oliveira, “chemical characterization of coffee husks, a by-product of *coffea arabica* production,” *foods*, vol. 10, no. 12, p. 3125, dec. 2021, doi: 10.3390/foods10123125.
- [63] y. cuadros huamani y e. alata mayhuire, «formulación y evaluación físico mecánica de películas biodegradables en base a residuos cítricos y celulosa,» universidad nacional de san agustín, p. 168, 2017.

- [64] «mexpolimeros,» [en línea]. available: <https://www.mexpolimeros.com/plastificante.html>.
- [65] r. navarro, «mifarma,» 23 diciembre 2019. [en línea]. available: <https://www.mifarma.es/blog/diccionario-farmacia/que-es-la-glicerina-para-quesirve/>. [último acceso: 18 marzo 2021].
- [66] e. hernández, r. cruz, f. robledo y l. santoyo, «caracterización del alcoholpolivinílico,» revista mexicana de ciencias farmacéuticas, pp. 15-25, 2007.
- [67] «iro alginate industry,» [en línea]. available:[https://www.iroalginate.com/sp/alginate/sodiumalginate.htm#:~:text=alginato%20s%20c%93dico%20\(c6h7o6na\)n%2c,la%20c%a9lula%20con%20otras%20sustancias](https://www.iroalginate.com/sp/alginate/sodiumalginate.htm#:~:text=alginato%20s%20c%93dico%20(c6h7o6na)n%2c,la%20c%a9lula%20con%20otras%20sustancias). [último acceso: 18 marzo2021].
- [68] p. charlie, «instron,» 20 10 2023. [en línea]. available: [último acceso: 10 10 2023].
- [69] s. pascoe y m. mendoza arce, «evaluación y caracterización físico-mecánica de un material bioplástico pigmentado,» p. 18, 2019.
- [70] r. r. daniela. a, t. e. evelin. p., *elaboración de biopelícula a partir dela semilla de aguacate variedad lorena*, tesis de ingeniería química, universidad de américa, bogotá, colombia, 2023
- [72]s. h. kevin. r., *comparación de la calidad de bioplásticos obtenidos del almidón de los residuos de papa y camote de restaurantes del mercado central del distrito de independencia,2017*, tesis de ingeniería ambiental, universidad cesar vallejo, lima, Perú, 2017
- [73] l. n. avendaño rojas, “evaluación de la síntesis de una película bioplástica a escala laboratorio a partir de residuos de mango (mangífera índica),” fundación universidad de américa, bogotá, 2022. accessed: oct. 01, 2022. [online]. available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8828/1/6162928-2022- 1-iq.pdf>
- [74] propiedades mecánicas de los polímeros. (s. f.). [acceso en línea] polymer science learning center. <https://pslc.ws/spanish/mech.htm>

[75] b. john, «importancia del análisis de humedad en la fabricación de plástico,» plastics technology mexico, 2023.

[76]m. morocho pilataxi, v. m. dalgo florez , l. flores fiallos y g. chango lescano , «caracterización físico química y mecánica de bioplásticos obtenidos a partir del trigo y la cebada,» revista el dominio de las ciencias , vol. 7, nº 4, pp. 623-637, 2021.

## **ANEXOS**

## Anexo 1

# PROTOCOLOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

### MATERIALES Y EQUIPOS:

- Estufa
- Agitador mecánico
- 20 ml de ácido clorhídrico

### EQUIPOS DE SEGURIDAD:

- Guantes de seguridad contra riesgos químicos
- Bata de laboratorio
- Gafas de seguridad

### FUNDAMENTOS CIENTIFICOS

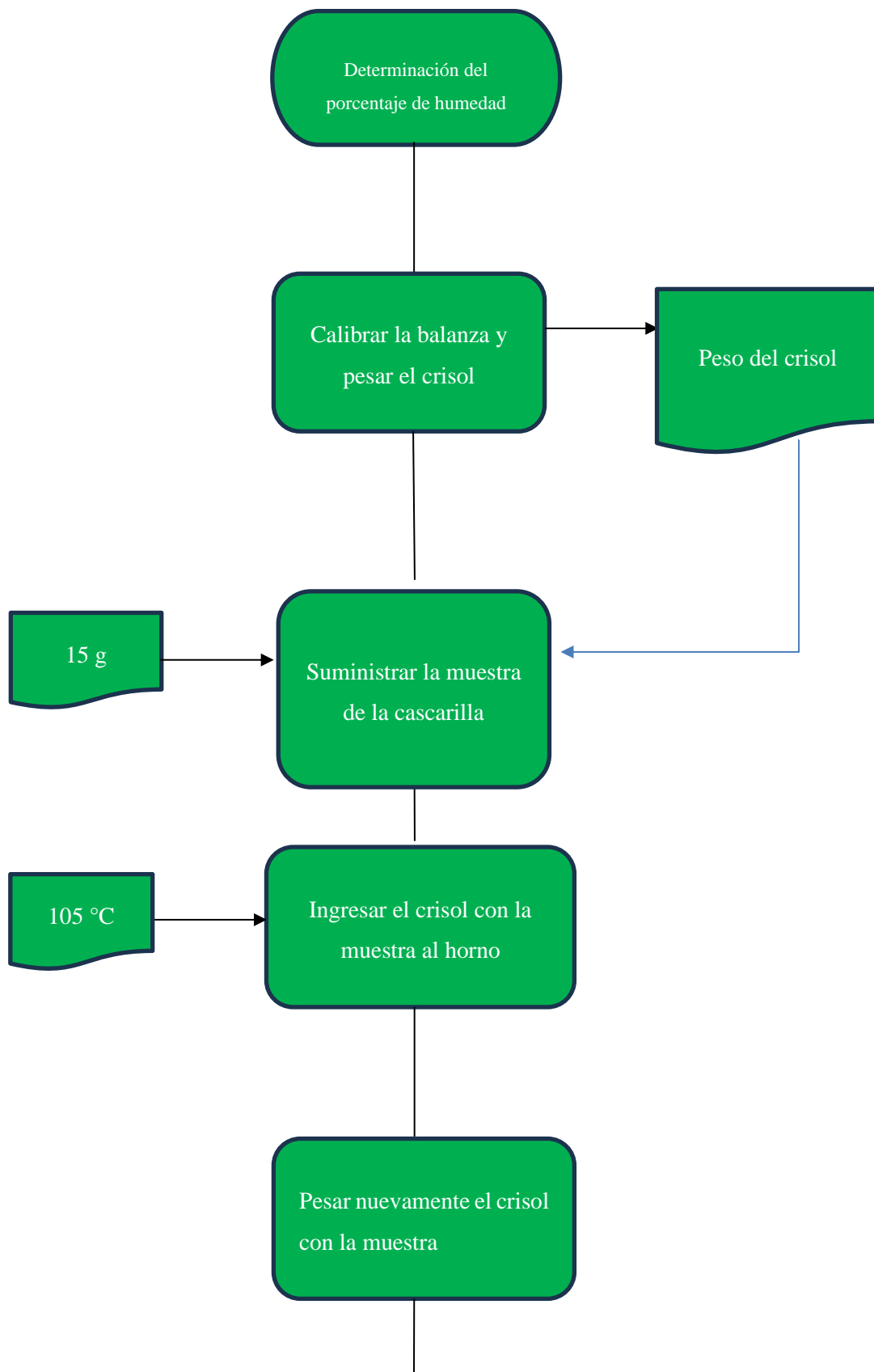
#### Determinación de la humedad (Método de secado en estufa):

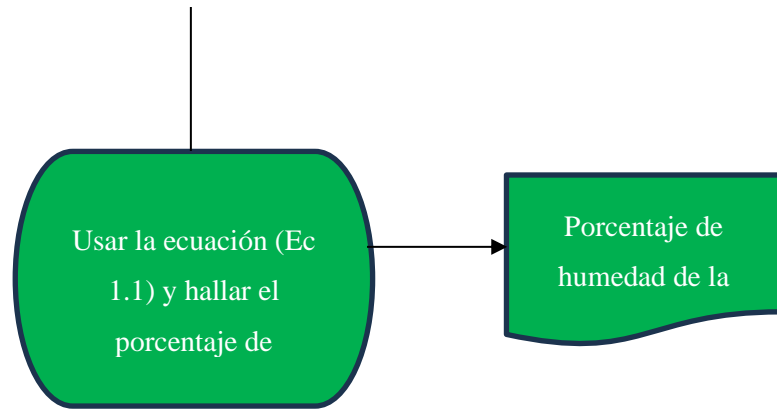
Este método implica pesar una muestra de cascarilla de café, secarla en una estufa a una temperatura constante y luego pesarla nuevamente para determinar la pérdida de peso, que se relaciona con el contenido de humedad.

$$\%H = \frac{(m_o - m_f)}{m_o} \times 100\% \quad (\text{Ec 1.1})$$

### PASO A PASO

1. Pesar la muestra de la cascarilla.
2. Secarla en la estufa a una temperatura constante
3. Pesar nuevamente la muestra
4. Determinar la pérdida de peso de la muestra y así relacionar esta pérdida con la humedad





## Anexo 2

### PROTOCOLOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CENIZAS

#### MATERIALES Y EQUIPOS:

- Mufla
- Crisoles
- Pinzas

#### EQUIPOS DE SEGURIDAD:

- Guantes de seguridad contra riesgos químicos
- Bata de laboratorio
- Gafas de seguridad

#### FUNDAMENTOS CIENTIFICOS

##### Determinación de la cantidad de cenizas: (Método de incineración en mufla)

Este es uno de los métodos más utilizados para determinar el contenido de cenizas en muestras orgánicas. En este método, la muestra se quema a altas temperaturas en una mufla (horno de alta temperatura) hasta que toda la materia orgánica se queme, dejando solo las cenizas. El residuo resultante se pesa y se calcula como porcentaje del peso inicial de la muestra.

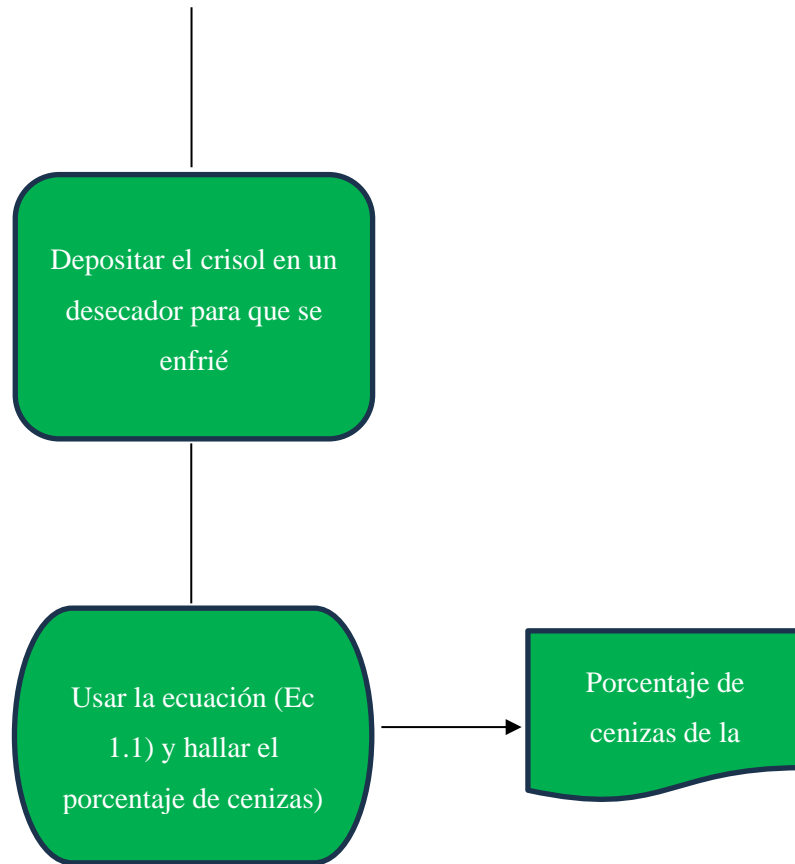
$$\%C = \frac{m_f}{m_o} \times 100\% \quad (\text{Ec 1.1})$$

#### PASO A PASO

1. Se coloca la muestra en la mufla
2. Se empieza a quemar la muestra a altas temperaturas
3. Se dejan todas las cenizas después de quemar toda la materia orgánica
4. Se pesa el residuo restante
5. Se calcula el peso como porcentaje del peso inicial de la muestra







### Anexo 3

## PROTOCOLOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE LIGNINA

### MATERIALES Y EQUIPOS

- Matraz de fondo redondo 500 mL
- 300 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 72 %
- 300 mL de agua destilada
- Embudo de filtración
- 4 unidades de papel filtro
- Horno

### EQUIPOS DE SEGURIDAD:

- Guantes de seguridad contra riesgos químicos
- Bata de laboratorio
- Gafas de seguridad

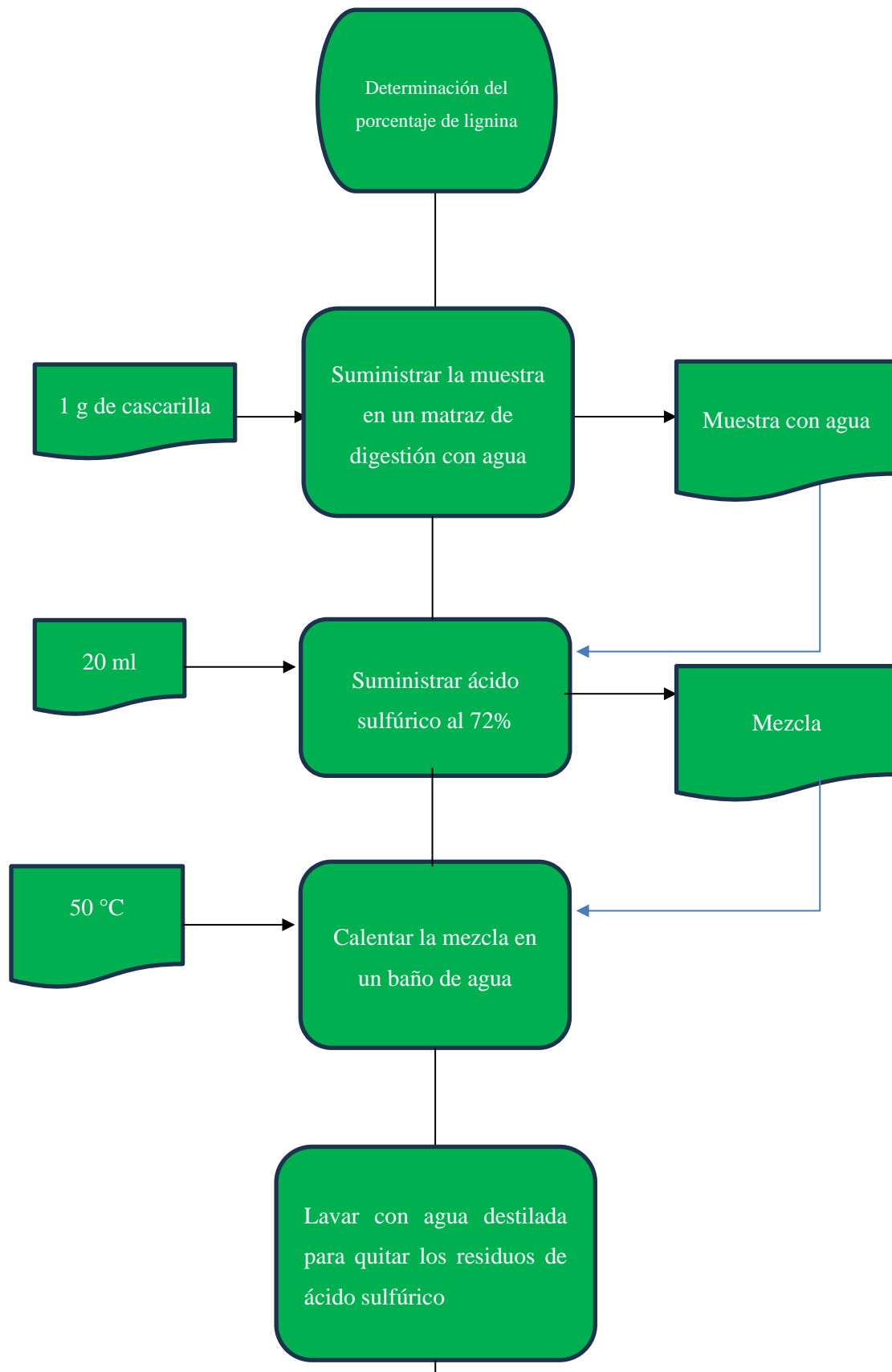
### FUNDAMENTOS CIENTIFICOS

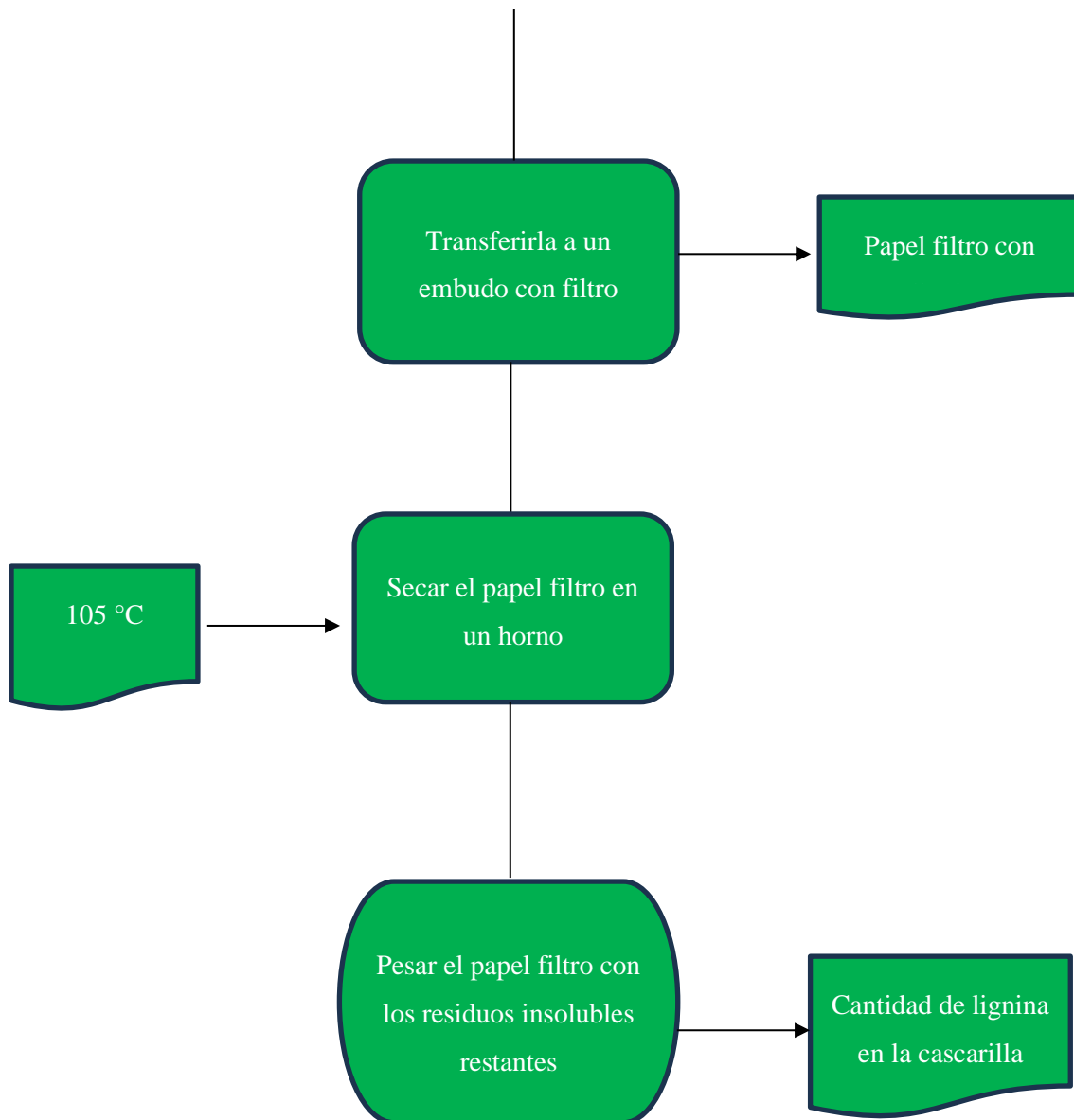
#### Determinación de lignina (Método de Klason):

Para la determinación de lignina se utiliza el método Klason este un método ampliamente utilizado para determinar la lignina en muestras de biomasa, y la finalidad de este método en nuestra muestra es el residuo insoluble que queda después de un ataque del ácido sulfúrico al 72 % ( $H_2SO_4$ ), y esa será la cantidad de lignina que tendrá nuestra muestra.

### PASO A PASO

1. Se pesa una cantidad deseada de cascarilla.
2. Se coloca la muestra en un matraz de digestión.
3. Agregar una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 72% en agua destilada.
4. Se calienta la mezcla en un baño de agua a 50 °C por una hora.
5. Enfriar la mezcla
6. Transferirla a un embudo con filtro de vidrio o papel filtro para separar la lignina de los residuos insolubles
7. Lavar los residuos insolubles con agua destilada para eliminar los restos de ácido sulfúrico.
8. Secar los residuos insolubles en un horno a una temperatura de 105-110 °C hasta peso constante
9. Pesar los residuos insolubles secos, que representan la cantidad de lignina en la muestra.





## Anexo 4

### PROTOCOLOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA

#### MATERIALES Y EQUIPOS:

##### Determinación de la densidad aparente y la densidad relativa

- Balanza
- Recipiente de 1Lt

##### EQUIPOS DE SEGURIDAD:

- Guantes de seguridad contra riesgos químicos
- Bata de laboratorio
- Gafas de seguridad

#### FUNDAMENTOS CIENTIFICOS

Se determinará la densidad aparente insertando la muestra en un recipiente el cual tiene un volumen específico también se pesará el recipiente en una balanza sin la muestra y después con la muestra, se restará el último peso obtenido con el peso del recipiente, de tal manera obtendremos el peso, utilizaremos la siguiente ecuación para obtener la densidad aparente:

$$Da = M \times V \quad (\text{Ec 1.1})$$

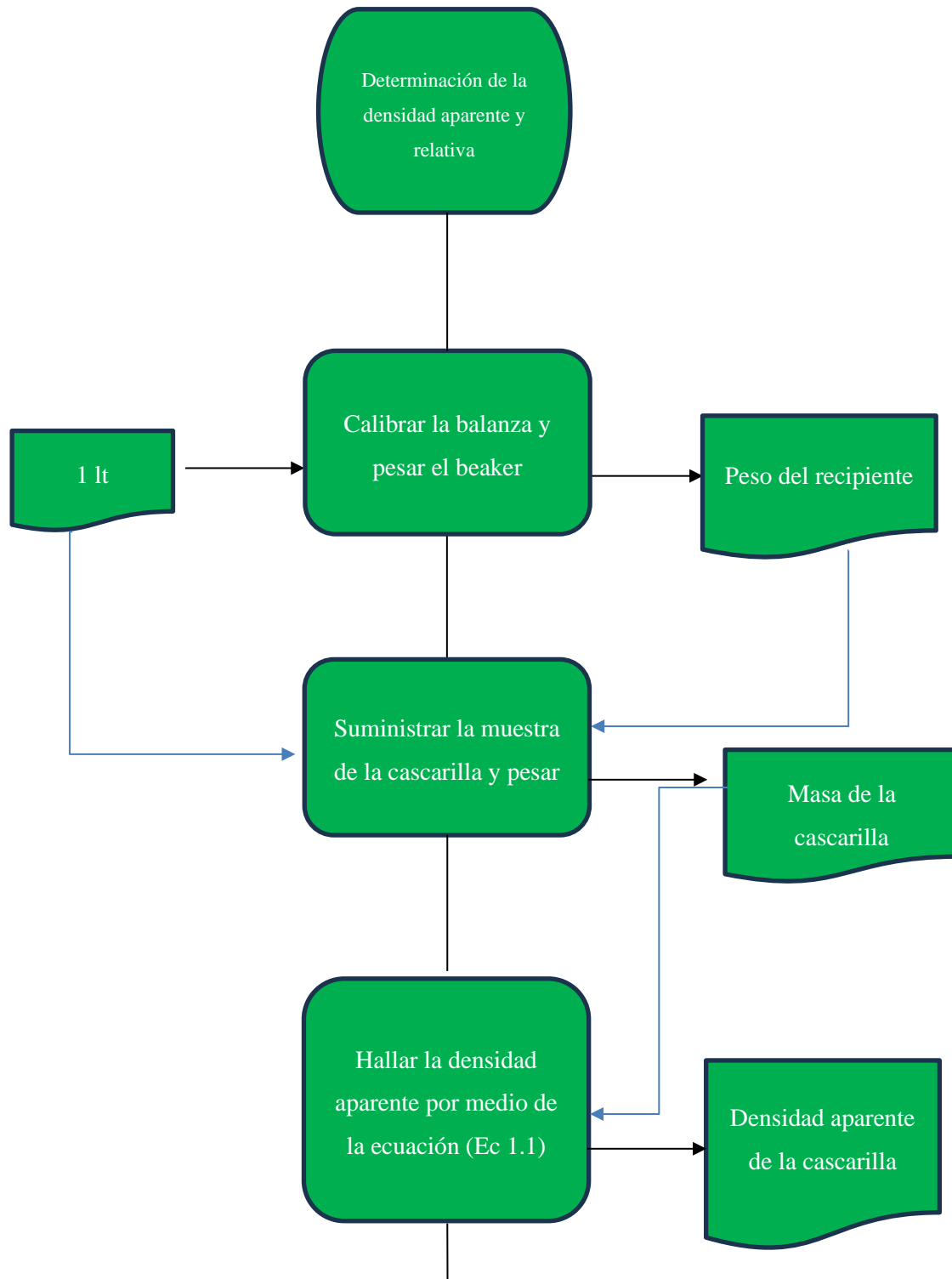
Para el análisis de la densidad relativa, se realiza a partir del valor obtenido de la densidad aparente mediante una comparación con otra densidad, en este caso se toma la densidad del agua, haciendo uso de la siguiente fórmula que determinará la densidad aparente relativa adimensional:

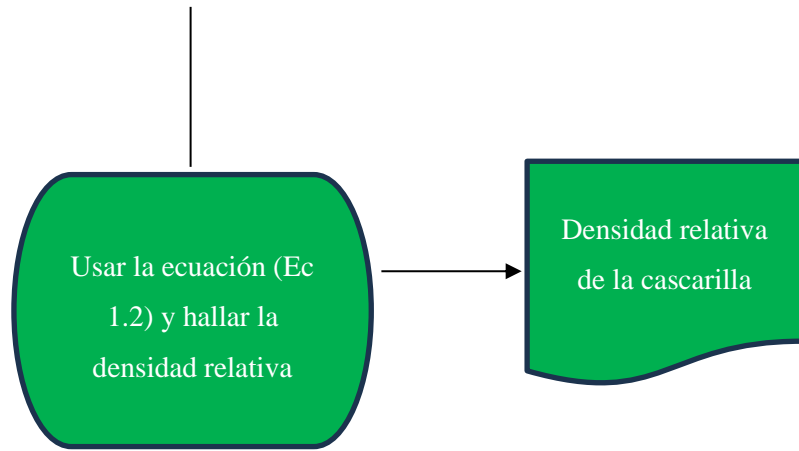
$$Dr = \frac{D_{Cafe}}{D_{H_2O}} \quad (\text{Ec 1.2})$$

#### PASO A PASO

1. Calibrar la balanza
2. Pesar el recipiente de un litro vacío
3. Se sitúa el residuo adentro del recipiente
4. Restar el peso obtenido del paso 3 por el peso obtenido del paso 2, y el resultado nos mostrará el peso exacto de nuestra muestra
5. Se resuelve la ecuación de la densidad aparente ya mostrada anteriormente reemplazando los datos del peso obtenido y del volumen del recipiente.

6. Teniendo en cuenta el valor de la densidad aparente, usando la fórmula ya mostrada podemos encontrar el valor de la densidad relativa.
7. Se toman los datos de la densidad aparente ya obtenidos de la cascarilla de café y se compara con la densidad aparente del agua.







## Anexo 5

# PROTOCOLOS DE ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CELULOSA

### MATERIALES Y EQUIPOS

- Hidróxido de Sodio
- Agua destilada
- Recipientes de vidrio o acero inoxidable
- Tamiz o Filtro
- Papel filtro
- Horno
- Ácido Sulfúrico o Ácido Clorhídrico

### EQUIPOS DE SEGURIDAD:

- Guantes de seguridad contra riesgos químicos
- Bata de laboratorio
- Gafas de seguridad

### PASO A PASO

1. Preparación de la cascarilla de café: Pesar una cantidad específica de cascarilla de café seca. La cantidad dependerá del equipo disponible, pero se suele usar una relación en peso cascarilla de café/agua de alrededor de 1:10 a 1:15 para obtener una suspensión adecuada.
2. Preparación de la solución alcalina: Prepara una solución alcalina utilizando agua y el hidróxido de sodio (NaOH) . La concentración de la solución dependerá del experimento, pero suele variar entre 5% y 10% en peso. Tener cuidado al manipular estos productos químicos, ya que son corrosivos. Usa guantes y gafas de protección.
3. Mezcla: Agregar la cascarilla de café pesada al recipiente con la solución alcalina preparada. Mezclar bien para asegurarse de que toda la cascarilla esté en contacto con la solución. El tiempo de mezcla puede variar, pero se suele dejar durante varias horas, incluso toda la noche, para permitir que la celulosa se separe de la cascarilla.

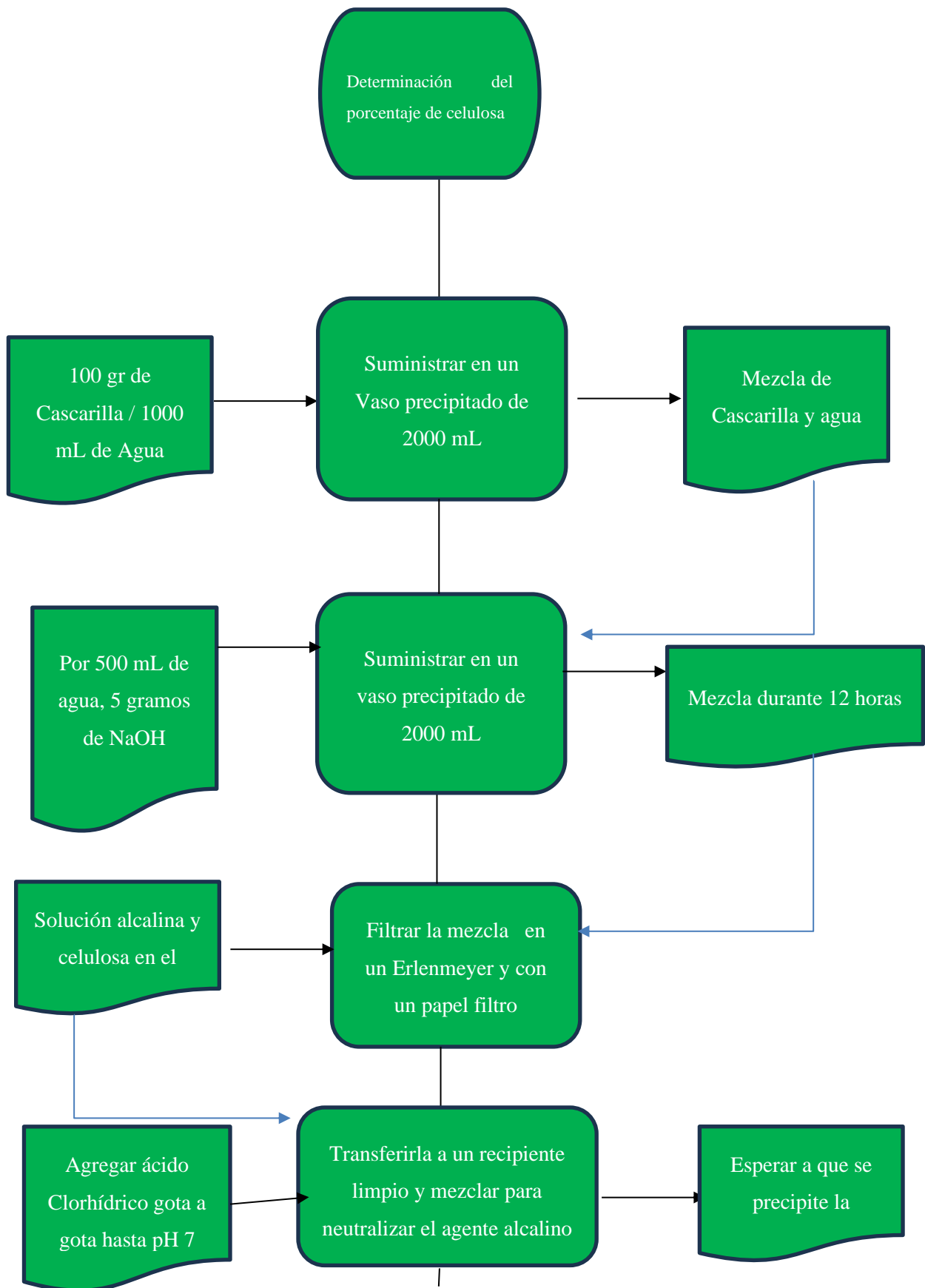
4. Filtración: Filtrar la suspensión resultante para separar la celulosa de la cascarilla. Utilizar un tamiz o filtro adecuado para retener la cascarilla y permitir que la celulosa y la solución alcalina pasen a través. Recoger la solución en otro recipiente limpio.

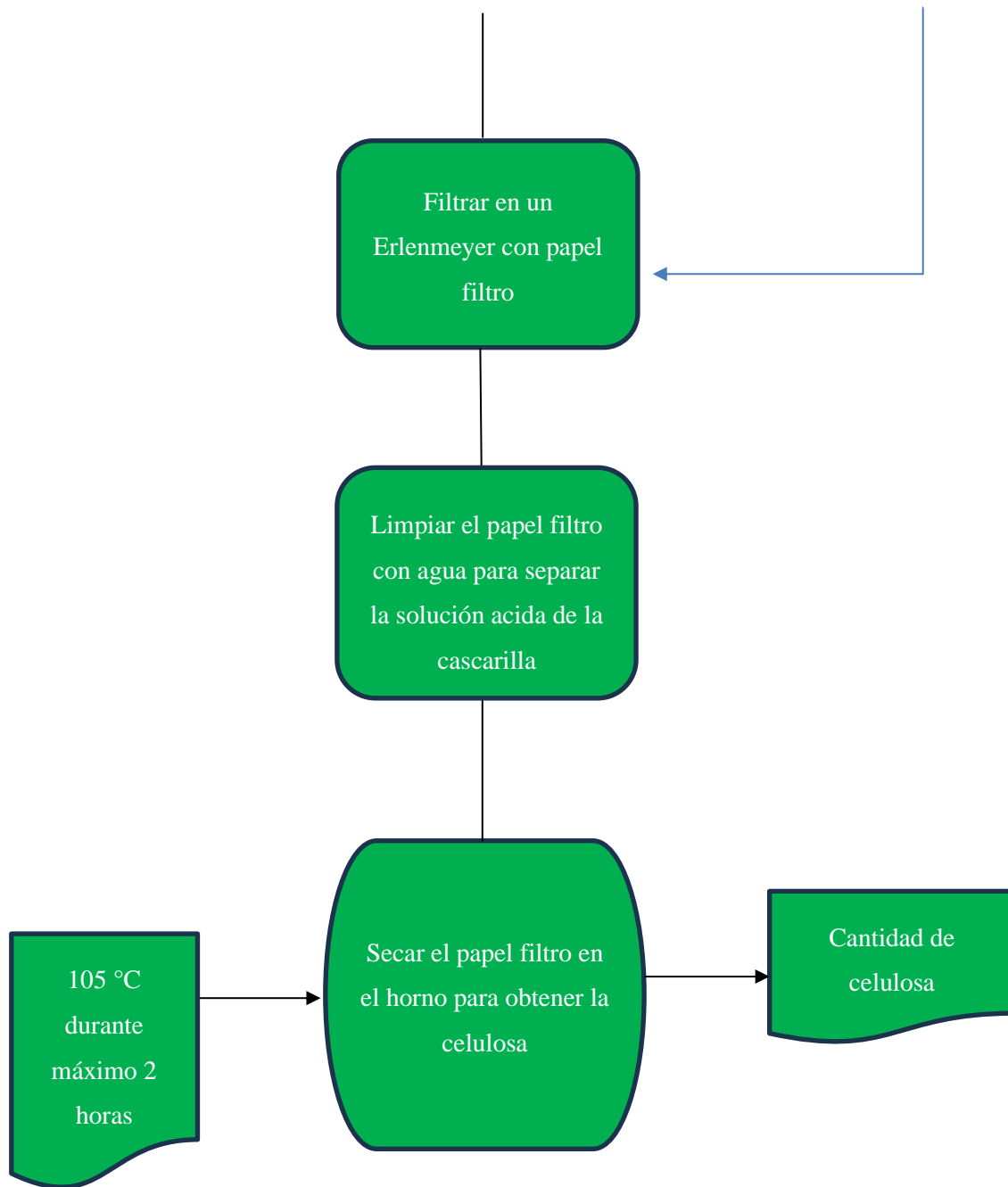
5. Neutralización: Para detener la acción del agente alcalino, se neutraliza la solución alcalina que contiene la celulosa. Esto se puede hacer agregando ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) gota a gota hasta que la solución alcance un pH cercano a 7. La cantidad de ácido dependerá de la concentración de la solución alcalina y la cantidad de celulosa presente.

6. Precipitación de la celulosa: La celulosa se precipitará de la solución cuando se neutralice adecuadamente. Hay que esperar a que se precipite naturalmente o acelerar el proceso mediante la refrigeración.

7. Lavado: Lava la celulosa precipitada con agua varias veces para eliminar cualquier residuo alcalino o ácido. Esto es importante para garantizar que la celulosa esté completamente limpia.

8. Secado: Una vez lavada, seca la celulosa. Puedes hacerlo al aire libre o en un horno a baja temperatura.





## **RECOMENDACIONES**

Escalar el proceso a nivel laboratorio a un proceso a nivel industrial para estudiar la viabilidad económica del mismo.

Se recomienda preservar la celulosa extraído de la cascarilla de café en bolsas herméticas y bajo temperatura ambiente para conservar sus propiedades, en caso de que la celulosa se requiera utilizar después de un tiempo

Después de secar las biopelículas se deben poner en el desecador para que no adquiera humedad del ambiente y no pierda sus propiedades.

Es fundamental establecer las condiciones de operación de cada etapa del proceso, ya que esto permite un mejor control de cada uno, lo que evita pérdidas de materia prima y energía que pueden ser significativas cuando este tipo de proceso se amplía a nivel industrial.