

UNIVERSIDAD EAN

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PELÍCULA BIODEGRADABLE A PARTIR
DE CÁSCARA DE HUEVO Y ALMIDÓN DE PLÁTANO VERDE**

AUTORES:

**ESCALANTE ROJAS GISETH VALENTINA -INGENIERÍA QUÍMICA
RODRÍGUEZ CASTELLANOS SANTIAGO- INGENIERÍA QUÍMICA
SANDOVAL GARCÉS VALENTINA- INGENIERÍA QUÍMICA**

DIRECTORA:

SOLANO MEZA JOHANNA KARINA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADO

BOGOTÁ D.C; COLOMBIA

2024

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN EJECUTIVO	6
2. INTRODUCCIÓN	7
3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	9
3.1. Objetivo General.....	9
3.2. Objetivos Específicos	9
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
4.1. Problemática	10
4.2. Problema.....	11
5. JUSTIFICACIÓN.....	12
6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	14
6.1. Alcance	14
6.2. Equipos	14
6.3. Viabilidad presupuestal	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Antecedentes.....	17
7.2. Bioplásticos	18
7.2.1. Definición	18
7.2.2. Tipos de Bioplásticos.....	18
7.2.3. Componentes y funciones.....	20
7.2.4. Rangos de Composición en peso del componente.....	22
7.2.5. Pruebas de caracterización de bioplásticos	23
7.2.6. Requerimientos técnicos	25
7.2.7. Rutas de síntesis de bioplásticos.....	27
7.3. Residuos Orgánicos	32
7.3.1. Residuos de cáscara de huevo.....	32
7.3.2. Propiedades de la cáscara de huevo.....	33
7.3.3. Componentes presentes en la cáscara de huevo.....	33
7.4. Plásticos	34
7.4.1. Clasificación	34
7.4.2. Composición	36
7.4.3. Estructura	37
8. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES	41

9.	METODOLOGÍA	43
10.	DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	46
11.	DISCUSIÓN	52
12.	ANÁLISIS DE COSTOS	60
13.	CONCLUSIONES	63
14.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Ruta de síntesis de bioplásticos de almidón. Tomado de (Yadav, A., et al, 2018)</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 2. Ruta de síntesis de bioplásticos de Polihidroxialcanoato. Tomado de (Behera, S., et al., 2022).</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 3. Ruta de síntesis de bioplásticos de Polihidroxialcanoato. Tomado de (Ahmad, A., et al, 2024).</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 4. Ruta de síntesis de bioplásticos de celulosa. Tomado de (Nigam, S., et al, 2022).</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 5. Estructura Química del Policloruro de Vinilo. Tomado de (Butt, M. T. Z., et al., 2022).....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 6. Estructura Química del Polietileno Teraftalato. Tomado de (Britannica T, 2024).</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 7. Estructura Química del Polipropileno de Alta Densidad. Tomado de (Britannica T., Proyecto de Grado., 2024).</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 8. Estructura Química del Polipropileno. Tomado de (Britannica T, 2024).</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 9. Estructura Química del Polietileno de Baja Densidad. Tomado de (The Essential Chemical Industry, 2017).....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 10. Estructura Química del Poliestireno. Tomado de (Britannica T, 2024).</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 11. Montaje del proceso de tamizaje de la cáscara de huevo. Tomado de (Elaboración propia., 2024) .</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 12. Montaje del ensayo. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 13. Diagrama de proceso metodología inicial. Tomado de (Elaboración propia., 2024)</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 14. Diagrama de proceso metodología modificada. Tomado de (Elaboración propia., 2024)</i>	<i>47</i>

TABLA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Composiciones y resultados Ensayo 1 y 2. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2. Composiciones y resultados Ensayo 3 y 4. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3. Resultados Ensayo 5 y 6. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4. Resultados Ensayo 7 y 8. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7. Resultados prueba biodegradabilidad, ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 9. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10. Resultados prueba biodegradabilidad, ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024).....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 11. Costo de las materias primas en la cantidad mínima vendida. Tomado de (Elaboración propia., 2024) ...</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 12. Costo de las materias primas empleadas en cada ensayo. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 13. Costo de la mano de obra por ensayo realizado. Tomado de (Elaboración propia., 2024).....</i>	<i>62</i>

1. RESUMEN EJECUTIVO

Actualmente, el uso de plásticos se ha convertido paulatinamente en una constante necesidad, pues se sabe que estos polímeros derivados del petróleo pueden emplearse a nivel industrial y cotidiano, al poseer características de resistencia, impermeabilidad, ligereza, fácil manipulación y bajo costo. Sin embargo, su adquisición indiscriminada y excesiva producción, está acarreando problemáticas de carácter ambiental, las cuales varían desde la intoxicación de especies en sus hábitats naturales hasta la generación de gases de efecto invernadero que promueven el cambio climático.

En el marco de esta problemática, países como Colombia han desarrollado acciones que contribuyan a la mejora de la misma, entre ellas la prohibición de la distribución de plásticos de un sólo uso, lo cual ha generado incógnitas relacionadas con posibles materiales que puedan brindar una alternativa de sustitución de los polímeros derivados del petróleo.

Es por ello que la intención de esta investigación se centra en identificar la viabilidad de películas biodegradables sintetizadas a partir de almidón de plátano verde con cáscara de huevo como componentes principales de la matriz polimérica. Así pues, se analizó si es posible elaborar un bioplástico con características equiparables a las que presentan los plásticos no biodegradables. Asimismo, se espera que la película biodegradable esté en la capacidad de generar un menor daño ambiental al degradarse en componentes más simples en condiciones específicas.

Cabe destacar que en esta investigación las biopelículas se generaron experimentalmente, de modo que se obtuvo una experiencia de primera mano en su elaboración. Además, se recurrieron a fuentes de información teóricas para comprender a mayor profundidad la problemática generada por los plásticos y las nuevas invenciones generadas para mitigar su

impacto.

2. INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas más grandes en la actualidad es el exceso de los plásticos de un solo uso. Entre los años de 2000 a 2019, la producción mundial de plásticos a base de petróleo alcanzó entre las 234 a 460 millones de toneladas. (OECD, 2024). Estos cuentan con una vida útil muy corta, sin embargo, las consecuencias que estos generan en el medio ambiente son muy duraderas para el medio ambiente. Por ejemplo, el tiempo de degradación de una botella de agua es de 450 años, donde un 75% de las botellas producidas terminan en vertederos, en las calles o en el lecho marítimo. Y mientras estas botellas se descomponen, estas sueltan sustancias químicas que son nocivas tanto para los humanos como para la fauna salvaje en donde se encuentren los residuos plásticos. (WWF, 2021).

Debido a esta problemática, el campo de la investigación y el desarrollo a buscado alternativas amigables con el medio ambiente al plástico de un solo uso que pueda implementar. De la que se destaca la elaboración de bioplásticos, los cuales son elaborados por materiales de origen natural como lo son las plantas o los vegetales. Si se lograra una implementación, aunque sea parcial, de los bioplásticos como alternativa a los plásticos convencionales, se mitigaría muchos daños que estos provocan tanto al ambiente como a los habitantes de estos. Adicionalmente, esta propuesta también es reciclable y sirve de compostaje para fomentar la idea de economía circular, que ha cogido bastante fuerza en los últimos años.

Es desde esta alternativa a los plásticos de un solo uso, que parte la propuesta de este proyecto, siendo esta, la caracterización y elaboración de una película biodegradable hecha a partir de materiales orgánicos, como lo son la cáscara de huevo y el almidón de plátano verde. En la primera parte de este documento, se expondrá toda la problemática de los plásticos de un

solo uso y por qué la propuesta de un bioplástico elaborado a partir de cáscaras de huevo y almidón de plátano verde, puede llegar a ser viable en el mercado actualmente. Después, se expondrá todo el marco referencial como lo es, la clasificación de los bioplásticos, las diferentes rutas de síntesis de estos, la importancia del uso de residuos orgánicos como la cáscara de huevo y las diferentes características de los plásticos y que tipo de normativas siguen estos en el marco legal de Colombia.

3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Objetivo General

Sintetizar y caracterizar una película biodegradable a partir de la cáscara de huevo y almidón de plátano verde, con el fin de brindar una alternativa de sustitución para los plásticos de un sólo uso, como contribución a las políticas de economía circular en el país.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de la composición de diferentes bioplásticos, identificando requisitos y características propias de los mismos para la determinación de posibles composiciones.
- Sintetizar una película biodegradable que incorpore cáscara de huevo, almidón de plátano verde y agentes plastificantes naturales.
- Caracterizar el material obtenido a través de análisis superficial de la película, pruebas de alargamiento a la rotura, ataque químico y biodegradabilidad en tierra y agua.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

4.1. Problemática

Los plásticos son materiales de carácter polimérico, altamente elásticos y resistentes; son originados a partir del petróleo y modificados mediante procesos de polimerización del carbono, sin embargo, durante su proceso de producción e incineración generan alrededor de 850 millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero (Greenpeace Colombia y MASP, 2019), lo cual tiene connotaciones negativas en el marco del cambio climático, ya que estos suelen retener el calor del sol, promoviendo el calentamiento global.

De acuerdo con el Fondo Mundial Para la Naturaleza, en Colombia se generan aproximadamente 750.000 toneladas de plásticos al año, entre los cuales se encuentran envases y recipientes, adicionalmente, se ha identificado que estos plásticos no desaparecen, contrario a ello, suelen fragmentarse generando micro plásticos que están en la capacidad de contaminar fuentes hídricas, aire, alimentos, bebidas, e incluso, hábitats naturales (WWF, 2021).

Por otro lado, de acuerdo con el informe “Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente” elaborado por la Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública (MASP) de la Facultad de derecho de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia, aproximadamente el 56% de la basura que se produce a diario en Bogotá, está compuesta por residuos plásticos, así mismo, se denotó que en promedio se producen 4,5 kg de basura a diario en cada hogar colombiano de los cuales sólo el 30% suele ser reciclado (Universidad de los Andes, 2019).

En contraste, también se denotó que hay aproximadamente 150 millones de toneladas de plásticos en fuentes hídricas, e incluso, anualmente este número se ve incrementado, ya que, alrededor de 8 millones de toneladas suelen ser arrastradas por el viento hacia ríos, hábitats

naturales y océanos (Greenpeace Colombia y MASP, 2019).

4.2. Problema

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la prohibición del manejo de plásticos de un solo uso en Colombia representa un primer paso para el desarrollo sostenible, la economía circular y la disminución de los gases efecto invernadero en el país (Min Ambiente, 2024). Los plásticos de un solo uso como bolsas, isopos, envases, entre otros, han causado serios problemas de contaminación debido a su lenta degradación y descomposición, contribuyendo así al detrimento de los ecosistemas en Colombia.

Ante la problemática ambiental planteada, se hace imperativo desarrollar una alternativa sostenible ante la gran cantidad de residuos de plásticos con bajo porcentaje de reciclaje efectivo que exacerba la creciente crisis ambiental actual del país generada por los diferentes focos de contaminación industrial y doméstica.

La falta de control en la producción de este tipo de plásticos pone en peligro no solo los ecosistemas marinos pues afecta toda una cadena reproductiva debido a las muertes tempranas y modificaciones genéticas ocasionadas por los aditivos tóxicos existentes en los componentes de estos, sino que también la calidad de la vida humana ya que la quema y los manejos inadecuados de estos residuos liberan toxinas al ambiente que pueden causar enfermedades respiratorias y diversas afecciones que comprometen la salud pública y calidad de vida de las poblaciones.

Es por ello por lo que los plásticos elaborados a partir de fuentes biológicas nacen como una solución potencialmente viable, por esa razón se realizó el siguiente cuestionamiento, el cual se centra en identificar si... ¿Es posible sintetizar y caracterizar un bioplástico elaborado a partir de cáscara de huevo y almidón de plátano verde, como una posible alternativa para la sustitución de plásticos de un sólo uso?

5. JUSTIFICACIÓN

La creciente problemática ambiental en Colombia generada por plásticos de un solo uso representa uno de los mayores desafíos para la economía y los ecosistemas del país. Los plásticos convencionales, derivados del petróleo generan graves problemas de contaminación debido a su lenta degradación, liberando micro plásticos y componentes tóxicos que degeneran los suelos, aguas u afluentes y organismos vivos. Por lo anterior, la búsqueda de alternativas ecológicas y amigables con el medio ambiente se ha convertido en una necesidad inherente para mitigar su impacto en la naturaleza.

Los bioplásticos, elaborados a partir de productos vegetales y fuentes renovables nacen como una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental en contra relación con los plásticos de uso convencional, de igual modo, la elaboración de una biopelícula aporta no solo a la reducción de la contaminación plástica sino que también al aprovechamiento de residuos agrícolas generando así un valor añadido que impulse nuevas ideas y un cambio cultural en la comercialización y manufactura de este sector en el país.

Por lo anterior, los residuos agroindustriales como la cáscara de huevo, rica en calcio, aporta resistencia y rigidez en la película, y el almidón de plátano verde que proporciona flexibilidad a la fórmula; estas características mecánicas son esenciales en su composición puesto que definen su comportamiento y posterior uso para determinar su aplicabilidad en la industria (Almeida, M.F., et al., 2022), ya que estos componentes ofrecen un potencial significativo que busque cumplir con las regulaciones vigentes y aporten al desarrollo ambiental de Colombia. Dichos materiales abundantes y de bajo costo, contienen propiedades que pueden ser usados para el desarrollo y experimentación de una película bioplástica con propiedades mecánicas adecuadas que cubran las necesidades ambientales del país.

En conclusión, este estudio propone una solución innovadora y sostenible al acuciante problema de la contaminación por plásticos de un solo uso, pero al mismo tiempo, también contribuye al avance del conocimiento científico e investigativo y por supuesto, promueve el desarrollo de una consciencia ambiental más sostenible y responsable.

6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

6.1. Alcance

Este proyecto se elabora con el fin de contribuir de forma innovadora y sostenible a la problemática ambiental ocasionada por los plásticos de un sólo uso, todo ello mediante la síntesis y caracterización de una película biodegradable que presente propiedades de resistencia, rigidez y dureza equiparables a las de plásticos derivados del petróleo, e implementando a su vez características de biodegradabilidad relacionadas directamente con componentes que no sean nocivos y que cuenten con la capacidad de degradarse de forma adecuada.

Para ello, se tomarán como base fundamentos teóricos obtenidos a partir de tesis de grado, proyectos de investigación publicados en revistas científicas, e incluso tesis doctorales presentes en bases de datos y fuentes de información confiables, que se relacionen con películas biodegradables, adicionalmente se determinará de forma experimental la composición adecuada de cada uno de los componentes con el fin de obtener un biopolímero de características ideales.

Finalmente, una vez obtenido el prototipo, se aplicarán pruebas de laboratorio que permitan verificar el cumplimiento de los requerimientos técnicos que presentan las películas biodegradables de acuerdo con la normativa vigente.

6.2. Equipos

Los equipos requeridos para la elaboración del material propuesto a una escala de laboratorio consisten en una plancha de calentamiento con agitación, cuyo fin principal se centra en calentar de forma controlada y uniforme los recipientes que contenían la mezcla. (Kalstein France, 2024).

También se necesita un horno con rango máximo de temperatura de 100°C que cuente con temporizador, siendo este un equipo del laboratorio que permite calentar materiales a

temperaturas elevadas. (Intekgroup, 2022). Se utilizó al final del proceso para el calentamiento de la mezcla y secado final.

El tamizador de laboratorio es un instrumento que es utilizado para la granulometría o el análisis de partículas. (Matex, 2024). Se empleó para obtener el tamaño de partícula apropiado para la incorporación de esta en la matriz polimérica, manejando rangos de tamices que oscilan entre 80micras a 30micras

Para medir el peso de los diferentes compuestos se empleó una balanza analítica con un rango de incertidumbre de ± 0.0001 .

6.3. Viabilidad presupuestal

Para la elaboración de películas biodegradables se requieren de residuos orgánicos como lo es la cascara de huevo, cuyo costo no es de alto valor, adicionalmente, se requiere de almidón de plátano verde, el cual se consigue por un precio aproximado de 3.650 pesos colombianos. Por otro lado, es necesario el uso de plastificantes como la glicerina, la cual oscila entre los 11.000 y 18.000 pesos, e incluso, se requieren gelificantes como pectinas, las cuales se encuentran a un costo de alrededor de 8.000 pesos, por último se requieren de adhesivos como PVOH cuyo costo corresponde a 15.000 pesos.

Cabe destacar que a medida que se incorporen diferentes agentes plastificantes, estos tenderán a incrementar el precio de la matriz biopolimérica, razón por la cual la fabricación de bioplásticos es un poco mayor al de los plásticos convencionales.

El monto total de los bioplásticos fluctúa entre los 2 a los 7 dólares americanos por kilogramo. (Sparkconcept, 2024). Esto se debe a que, el bioplástico requiere valores de producción mayores a los del plástico convencional. Sin embargo, es innegable el beneficio que aportan estos a la economía circular, empezando que estos ayudan a mitigar a la contaminación

generada por los plásticos convencionales, al ser la gran mayoría biodegradables o se pueden usar como compostaje. (EuroPlas, 2024)

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Antecedentes

La acumulación de plásticos en el medio ambiente representa una creciente amenaza para los ecosistemas y la salud humana. La producción de plásticos convencionales a partir de combustibles fósiles agota estos recursos no renovables y contribuye al detrimento de ellos.

En este contexto, la búsqueda de fuentes renovables para la elaboración de bioplásticos se ha intensificado, es por ello por lo que diversas investigaciones científicas han centrado sus esfuerzos en el desarrollo y estudio de biopolímeros de origen natural, que no solo reduzcan la dependencia de los plásticos de uso convencional, sino que también aprovechen residuos agroindustriales como materia prima.

Así pues, mediante búsquedas exhaustivas se han podido identificar que residuos de origen animal también son utilizados para la producción de bioplásticos. Algunas de las alternativas con mayor impacto han sido las que contienen, huesos de bovino, patas y plumas de pollo, huesos de pescado, sueros, entre otros, que son procesados para posteriormente obtener películas bioplásticas ricas en queratina. (Rivera Quiña, Y.D y Vílchez Orellana, V.A., 2020)

Del mismo modo, entre los residuos vegetales más populares para la elaboración de estas prácticas son el maíz, la cascara de papa, paja de arroz, soja, entre otros, de los cuales se obtienen biopelículas enriquecidas de celulosa, que aportan rigidez y resistencia al producto final. (Arotoma Chujutalli, L.F y Pacahuala Jines, M.F., 2020)

Sumado a ello, investigaciones que ahondan en el campo agroindustrial, especialmente el de almidones vegetales como la yuca, nacen como un posible sustituto de polímeros derivados del petróleo. La mezcla del almidón de yuca, con glicerina y agua destilada da como resultado una matriz polimérica que es moldeada por inyección para obtener productos finales como lo son

vasos bioplásticos, en donde la glicerina actúa como agente plastificante y el agua destilada como solvente para garantizar una mezcla homogénea (Paredes Vega, R.A, 2020).

Finalmente, estudios identifican que bioplásticos elaborados a partir de almidón de papa capira, presentan resultados a favor de la degradación en entornos de carácter húmedo, al disminuir su área superficial en rangos entre el 15% y el 20%, en tiempos aproximados de 48 horas de exposición. (Ruiz Galeano, C., 2022)

7.2. Bioplásticos

7.2.1. Definición

Los bioplásticos son materiales plásticos capaces de moldearse; generalmente están constituidos por compuestos químicos como almidón, celulosa, entre otros, los cuales son obtenidos a partir de fuentes renovables, relacionadas principalmente con bacterias o plantas, por otro lado, a comparación de plásticos derivados del petróleo, los bioplásticos se caracterizan por su capacidad de biodegradabilidad debido a la presencia de oxígeno y nitrógeno en su estructura. (Das, A., et al., 2023; Fridovich-Keil, J. L, 2024)

7.2.2. Tipos de Bioplásticos

- **Bioplástico de Almidón:** También conocido como almidón termoplástico, suele estar compuesto a partir de amilosa lineal, que proporciona elasticidad al material y amilopectina ramificada, centrada en controlar la tracción y alargamiento de este. Se considera un biopolímero útil por su bajo coste, disponibilidad y capacidad de renovación. Se considera prometedor tanto en la elaboración de películas comestibles como en la composición de biocompuestos tras ser mezclado con refuerzos o rellenos; sin embargo, todo ello está altamente relacionado con la compatibilidad entre los componentes de la matriz polimérica, la forma, la cantidad, e incluso, el tamaño del relleno. (Ahsan, W. A., et al., 2023; Dhakal, H.

N., et al., 2023).

- **Bioplástico de Polihidroxicanoato (PHA):** Son biopolímeros biodegradables que incorporan polihidroxicanoato o PHA, el cual proporciona propiedades físicas similares a polímeros derivados del petróleo en cuanto a altas temperaturas de fusión y la alta resistencia a la tracción (Behera, S., et al., 2022).

El PHA es producido por la fermentación bacteriana de azúcares o lípidos en la naturaleza, todo ello mediante microbios intracelulares que lo sintetizan y almacenan como carbono y energía en carboxisomas al interior de cepas bacterianas, hongos, levaduras o microalgas, todo mediante condiciones de deficiencia de nutrientes. (Acharjee, S. A., et al., 2023; Behera, S., et al., 2022)

Por otro lado, los bioplásticos elaborados con PHA presentan una mayor biodegradabilidad y biocompatibilidad. Adicionalmente, sus propiedades tanto químicas como mecánicas se relacionan con su composición química y los sustratos empleados en la matriz del biopolímero. (Behera, S., et al., 2022)

- **Bioplástico de Ácido poliláctico (PLA):** Son termoplásticos alifáticos biodegradables caracterizados por contener ácido poliláctico, también conocido como poliéster alifático, el cual es derivado del ácido láctico y la lactida, formado mediante procesos de polimerización de azúcares cuyo origen se remonta a fuentes diversas de biomasa...Suele ser empleado en la producción de envases biodegradables, debido a que los poliláctidos presentes en su estructura suelen descomponerse en aproximadamente tres semanas mediante procesos de compostaje. (Ahsan, W. A., et al., 2023).

En contraste, los bioplásticos elaborados con PLA suelen evidenciar características como la facilidad de elaboración, no toxicidad, propiedades térmicas mejoradas, biodegradabilidad e

incluso compatibilidad con otros compuestos; profundizando un poco, el PLA al momento de degradarse libera agua, dióxido de carbono y materia orgánica descompuesta o humus, el cual puede ser empleado por plantas como abono, de tal forma que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero; asimismo, este biopolímero tiene la capacidad de no producir productos intermedios o subproductos de carácter tóxico al momento de entrar en contacto con oxígeno, lo cual es un diferencial muy específico a comparación de otros polímeros sintéticos. (Ahsan, W. A., et al., 2023)

- **Bioplástico de celulosa:** Son biopolímeros que incorporan celulosa como componente principal en su composición, dicho esto, la celulosa empleada en este tipo de biopolímero suele obtenerse a partir de residuos orgánicos de carácter agrícola, pues estos contienen materiales lignocelulósicos compuestos de celulosa y lignina. (Hassanisaadi, M., et al., 2024)
- Por otro lado, estos materiales bioplásticos presentan características como rigidez, resistencia, alta duración y capacidad de biodegradación. Adicionalmente, son equiparables con los biopolímeros compuestos de almidón, ya que presentan cadenas lineales con enlaces glucosídicos que unen variadas unidades del monómero de glucosa; sin embargo, pese a compartir el mismo monómero, difieren en cuanto a la orientación estructural de sus cadenas poliméricas, por lo que en el caso de los materiales que emplean celulosa se denota una disminución en cuanto a flexibilidad y resistencia, pues estos presentan moléculas que entablan enlaces de hidrógeno débiles. (Ahsan, W. A., et al., 2023; Fauza, A. N., 2022)

7.2.3. Componentes y funciones

- **Alcohol Polivinílico (PVOH):** Es un polímero sintético de tipo alcohol ampliamente utilizado en procesos industriales, médicos y alimenticios, todo ello debido a su alta solubilidad en agua, resistencia química, propiedades de barrera a los gases y capacidad de biodegradabilidad. (Liu,

G., et al., 2014)

Comprende la función de adhesivo, emulsionante y película protectora soluble en agua, suele ser empleado en la producción de películas biodegradables con el fin de incrementar la resistencia a la tensión y acoplar satisfactoriamente los compuestos que la conforman. (Britannica, T., 2023; Enríquez, M., et al., 2012)

- **Almidón de plátano verde:** El almidón ((C₆H₁₀O₅)_n) es un polisacárido que comprende monómeros de glucosa unidos mediante enlaces α 1,4, suele presentar cadenas lineales llamadas amilosas o ramificadas denominadas amilopectinas. (Britannica, T., 2024)

Es el encargado de brindar elasticidad, tracción y alargamiento a las películas biodegradables, en este caso en particular es obtenido de una fuente no convencional que proporciona entre un 65% y 70% de almidón resistente, un 21,5% y 25,7% de amilosa y aproximadamente entre un 74,3% y un 78,5% de amilopectina, razón por la cual tiene la capacidad de aumentar el aspecto cristalino de la biopelícula; sin embargo, este suele presentar restricciones en vista de que posee una alta sensibilidad a la humedad, a la vez que presenta una naturaleza hidrofílica. (Ahmad, I., 2024)

- **Agua:** Es una sustancia compuesta por hidrógeno y oxígeno, cuya fórmula química es (H₂O). Es empleada para disolver el almidón antes de incorporarlo en la producción de biopolímeros o plásticos degradables. (Enríquez, M., et al., 2012; Zumdahl, S.S., 2024)

- **Glicerol:** Es un compuesto orgánico perteneciente a la familia de alcoholes, se caracteriza por ser incoloro, viscoso y dulce; presenta la fórmula molecular C₃H₈O₃. (Britannica T, 2024)

En películas biodegradables cumple la función de ser el agente plastificante al ser de carácter líquido con una viscosidad superior a la del agua, razón por la que se incorpora con el fin de

mejorar la flexibilidad del biocompuesto. Cabe resaltar, que el glicerol al ser un alcohol soluble en agua disminuye la temperatura de fusión y la temperatura de transición vítrea (la temperatura en la que un polímero cambia su estado de uno sólido o vítreo a uno gomoso o blando) de tal forma que proporciona plasticidad al material. (Enríquez, M., et al, 2012)

- **Pectina:** Es considerada como una sustancia carbohidratada soluble en agua (Britannica T, 2024), suele emplearse como material de relleno o de refuerzo con el fin de brindarle mayor consistencia y volumen al material, en pro de ello, suele contribuir en aspectos como elasticidad, rigidez, resistencia, e incluso, biodegradabilidad. (Enríquez, M., et al., 2012)
- **Polvos de residuos orgánicos como la cáscara de huevo:** Son partículas de origen vegetal que pueden descomponerse y transformarse en materia orgánica. En el caso de los polvos orgánicos obtenidos a partir de la cáscara de huevo, debido a su alto contenido de carbonato de calcio tienden a aumentar la resistencia a la tracción, aumentar el alargamiento de la rotura y disminuir tanto la elongación como la capacidad de absorción de agua en la película. (Arotoma Chujutalli, L.F y Pacahuala Jines, M.F., 2020; Enríquez, M., et al, 2012)

7.2.4. Rangos de Composición en peso del componente

- **Alcohol Polivinílico (PVOH):** Su rango de composición oscila entre el 10% y el 40% en peso del total de la mezcla. (Enríquez, M., et al., 2012)
- **Almidón de plátano verde:** Representa uno de los mayores porcentajes en la composición de la película biodegradable, pues contempla entre el 30% y el 70% en peso del total de la biopelícula. (Enríquez, M., et al., 2012)
- **Agua:** Dado que sólo es empleado como solvente del almidón, su composición oscila entre el 2% y el 15% en peso del total de la mezcla. (Enríquez, M., et al., 2012)
- **Glicerina:** Al ser una sustancia plastificante representa entre un 5% y un 30% de la

composición total de la mezcla. (Enríquez, M., et al., 2012)

- **Pectina:** Gomas e hidrocoloides que sean solubles en agua, pueden incluirse en un rango de 0,05% al 15% del total de la mezcla. (Enríquez, M., et al., 2012)
- **Polvo de residuos orgánicos como la cáscara de huevo:** Dado que estos buscan aumentar la resistencia a la tracción y disminuir la elongación, los polvos de la cáscara de huevo deben presentarse en un 5% del peso total del elaborado. (Enríquez, M., et al., 2012).

7.2.5. Pruebas de caracterización de bioplásticos

Las pruebas de caracterización de bioplásticos son un proceso crucial para optimizar las condiciones de procesamiento y medir el rendimiento de la vida útil del bioplástico. (Rajaram, B., et al, 2022). Por ello, en este trabajo se elaborarán algunos procedimientos que permitan analizar las características de la película biodegradable, sin embargo, estos pueden variar de acuerdo con la aplicación final que se le busca dar al material. A continuación, se muestran algunas de las pruebas de caracterización más comunes:

- **Análisis térmico:** En este tipo de pruebas, se mide como el cambio de temperatura afectara las propiedades del material. Se mide el flujo de calor, perdidas de peso, cambios de dimensiones o cambios en las propiedades mecánicas en función de la temperatura. (Rajaram, B., et al, 2022). Se emplean pruebas como: Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Análisis Termogravimétrico (TGA) y Análisis Termogravimétrico asociado a Espectrometría de Masas (TGA-MS). Estas pruebas ofrecen beneficios como el que no es necesario hacer un tratamiento previo del material, y permiten obtener mucha información y datos a partir de una cantidad de material limitado. (Censi, V., et al, 2022).
- **Análisis mecánico:** Sirven para determinar las propiedades de un material o como la composición del material responde ante la aplicación de fuerza. Se aplica el Análisis

Mecánico Dinámico (AMD) para predecir el comportamiento del plástico ante la aplicación de fuerza o la deformación del material. También ayuda a determinar las propiedades viscoelásticas del material, como lo son, la durabilidad, flexibilidad, la elongación al romperse, la resistencia máxima, entre otras. (Rajaram, B., et al, 2022).

- **Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR):** Es el estudio de la variación en la intensidad de estiramiento de las bandas de carbonilo presentes en el polímero. Este instrumento, utiliza un sensor infrarrojo que es capaz de generar un gran número de resultados y analizar una serie de datos de micro plásticos, lo que permite tener una imagen más clara de la muestra. Estas imágenes se comparan con una base de datos de referencia, para así poder identificar el micro plástico por tamaño, volumen y masa. Finalmente, otros de los benéficos de esta técnica son: no provocara daños a la, no requiere de una preparación previa tan extensa y su aplicación es bastante rápida. (Censi, V., et al, 2022).
- **Espectrofotometría UV-sis:** Se le refiere como la “técnica clásica”, sirve para determinar el polímero PHB utilizando la degradación de la molécula P (3HB) a una banda de ácido crotónico, esto se logra calentando el polímero en ácido sulfúrico concentrado. Después, se determina la absorbancia de masa de la banda de ácido crotónico a una longitud de onda de aproximadamente 235 nm. Esta técnica es bastante simple y fácil de realizar, sin embargo, no se puede utilizar para detectar copolímeros. (Censi, V., et al, 2022).
- **Cromatografía de gas:** Se usa para determinar el contenido del polímero PHA, a través de un detector de ionización de llama. A pesar de ser un método que requiere de bastante trabajo, los resultados son muy precisos y proveen de bastante información de los monómeros de la muestra. Sus principales desventajas son: requiere de varios

pretratamientos de la muestra, también requiere unas grandes cantidades de muestra y finalmente, utiliza solventes que son dañinos para el medio ambiente. (Censi, V., et al, 2022).

7.2.6. Requerimientos técnicos

Las películas biodegradables que se proponen en este artículo, sintetizadas a partir de cascara de huevo y almidón de plátano verde, son una potencial alternativa a los plásticos de un solo uso convencionales. Para que estas puedan ser aplicadas a un ámbito industrial, dichas películas deben cumplir con una serie de requisitos técnicos que garantizan su funcionalidad y sostenibilidad.

De los requerimientos destacados, está la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura, las cuales son propiedades mecánicas que evalúan la resistencia del producto al esfuerzo sin que estas se rompan o se deformen. Por otro lado, la resistencia al impacto y la dureza examinan la resistencia a la abrasión y a la penetración.

Finalmente, la biodegradabilidad es fundamental para este producto, debido a que se busca que el producto se implemente como una alternativa a los plásticos de un solo uso y que además sean amigables con el medio ambiente.

- **Resistencia a la tracción**

Tomando a consideración el amplio campo de aplicación de los bioplásticos y su uso especial en la elaboración de envases, bolsas, vasos, entre otros; la resistencia a la tracción es una propiedad de vital importancia puesto que se relaciona con la fuerza máxima que puede soportar el biopolímero antes de romperse tras serle aplicada una fuerza externa que lo estira (Rivera Quiña, Y.D., et al, 2020). Lo cual es muy útil para evaluar aspectos como la durabilidad de la película biodegradable y la posible aplicación en la que se puede enfocar.

Por otro lado, la resistencia a la tracción se relaciona directamente con la composición del bioplástico, todo ello considerando el porcentaje en peso que representa el almidón, el agente plastificante o incluso, materiales de relleno o refuerzo. Asimismo, la fuente de origen del almidón determinará el porcentaje de amilopectinas que contenga y el aumento o disminución de la resistencia a la tracción por parte del biopolímero.

- **Alargamiento a la rotura**

Relaciona el largo inicial del material y el largo final del bioplástico al momento de la ruptura o la aparición de grietas, es útil a la hora de determinar parámetros como la flexibilidad y elasticidad del material (Bowyer, M., et al., 2019). Generalmente, esta propiedad está muy influenciada por el porcentaje en peso del almidón, los polvos de residuos orgánicos y el plastificante.

- **Impacto**

Este requerimiento se enfoca en verificar la capacidad de la película biodegradable para tolerar cargas de alta velocidad. Suele relacionar aspectos como sensibilidad, resistencia al impacto y tenacidad, puesto que esta última es encargada de medir la energía total absorbida por unidad de volumen de la biopelícula hasta el punto de quiebre. Generalmente, la dureza o fragilidad del material presenta una relación directa con el valor de impacto, el cual permite identificar el rendimiento del material y su vida útil. (Boey, J.Y., et al., 2022)

- **Dureza**

Busca identificar el desgaste del material, verificando la capacidad de resistencia a la abrasión, deformación, rayado e incluso, hendidura. Además, esta influenciada por su composición, razón por la que se busca que las biopelículas tengan un mayor valor de

dureza pues esta disminuye el desgaste por fricción, erosión por agua, aceite o vapor. (Boey, J.Y., et al., 2022)

Adicionalmente, dependiendo la posible aplicación del biomaterial, se puede considerar que una mayor dureza implica una menor posibilidad de que otros materiales penetren la matriz bioplástica, lo cual es de gran utilidad si se busca crear envases o contenedores de otros objetos. (Boey, J.Y., et al., 2022)

- **Biodegradabilidad**

En general, este proceso se centra en la transformación de sustancias mediante los microorganismos o enzimas que generan. Asimismo, dependiendo del biopolímero empleado en la composición del bioplástico, varían las rutas de descomposición y el tiempo de degradación. Todo ello, en vista de que la biodegradabilidad en bioplásticos se caracteriza por la transformación del carbono orgánico de las moléculas en compuestos más simples como dióxido de carbono y metano; además, en el caso de las películas biodegradables, se suele llevar a cabo en condiciones ambientales específicas, de tal forma que estas sean susceptibles a los microorganismos de ambientes marinos, procesos de compostaje e incluso entornos anaerobios. (Beltrán Villavicencio, M., et al., 2021)

7.2.7. Rutas de síntesis de bioplásticos

- **Bioplástico de Almidón:** Para la elaboración de estos, se emplean almidones como: papa, yuca, tapioca, arroz y maíz. Este se plastifica a través de la desestructuración en presencia de agua o de plastificadores con calor. También se les mezcla con varios biopolímeros y ciertos aditivos, esto con el fin de mejorar la resistencia a la humedad y las propiedades mecánicas del producto. (Yadav, A., et al, 2018). Si se emplea el almidón, existen diferentes resultados que dependerán de lo que se busque obtener en el plástico. En la figura 1 se mostrarán los

diferentes posibles resultados de la síntesis de los bioplásticos de almidón.

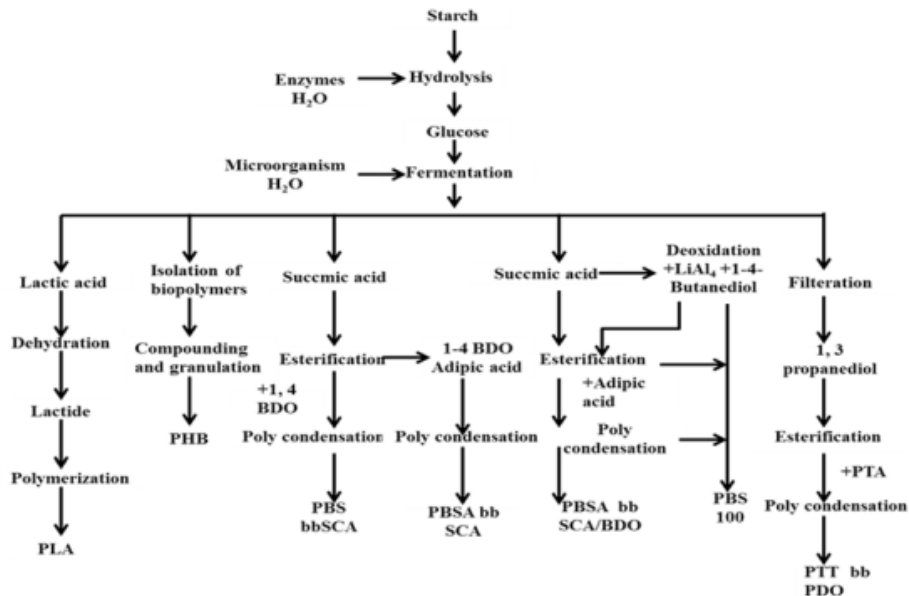


Ilustración 1. Ruta de síntesis de bioplásticos de almidón. Tomado de (Yadav, A., et al, 2018)

El almidón se someterá inicialmente a una hidrólisis, de la que se obtendrá glucosa que se fermentará y dependiendo de lo obtenido, se someterá a diferentes procesos.

En la primera ruta, de la fermentación se obtuvo ácido láctico el cual se deshidratará para obtener lactida, la cual se polimerizará para obtener el polímero PLA.

La segunda ruta consta de aislar los biopolímeros presentes en la fermentación, los cuales se someterán al proceso de granulación y finalmente formar PHB. Para la tercera y cuarta ruta, después de la fermentación se obtuvo ácido succínico, el cual se esterificará dando como resultado una bifurcación, en la primera se obtuvo +1,4 BDO y en la segunda opción se obtuvo 1-4 BDO ácido adípico, estos dos se someterán a la policondensación, dando como resultado PBS bbSCA y PBSA bbSCA respectivamente.

Sin embargo, del ácido succínico también se puede obtener PBS 100, a través de una desoxidación. Finalmente, después de la fermentación el resultado se pasará por una filtración,

de la cual se obtendrá 1,3 propanodiol, este se someterá a una esterificación y una policondensación para resultar en PTT bb PDO. (Yadav, A., et al, 2018).

- Bioplástico de Polihidroxicanoato (PHA):** Para la síntesis de PHA, se pueden emplear tanto métodos biológicos o químicos. Sin embargo, estudios han encontrado que, para obtener resultados con una masa molecular mayor, los métodos biológicos son más fáciles de implementar que los químicos. (Behera, S., et al., 2022). Estos biopolímeros son sintetizados en tres rutas, que se exponen en la siguiente figura.

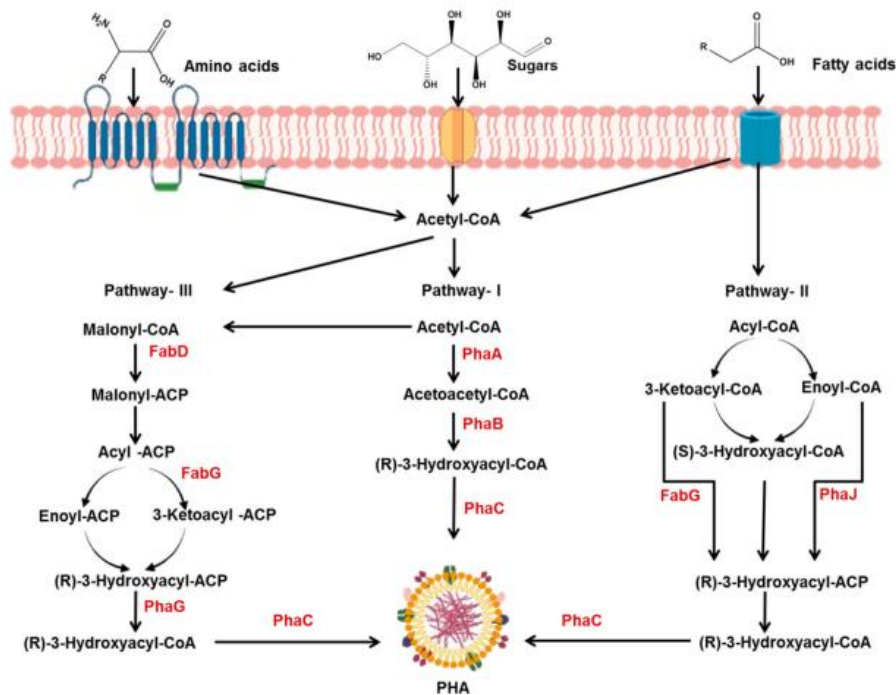


Ilustración 2. Ruta de síntesis de bioplásticos de Polihidroxicanoato. Tomado de (Behera, S., et al., 2022).

En la primera ruta, se convierte moléculas de azúcar en PHA a través de las enzimas PhaA, PhaB y PhaC. La segunda ruta requiere de las enzimas FabG, PhaJ, y PhaC para convertir moléculas de ácidos grasos en PHA. La última ruta emplea las enzimas FabD, FabG, PhaG y la PhaC, las cuales transforman a los aminoácidos a él polímero PHA. Como se observa, todas las rutas requieren de PhaC para poder sintetizar PHA de forma biológica. (Behera, S., et al., 2022).

- Bioplástico de ácido poliláctico (PLA):** El proceso comienza con la producción de ácido láctico, donde se busca genera lactida para posteriormente convertirlo a ácido poliláctico (PLA). Existen tres etapas para este proceso: La primera etapa es la fermentación microbiana del ácido láctico, la segunda es la separación y purificación del ácido láctico para una posterior preparación de los dímeros cíclicos o lactidas, y la última etapa es la policondensación del ácido láctico o también se aplica la polimerización de apertura de anillo a la lactida.

Para crear resultados con un alto peso molecular y de buen rendimiento, estos métodos dependerán del grado de polímero del ácido láctico. Las impurezas presentes en el crudo de ácido láctico tienen un gran impacto en los resultados de PLA, tanto en propiedades químicas como en las físicas. Es por esto por lo que es de vital importancia que la fermentación se lleve a cabo, para poder cumplir con el requerimiento de pureza del ácido láctico. (Ahmad, A., et al, 2024). La ruta de síntesis del ácido poliláctico se visualiza en la figura 3.

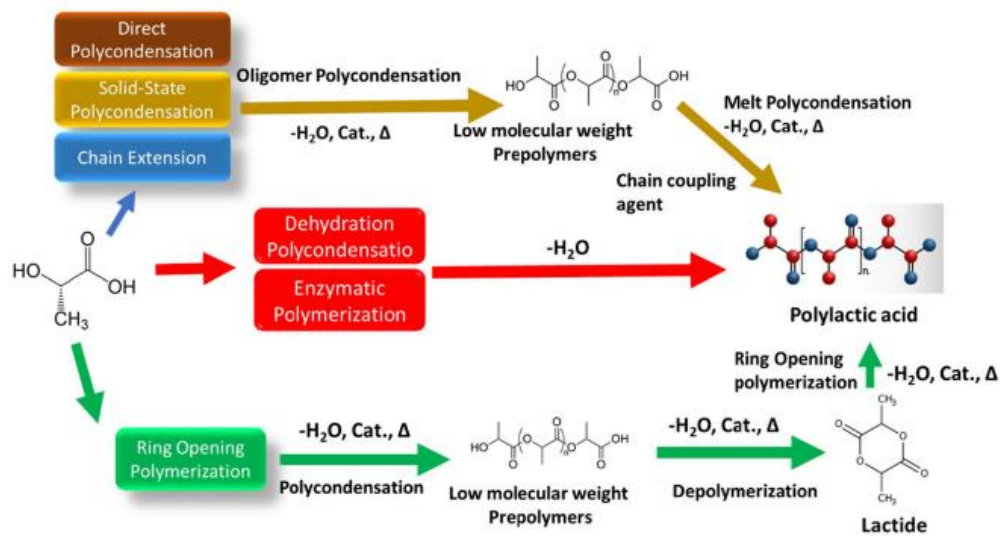


Ilustración 3. Ruta de síntesis de bioplásticos de Polihidroxiclcanoato. Tomado de (Ahmad, A., et al, 2024).

- **Bioplástico de Celulosa:** El proceso de síntesis comienza con la extracción de celulosa de las plantas, se utilizan hidróxido de sodio e hipoclorito de sodio para obtener la celulosa de la materia prima. Estas moléculas de celulosa se someterán a un proceso de acetilación, a través de sustancias como el ácido sulfúrico, anhídrido acético, y el ácido acético. De lo anterior se obtendrá triacetato de celulosa, sin embargo, este se puede someter a una hidrólisis para generar diacetato de celulosa, y si se desea este también puede realizarse otra hidrólisis para obtener un acetato de celulosa que es soluble en agua. Cada uno de estos acetatos, le darán características diferentes a los bioplásticos. (Nigam, S., et al, 2022). En la figura 4 se mostrará la ruta de síntesis de los bioplásticos de celulosa, y las diferentes características de cada producto.

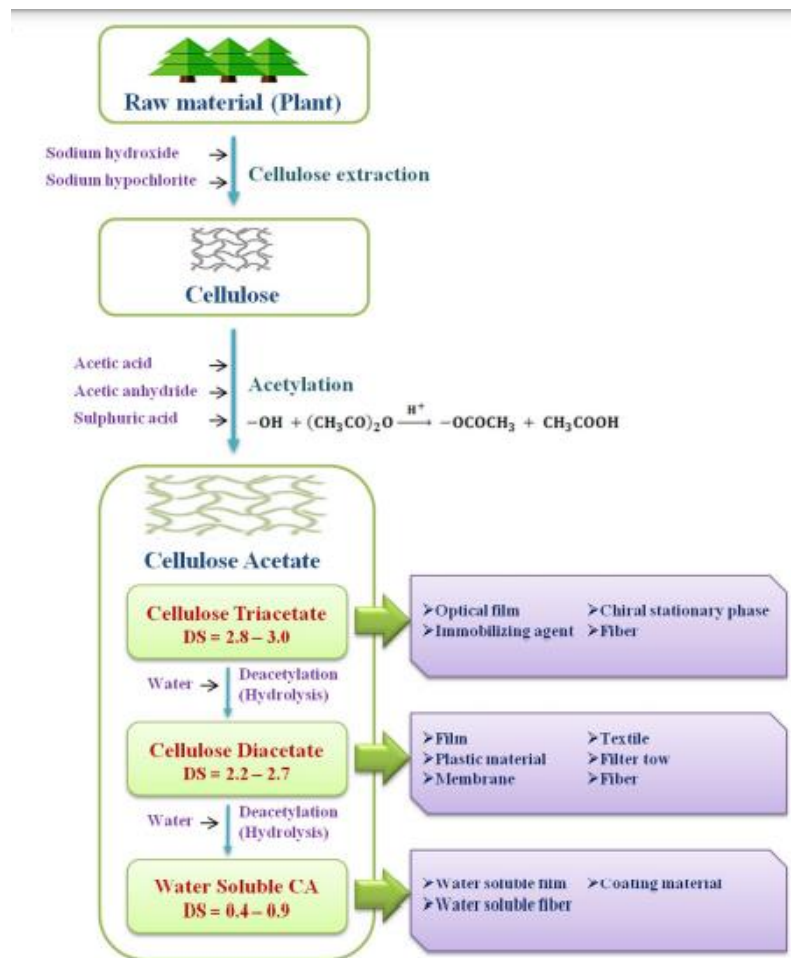


Ilustración 4. Ruta de síntesis de bioplásticos de celulosa. Tomado de (Nigam, S., et al, 2022).

Del triacetato de celulosa se forman películas que se usan para herramientas ópticas, o que se usan como un agente inmovilizante. El diacetato de celulosa se forman películas que se usan para materiales plásticos, en la industria textil, y membranas de plástico. Finalmente, el acetato soluble en agua forma películas que como dice su nombre, son solubles en agua, también se usan para la elaboración de materiales aislantes a la humedad. (Nigam, S., et al, 2022).

7.3. Residuos Orgánicos

7.3.1. Residuos de cáscara de huevo

Los huevos son de los productos orgánicos más consumidos en Colombia. Un reporte

realizado por la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), muestra que en el 2023 el consumo per cápita del huevo fue de 324 unidades. (FENAVI, 2024).

Gonzalo Moreno, el presidente de FENAVI comento para el diario El Colombiano: “al paso que va, Colombia será el mayor consumidor per cápita de huevo en el mundo dentro de cinco o máximo seis años.” (Vargas, D, 2024). De esta afirmación, se puede concluir que la generación de residuos de cáscara de huevo en Colombia es de los más grandes del mundo.

De esta generación de residuos de cáscara de huevo, también es posible concluir que la mayoría de los consumidores de este producto, no saben darle un uso adecuado a este residuo. Lo que resulta en un gran desperdicio, de lo que puede ser un subproducto al cual se le puede dar un segundo uso. La recolección y posterior implementación como materia prima de las cáscaras de huevo, se adhiere a las ideas de sostenibilidad y de economía circular que buscan la mayoría de los países en la actualidad.

7.3.2. Propiedades de la cáscara de huevo

La cáscara del huevo es una delgada capa mineral que tiene la función de proteger a este de varios factores, como lo son: la deshidratación, la contaminación por microorganismos, los impactos con superficies duras, entre otros. Esta también está compuesta por varios poros que permiten la entrada y salida de gases, que permiten que el embrión respire dentro del huevo. (Rodríguez A, 2019).

En la parte interna de la cáscara, se encuentra una capa hecha de queratina y fibras de colágeno llamada membrana, está conformada por 62 proteínas de fibras reticulares entrelazadas que proveen de una protección extra al embrión y controlan las pérdidas de tanto gases como de líquidos en el huevo. (González, V y Patricia, M., 2020).

7.3.3. Componentes presentes en la cáscara de huevo

El contenido de materia de la cascara corresponde a: un 2% de agua, un 98% materia seca del cual 5% es proteína cruda y un 93% de cenizas. El componente principal de la cáscara es el carbonato de calcio, que corresponde entre el 94% al 98% del peso total de la cascara. Además del carbonato de calcio, la cascara de huevo también contiene carbonato de magnesio, fosfato de calcio, materias orgánicas como glicoproteínas y proteoglicanos. (González, V y Patricia, M., 2020).

También contiene boro, estroncio, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, azufre, silicio y zinc. Adicionalmente, se ha encontrado que contiene una cantidad mínima de metales pesados como plomo, aluminio, cadmio y mercurio, estos usados como complementos dietarios. (González, V y Patricia, M., 2020).

7.4. Plásticos

7.4.1. Clasificación

En el mercado hay siete tipos de plásticos que cuenta cada uno con códigos y referencias internacionales (Fundación AQUAE, 2021). Estos materiales se clasifican principalmente por su estructura química que rige su comportamiento frente a diferentes temperaturas y la polaridad en donde la presencia de enlaces covalentes crea dipolos y forman así compuestos polares, si esta aumenta, la resistencia mecánica del material, su rigidez y dureza también lo hará. (AIMPLAS, 2019).

- **PET (Tereftalato de polietileno):** Es uno de los tipos de plásticos más usados en la industria, su uso y fin comercial es la fabricación de envases para bebidas. Este polímero representa el 11% de la contaminación ambiental por residuos plásticos (Fundación DKV, 2024). Se fabrica a partir de la polimerización de ácido teraftálico y se destaca por ser un material con gran dureza, rigidez, transparencia (impide la entrada de oxígeno), resistencia a

desgastes, roturas, impactos, entre otros. (Servei Estació, 2024).

- **HDPE (Polietileno de alta densidad):** Es un tipo de polímero termoplástico de alta resistencia y durabilidad, de apariencia transparente y cerosa, flexible y adaptable a diferentes temperaturas (entre 65°C y -60°C). Sus usos se expanden desde envases para alimentos pues, aunque su fabricación es a base de petróleo, cumplen con las regulaciones de la FDA (Food and Drug Administration), hasta la elaboración de tanques de gasolina automotrices. (Rojas, T., 2023).
- **PVC (Policloruro de vinilo):** El PVC es un plástico derivado de la polimerización del cloruro de vinilo, es un material rígido en su estado puro, usado para fabricar conductos, tuberías y revestimientos, para mantener flexible el producto necesita de plastificantes que lo mantienen moldeable a bajas temperaturas o temperaturas ambiente, en la industria se usa en mangueras de jardín, cortinas de ducha, etc. (Britannica T, 2024). En el ambiente, el mal manejo del material puede causar procesos de lixiviación debido a los productos químicos venenosos en su composición, en adición, su quema libera gases de cloruro de hidrógeno a la atmósfera, etcétera. (Aboelazm, A. A., et al., 2023).
- **LDPE (Polietileno de baja densidad):** Este tipo de plástico es uno de los más adaptables, durables y de fácil producción a nivel global, se usa en la producción de productos agrícolas, embalajes, cubiertas para invernaderos, entre otras cosas. En comparación con el HDPE, es mucho más maleable, suave y liviano a bajas temperaturas y además de ello presenta una densidad de 0,917 - 0,930 g/cm³. (Sravya, G. C., et al., 2024)
- **PP (Polipropileno):** El polipropileno es un gas que se obtiene a partir de la descomposición por calor de hidrocarburos como el etano, propano y butano, sus usos pueden variar pues se elaboran productos industriales, pero también domésticos como los materiales textiles

(Britannica T, 2024), es producido mediante la polimerización por adición, es un material altamente moldeable ya que puede ser sometido a procesos de extrusión e inyección lo que significa que es altamente resistente a temperaturas y presiones. (Maddah, H., 2016).

- **PS (Poliestireno):** El poliestireno es un derivado del estireno y se produce mediante la polimerización de este, posee una temperatura de transición de 95 a 105 °C, sus aplicaciones van desde cultivos celulares hasta cuchos sintéticos (Fisher, J.P., et al., 2018). Este plástico es duro y resistente, que puede mezclarse con otros plásticos para hacerlos más resistentes, además existen dos tipos de PS el extruido y el expandido (Britannica T, 2024), un claro ejemplo de esto es el poliestireno expandido y productos como las cavas o neveras generadas a partir de ello.
- **Otros plásticos (Nylon, Policarbonato, etc.):** Esta categoría se refiere a los plásticos elaborados con materiales que no se ajustan a la normativa anterior, lo que significa que son productos con más de un tipo de plástico en su composición y dificultan su reciclaje y clasificación. Ejemplos comunes son los dispositivos electrónicos, marcos de gafas, juguetes, entre otras cosas (Plastic Action Centre, 2023).

7.4.2. Composición

En general, los plásticos son polímeros derivados del petróleo, algunos poseen diferentes características debido a su composición química.

El PVC plastificado se compone principalmente de cloruro de vinilo al 50% en masa y como plastificante se usa el butiltalato de bencilo o disodeciltalato, mientras que el rígido solo contiene su componente base, pero en una proporción mayor (100% en masa); el polietileno de baja y alta densidad se constituyen de monómeros como el etileno, mientras que el poliestireno de estireno, el polipropileno de propileno (ambos al 100% de su composición en masa) y el

policarbonato de bisfenol A y fosgeno. Plásticos como el teraftalo de polietileno (PET) se integran de etilenglicol, ácido teraftalico y dimetil tereftalato (Dave, G., et al., 2011).

7.4.3. Estructura

- **PVC:** Está constituido como un polímero vinílico, en donde por cada dos átomos de carbono uno de hidrogeno esta sustituido por cloro. La n indica el grado de polimerización en el cual, su ordenamiento y crecimiento se caracteriza por ser de cara a cara, de cola a cola o de cabeza a cola, siendo este último el más predominante. (Butt, M. T. Z., et al., 2022).

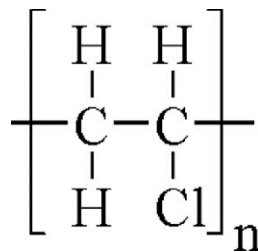


Ilustración 5. Estructura Química del Policloruro de Vinilo. Tomado de (Butt, M. T. Z., et al., 2022).

- **PET:** La producción del teraftalo de polietileno se da mediante la reacción entre el ácido teraftalico (ácido aromático dicarboxílico) y el etilenglicol (alcohol). Esta combinación entre los grupos carboxilos e hidroxilos da como resultado un éster que forma a su vez largas y múltiples cadenas de polímeros PET; este fenómeno también genera como subproducto agua. El anillo aromático en su estructura le proporciona a este tipo de plástico rigidez y resistencia cuando es sometido a estiramientos o vibraciones de tensión (Britannica T, 2024).

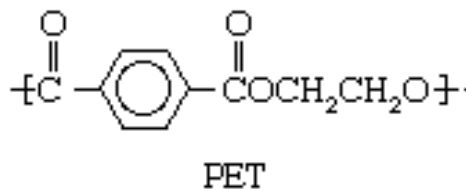


Ilustración 6. Estructura Química del Polietileno Teraftalato. Tomado de (Britannica T, 2024).

- **HDPE:** El polietileno de alta densidad se caracteriza por poseer una corta estructura química. Esto le permite que las cadenas de polímeros se posicionen una más cerca de la otra, provocando que el material resultante sea denso, rígido y altamente resistente. La carencia de ramificaciones permite que este material tenga puntos de fusión muy altos (250°F), en comparación con otro tipo de plásticos como el LDPE (Britannica T, 2024).

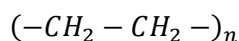


Ilustración 7. Estructura Química del Polipropileno de Alta Densidad. Tomado de (Britannica T., Proyecto de Grado., 2024).

- **PP:** El polipropileno es un tipo de plástico elaborado a partir de la reacción química de un gas llamado propileno, el cual proviene de la descomposición por craqueo térmico del etano, propano o butano. El PP se distingue por su rigidez, alta temperatura de fusión, baja absorción de humedad y su sensibilidad a la oxidación.

A continuación, la imagen representa la unidad repetitiva en la cadena del polímero (Encyclopedia Britannica, 2024).

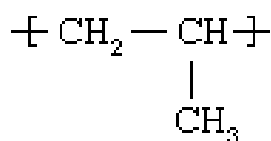


Ilustración 8. Estructura Química del Polipropileno. Tomado de (Britannica T, 2024).

- **LDPE:** El polietileno de baja densidad se obtiene a partir del etileno en estado gaseoso, a temperaturas y presiones muy altas, bajo la acción de iniciadores como el peróxido. Este proceso produce un polímero con ramificaciones de distintas longitudes que lo hace flexible

y cristalino. Algunas variaciones del LPDE se modifican añadiendo cloro o dióxido de azufre a su composición original para crear versiones más elásticas y poco cristalinas (Encyclopedia Britannica, 2024).

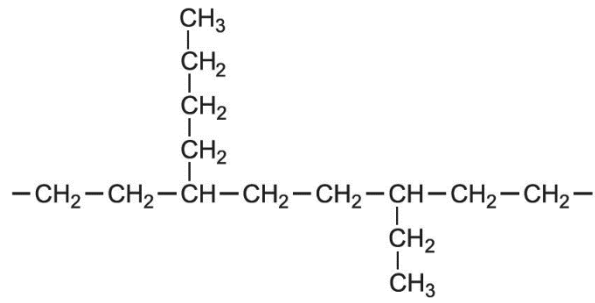


Ilustración 9. Estructura Química del Polietileno de Baja Densidad. Tomado de (The Essential Chemical Industry, 2017).

- PS:** El poliestireno es un tipo de plástico rígido pero un poco frágil que se elabora a partir del estireno. El estireno se obtiene al hacer reaccionar etileno y benceno mediante el uso de cloruro de aluminio para producir etilbenceno para posteriormente deshidrogenarlo y generar estireno líquido. Este producto se convierte en poliestireno mediante un proceso químico que involucra iniciadores de radicales libres. El PP contiene en su estructura grupos fenilo (anillos) que evitan que las cadenas del plástico se junten y formen cristales, lo que permite que el resultado final sea un material de apariencia transparente (Encyclopedia Britannica, 2024).

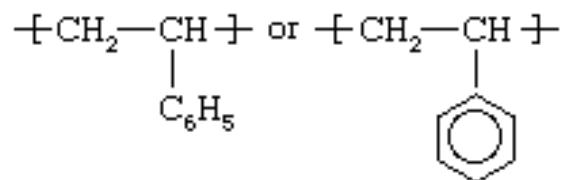


Ilustración 10. Estructura Química del Poliestireno. Tomado de (Britannica T, 2024).

7.4.4. Normativa

En Colombia existe y entró en vigor la ley 2232 de 2022 que establece medidas para la reducción y prohibición gradual de los plásticos de un solo uso, promoviendo la sustitución de estos por alternativas más sostenibles fomentando la economía circular en el país. Esta ley consta de 35 artículos en donde proponen la eliminación de 21 de estos plásticos. Del mismo modo, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, emitió la resolución número 0803, donde expone las medidas necesarias para la transición y reducción gradual de la producción y consumo de estos derivados del petróleo. (Min Ambiente, 2024).

Paralelamente, las industrias productoras de plásticos deben cumplir con las Normas Técnicas Colombianas (NTC), que son documentos que establecen características, requisitos y métodos de prueba para la evaluación de productos y posterior comercialización.

En el País, las NTC son desarrolladas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), que certifica a las empresas y sus productos a nivel nacional otorgando el sello del instituto como cumplimiento de los referenciales técnicos y normativos para la manufactura en Colombia. (ICONTEC, 2024).

El ICONTEC, cuenta actualmente con un catálogo de 37 normativas específicas para la manufactura de plásticos en Colombia, estas normas detallan los requerimientos para garantizar la calidad y seguridad de los productos que llegan los consumidores finales. (ICONTEC, 2024).

8. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

Tomando a consideración que el laboratorio y los equipos mencionados en el apartado 6.2 del presente documento fueron prestados por la Universidad EAN, se puede considerar que estos restringen la producción de la película biodegradable, todo ello debido a que representan un alto costo en el mercado, lo cual dificulta en gran medida el acceso a la infraestructura necesaria al momento de desarrollar una matriz polimérica de forma independiente.

Por otro lado, se denotan restricciones relacionadas con componentes como el almidón de plátano verde, ya que este no debe contener trazas de otros compuestos, en vista de que esto dificulta la formación de la película biodegradable. Adicionalmente, no se obtiene con facilidad en ciudades como Bogotá y su compra se debe realizar por medio de empresas con ventas online lo cual tiene implicaciones relacionadas con el tiempo de entrega, e incluso, este componente en particular se encuentra disponible en supermercados pertenecientes al departamento de Risaralda, de tal forma que su obtención se torna engorrosa.

La glicerina y la pectina son sustancias químicas que entran bajo las regulaciones y normativas del decreto 1630 de 2021. El cual expone la reglamentaria y la gestión de sustancias químicas en el campo industrial, incluyendo la gestión de riesgos tanto ambientales como para la salud. Específicamente, la sección 3 de “Obligaciones”, el artículo 2.2.7B.1.3.4 De las obligaciones del usuario: “Solicitar al importador o fabricante de las sustancias químicas de uso industrial que requieran programas de reducción y manejo del riesgo para el ambiente o para la salud, la información adicional que considere pertinente para implementar las acciones que les correspondan en dicho programa.” y “Realizar las acciones que les correspondan en los programas de reducción y manejo del riesgo para el ambiente o para la salud que defina el importador o fabricante, adaptadas a sus condiciones particulares de uso.” (Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Adicionalmente, bajo el mismo decreto, en la sección 4 “Monitoreo ambiental y de efectos en la salud”, en el artículo 2.2.7B.1.4.1. Monitoreo ambiental de las sustancias químicas de uso industrial, se define que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “establecerá un mecanismo de captura de información ambiental de las emisiones y transferencias de contaminantes que se generen a partir del uso de las sustancias objeto del presente decreto.”. Finalmente, en la misma sección, el artículo 2.2.7B.1.4.2. Monitoreo de los efectos en la salud por el uso de las sustancias químicas de uso industrial, se establece que: “Para el monitoreo de los efectos en salud, créase el Sistema de Gestión Toxicológica que determinará los componentes, procesos, procedimientos y responsables de proveer la información de la identificación de peligros, la exposición y los efectos en la salud por las sustancias químicas de uso industrial.” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

9. METODOLOGÍA

La metodología para la síntesis y caracterización de una película biodegradable a partir de cáscara de huevo y almidón de plátano verde inició con la investigación teórica de los diferentes componentes que se han implementado en diversos prototipos de biopelículas, asimismo, se realizó una cuidadosa selección de posibles compuestos encargados de conformar la matriz polimérica e incluso, se identificaron posibles rangos de composición.

Una vez realizado el análisis de información se optó por desarrollar la formulación de la película biodegradable con los componentes previamente seleccionados, todo ello, tomando como base teórica los datos proporcionados por la investigación.

Seguidamente se buscó desarrollar el prototipo en diferentes ensayos de laboratorio, para ello, se realizó el pesaje de las materias primas tales como el almidón de plátano verde, cascara de huevo, glicerina y pectina. Es importante mencionar que la cascara de huevo fue sometida a procesos de secado, molienda y posteriormente tamizado en mallas de entre 30 y 80 micras para lograr un tamaño de partícula adecuado y uniforme (Ilustración 11).



Ilustración 11. Montaje del proceso de tamizaje de la cáscara de huevo. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

Del mismo modo, la pectina fue previamente homogenizada en agua tibia mediante

agitación y el almidón fue gelatinizado en agua destilada hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 65° Celsius. Una vez alcanzada la consistencia deseada, se incorporaron los demás ingredientes y se retiró del montaje (Ilustración 12), tras ello se vertió en un molde para ser llevada a un horno de secado a 60° Celsius por 24 horas, finalmente, tras este tiempo la matriz polimérica fue desmoldada y caracterizada. Es importante mencionar que el proceso se puede evidenciar en el “Diagrama de proceso metodología inicial” (Ilustración 13).

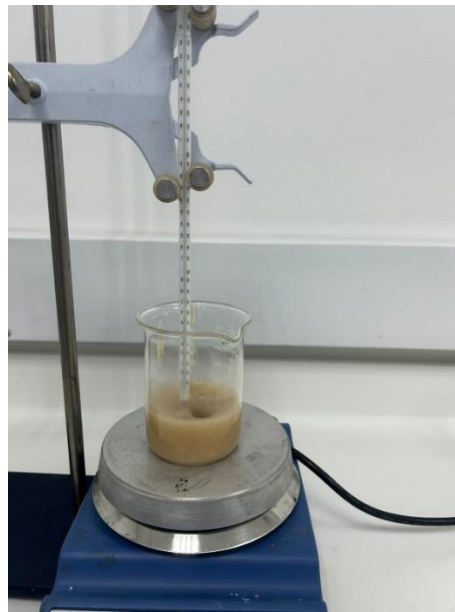


Ilustración 12. Montaje del ensayo. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

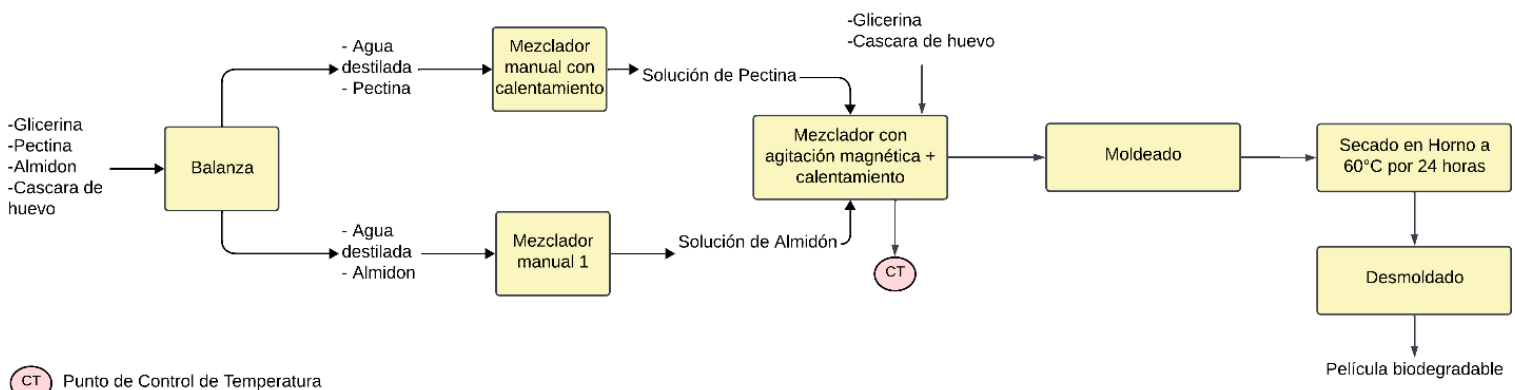


Ilustración 13. Diagrama de proceso metodología inicial. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

Por último, las composiciones de los reactivos variaron según el ensayo realizado, por ende, dichas alteraciones se encuentran registradas en la tabla 1 presente en el décimo apartado “Desarrollo de la solución”.

10. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

En un inicio se elaboraron dos ensayos, siguiendo la metodología presentada en el diagrama de flujo de proceso (Ilustración 13). De los prototipos de película biodegradable obtenidos, se denotó que hay una presencia excesiva de almidón, por lo cual se reformuló y se variaron las composiciones, de lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Tabla 1. Composiciones y resultados Ensayo 1 y 2**



Componentes	Composición en peso	
	Ensayo 1	Ensayo 2
Almidón de plátano verde	60g	40g
Agua destilada (presente en la solución de almidón)	110g	100g
Pectina	5g	10g
Agua destilada (presente en la solución de pectina)	50g	100g
Glicerina	20g	40g
Polvo de Cáscara de huevo	5,65g	10g
Total elaborado	250,65g	300g
Resultado		

Tabla 1. Composiciones y resultados Ensayo 1 y 2. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

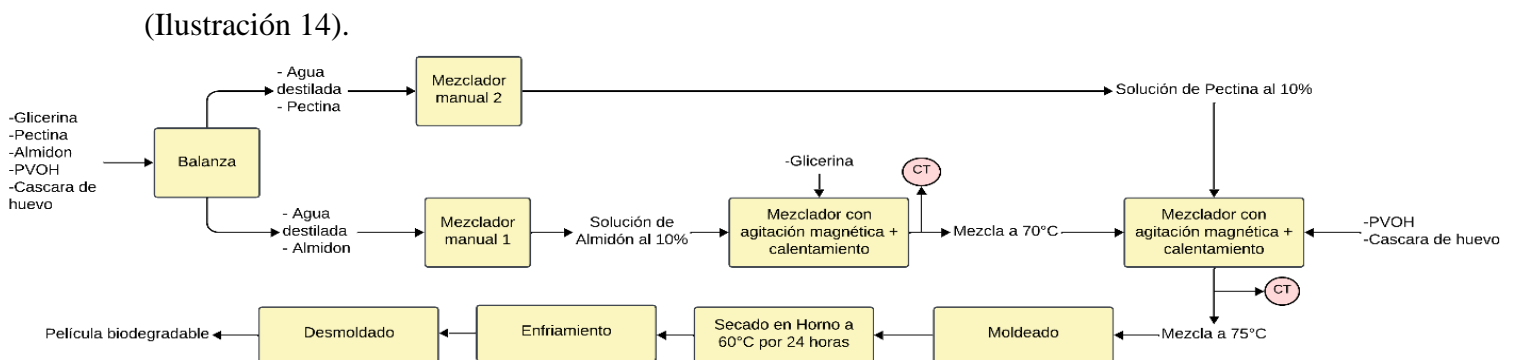
Como se pudo denotar el primer ensayo presentó una textura pastosa de carácter polvoriento junto a unas pequeñas manchas de color café oscuro, esto pudo ser debido a un exceso de almidón en la fórmula y la presencia de algunos gránulos de pectina sin diluir. Por otro lado, el segundo prototipo presentó una mejora considerable en su textura, debido al incremento de glicerina y pectina en su formulación; sin embargo, al igual que en el caso anterior persistió un exceso de fécula de plátano verde en su composición.

Tras las oportunidades de mejora identificadas en los ensayos previos, se optó por realizar una variación en la metodología, por lo que se incorporó un componente adicional, como

lo es el alcohol polivinílico (PVOH), ya que este permitió mejorar la resistencia a la tensión de la biopelícula y generó un efecto acoplante entre los compuestos como el almidón, la pectina, el glicerol y la cáscara de huevo, disminuyendo el riesgo de ruptura en la misma. Adicionalmente, se identificó que la mejor opción era generar una solución al 10% de almidón y una solución al 10% de Pectina ya que esto permitió que la matriz polimérica se homogenizara de mejor forma, evitando grumos.

Por otro lado, también se generaron variaciones importantes en cuanto al proceso ya que se optó por mezclar la solución de almidón y la glicerina previo a la operación de calentamiento, asimismo, se identificó que esto generó un aumento en el punto de gelatinización del almidón el cual oscila entre los 60°C y los 70°C (Falcão, L.d. S., et al., 2022), lo cual fue un factor a considerar ya que tras alcanzar los 70°C se incorporaron compuestos como Pectina, PVOH y cáscara de huevo con una agitación magnética constante.

Finalmente, con el fin de alcanzar una mezcla más homogénea y sin burbujas se suspendió la fuente de calor y con la energía restante se esperó hasta alcanzar una textura de carácter viscoso no muy espeso, la cual se dió a una temperatura de 75°C. Es importante destacar que el procedimiento específico se encuentra a continuación en el diagrama de proceso (Ilustración 14).



Punto de Control de Temperatura

Ilustración 14. Diagrama de proceso metodología modificada. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en diferentes ensayos (Tabla 2, 3, 4), los cuales fueron desarrollados de acuerdo con el procedimiento plasmado en la ilustración 14, cabe destacar que el factor diferencial en cada uno de los ensayos se centra en la composición en peso del PVOH, glicerina o cáscara de huevo empleada, puesto que estos fueron variando de un procedimiento a otro.

- **Tabla 2. Composiciones y resultados Ensayo 3 y 4**



Componentes	Composición en peso	
	Ensayo 3	Ensayo 4
Solución de Almidón de plátano verde al 10%	60g	60g
Solución de Pectina al 10%	20g	20g
Glicerina	50g	50g
Polvo de Cáscara de huevo	10g	10g
PVOH	40g	20g
Total elaborado	180g	160g
Resultado		

Tabla 2. Composiciones y resultados Ensayo 3 y 4. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

- **Tabla 3. Composiciones y resultados Ensayo 5 y 6**

Componentes	Composición en peso	
	Ensayo 5	Ensayo 6
Solución de Almidón de plátano verde al 10%	60g	60g
Solución de Pectina al 10%	20g	20g
Glicerina	50g	50g
Polvo de Cáscara de huevo	10g	10g



PVOH	4g	6g
Total elaborado	144g	146g
Resultado		

Tabla 3. Resultados Ensayo 5 y 6. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

- **Tabla 4. Composiciones y resultados Ensayo 7 y 8**



Componentes	Composición en peso	
	Ensayo 7	Ensayo 8
Solución de Almidón de plátano verde al 10%	60g	60g
Solución de Pectina al 10%	20g	20g
Glicerina	40g	35g
Polvo de Cáscara de huevo	14g	20g
PVOH	6g	6g
Total, elaborado	140g	141g
Resultado		

Tabla 4. Resultados Ensayo 7 y 8. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

- **Tabla 5. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 5.**

Ensayo 5	Longitud Inicial	Longitud Final	Porcentaje de alargamiento a la rotura
Muestra	5cm	5,1cm	2%

Tabla 5. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

- **Tabla 6. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 5.**



Ensayo 5	H ₂ SO ₄	NaOH
Muestra		

Tabla 6. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

- **Tabla 7. Resultados prueba de biodegradabilidad, ensayo 5.**





Ensayo 5	Tierra		Agua	
	Densidad Antes	Densidad Después de 7 días	Densidad Antes	Densidad Después de 7 días
	0,79g/cm ³	3,72g/cm ³	0,79g/cm ³	1,51g/cm ³
Muestra				

Tabla 7. Resultados prueba biodegradabilidad, ensayo 5. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

- **Tabla 8. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 6.**

Ensayo 6	Longitud Inicial	Longitud Final	Porcentaje de alargamiento a la rotura
Muestra	7cm	7,3cm	4,2%

Tabla 8. Resultados prueba de caracterización (Alargamiento a la rotura), ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

- **Tabla 9. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 6.**



Ensayo 6	H ₂ SO ₄	NaOH
Muestra		

Tabla 9. Resultados prueba de ataque químico, ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

- **Tabla 10. Resultados prueba de biodegradabilidad, ensayo 6.**





	Tierra		Agua	
Ensayo 6	Densidad Antes	Densidad Después de 7 días	Densidad Antes	Densidad Después de 7 días
	4,67g/cm ³	3g/cm ³	4,59g/cm ³	2,53g/cm ³
Muestra				

Tabla 10. Resultados prueba biodegradabilidad, ensayo 6. Tomado de (Elaboración propia, 2024)

11. DISCUSIÓN

Ensayo 1

Teniendo en cuenta los porcentajes en peso utilizados para el ensayo 1, el almidón de plátano verde representó el 23,94% del total del material elaborado, lo cual indica que estaba presente en una proporción significativamente alta. Esto ocasionó una rigidez excesiva en la película, afectando de este modo su flexibilidad y estructura.

Además, el glicerol que actuaba como plastificante estaba presente en la mezcla en un 7,98%, la pectina en un 1,99%, la cáscara de huevo en un 2,25% y el agua destilada en un 43,89% del total de esta.

Al analizar estos datos es evidente que la gelatinización del producto final se vio impedida por una desproporción significativa del almidón de plátano verde en relación con los otros componentes, esto causó efectos neutralizantes sobre los demás elementos en la formulación afectando de esta manera las propiedades mecánicas y físicas del discutido ensayo.

Ensayo 2

Tomando a consideración que se emplearon porcentajes en peso como 13,3% de almidón de plátano verde, 66,6% de agua destilada, 3,3% de Pectina, 13,3% de Glicerina y 3,3% de Polvo de cáscara de huevo y realizando un análisis comparativo con los rangos de composición presentados en el apartado 7.2.4, se evidenció una variación notable.

De ello se identificó que en el prototipo realizado el mayor porcentaje en peso corresponde al agua destilada, seguido del almidón y la glicerina; quienes se encargan de solubilizar los componentes en la película, componer la base central de la matriz polimérica y general el efecto plastificante (Enríquez, M., et al., 2012).

Lo cual si se analiza detalladamente presenta una amplia relación con el resultado

obtenido, ya que, en este caso en particular se evidenció una película mucho más elástica a comparación del primer ensayo debido al aumento del glicerol como agente plastificante. Asimismo, se percibió que la matriz polimérica presentó una mejoría en su textura y aspecto general, lo cual podría deberse a la cantidad de agua empleada en la solubilización de los compuestos y la disminución del porcentaje de almidón en la formulación.

Ensayo 3

En este ensayo, hubo una serie de ajustes en las cantidades de ciertos componentes, además de la introducción del PVOH mencionado anteriormente. El primero de estos cambios, fue el aumento de concentración en de la solución de pectina, donde en ensayos previos, esta rondaba entre el 4% y el 5%, en este caso se decidió aumentar la concentración de la solución al 10%, siendo esta solución el 11,11% del total del producto final.

También, hubo un aumentó en la cantidad de glicerina, la cual anteriormente era aproximadamente el 8% de la mezcla, de tal forma que representó el un 27,77% del producto final. En adición a ello, se incrementó la cantidad de la cascara de huevo triturada, de tal forma que representa el 5,55% del total elaborado. Finalmente, se introdujo el reactivo PVOH siendo este el 22,22% del total, el cual entró en el rango que se propuso en la teoría siendo este entre 10% y 40%. (Enríquez, M., et al., 2012).

El resultado de este ensayo, presentó un exceso de líquido que se sospecha que es PVOH, mostrando que la hubo una partición de este dentro de la mezcla, por lo cual se realizó un ajuste en la cantidad PVOH presente en la misma. En cuanto a sus características físicas, presentó una textura pegajosa y resbalosa al tacto (debido al exceso de PVOH descrito previamente); sin embargo, después de una semana de reposo y de secado al ambiente, la característica pegajosa de esta continuó, pero se percibió elástica y gelatinosa, mostrando que la composición del producto

final está cerca de alcanzar las características deseadas.

Ensayo 4

La composición de este ensayo fue prácticamente la misma, lo único que se hizo diferente fue la reducción de la cantidad de PVOH en la mezcla, pasando de ser el 22,22% de la mezcla al 12,5%. Esto se hizo para disminuir el fenómeno observado en el ensayo anterior, en donde el producto presentaba un desplazamiento del PVOH. Sin embargo, previo al secado de la muestra, se observó que la muestra aun presentaba el exceso del polímero mencionado anteriormente. Aun así, se decidió poner la muestra al horno, para poder evaluar el rendimiento de esta composición.

El resultado de este ensayo presento una textura más irregular comparada a la anterior. La consistencia de esta era menos elástica siendo más complicada de desmoldar, incluso rompiéndose un poco al hacer esto. Su consistencia era más frágil, la aplicación de una fuerza de estiramiento hizo que esta se fragmentara muy fácilmente. Esto demostró que el PVOH no se está acoplado del todo con la mezcla, debido al exceso del polímero. Por lo que, se consideró necesaria la reducción de la cantidad del PVOH dentro de la mezcla.

Ensayo 5

Durante este ensayo se realizó una disminución de la composición del PVOH en la matriz polimérica, de tal forma que este representara el 2,7% del total de la composición (144g), lo cual es notablemente menor al rango de composición expuesto en la teoría el cual oscila entre el 10% y el 40%, (Enríquez, M., et al., 2012) es importante destacar que se tomó esta decisión debido a que en ensayos anteriores la película biodegradable tras presentar un tiempo de asentamiento de 5 minutos empezó a expulsar el exceso de PVOH, lo cual generaba una textura poco agradable al tacto y difícil de manejar.

En este caso en particular se evidenció una mejoría en la textura de la biopelícula ya que

no presentó una textura pegajosa al tacto y permitió un desmoldado eficaz, en pro de ello mostró una apariencia brillante gracias al glicerol y gelatinosa elástica debido al PVOH y la pectina, e incluso, se denotó resistente gracias al polvo orgánico de cáscara de huevo.

Ensayo 6

Al analizar la muestra número 6, la formulación utilizada presentó una distribución en peso que dio como resultado una película con mejores propiedades mecánicas visibles en comparación con los primeros ensayos. La solución de almidón de plátano verde al 10% representó el 41,10% del total de la mezcla, lo cual proporcionó una matriz estructural sólida representada en su flexibilidad, resaltando que a pesar de su alta proporción no alcanzó una rigidez excesiva.

Esta respuesta se dio gracias a la composición del polivinil alcohol (PVOH) que estuvo presente en un 4,1% del total de la película (146g), ya que este al ser un polímero soluble en agua y con propiedades de barrera (BPF; 2024) generó una mayor cohesión entre los demás reactivos de la biopelícula creando interacciones más estables promoviendo una textura más uniforme a la misma.

La glicerina está presente en la mezcla en un 34,25% en donde actuó de manera eficaz como plastificante mitigando el posible efecto de rigidez proporcionado por el almidón. Las demás composiciones, incluyendo la de la glicerina se mantuvieron iguales con respecto al ensayo 5, siendo el único cambio el porcentaje en peso del PVOH que varió de 4 gramos a 6 gramos.

En general, al comparar los ensayos 5 y 6, se pudo denotar a primera vista que el ensayo 6 fue más difícil de desmoldar en relación con el 5, debido a que la muestra 6 presentó una mayor migración del plastificante, razón por la cual es recomendable trabajar con la formulación

de la muestra anterior, ya que implica un menor impacto ambiental con respecto al consolidado de todos los ensayos y además una menor cantidad de este reactivo no afectará la calidad del producto final.

Ensayo 7

Durante este ensayo se decidió ajustar la composición de la mezcla y, sumado a ello, se modificó la temperatura de secado, ya que esta cambió de 60 °C a 65 °C.

En este caso se redujo el porcentaje de glicerina en la composición de la biopelícula, debido a que las muestras anteriores presentaban un exceso de líquido, el cual, debido a su carácter un poco aceitoso y viscoso, se dedujo que correspondía a glicerina, cuya composición la matriz polimérica varió del 34,25 % al 28,57 %.

Esto permitió que la mezcla fuese más concisa y fácil de manipular, evitando que la glicerina desfase a otras sustancias presentes en el producto final. Asimismo, la reducción de este componente probó ser necesaria, ya que se obtuvo un resultado más consistente y adecuado a características más afines a plásticos convencionales.

Paralelamente, para compensar y producir la misma cantidad de producto, se decidió aumentar ligeramente la cantidad de cáscara de huevo, al ser un material inocuo en la reacción.

Finalmente, en cuanto a características físicas, se evidenció que la textura fue menos gelatinosa comparada con ensayos anteriores; sin embargo, no perdió su característica elástica e incluso mejoró un poco el alargamiento a la rotura tras aplicar una fuerza al material. Y como era de esperar, después del secado la película no presentó ningún exceso líquido.

Ensayo 8

El ensayo 8 se destacó por una composición de fórmula modificada que priorizó la resistencia mecánica y la cohesión firme y estructurada. En comparación con el ensayo 7, el

aumento del polvo de cáscara de huevo de 14 g a 20 g reforzó la resistencia y rigidez de la película. Paralelamente, la reducción de glicerina o glicerol de 40 g a 35 g sugirió un enfoque menos flexible, pero más estable, lo cual podría ser ideal para aplicaciones que requieran una mayor durabilidad o renuencia a deformaciones.

En contraste, esta muestra fue secada en el horno a 65 °C durante 24 horas en lugar de 60 °C como en los ensayos anteriores; este ajuste facilitó el desmolde, evitando la adhesión de la película a este, brindando una solución al problema persistente en las demás muestras. Cabe destacar que las concentraciones de almidón, pectina y PVOH se mantuvieron constantes, garantizando la estabilidad y uniformidad del material final. Adicionalmente, a nivel visual, el resultado fue una película homogénea, con una textura y color consistentes y adecuados, reflejando una mezcla e integración efectiva de los materiales.

Prueba de caracterización: Porcentaje de alargamiento a la rotura

Al momento de realizar las pruebas de caracterización del material se identificó que los diferentes prototipos presentaron un alargamiento a la rotura que osciló entre el 2 % y el 4,2 % en los ensayos 5 y 6 respectivamente (Tabla 5 y 8), lo cual nos permitió identificar que el material presenta una deformación a la tracción o una menor ductilidad (GS TECHNOLOGIES LTDA, 2024).

En contraste, se debe considerar que al ser una matriz polimérica de almidón esta presenta una mayor cristalinidad (Falcão, L.d. S., et al., 2022), e incluso, al presentar glicerina como plastificante y PVOH como adhesivo, sus características de elasticidad se ven alteradas.

Por ello, se podría considerar su aplicación en empaques de corta vida útil como lo son recubrimientos de frutas, jeringas, pitillos, diferentes empaques desechables y/o recubrimientos de semillas, ya que al estar compuesta por almidón tiene la capacidad de degradarse por

hidrólisis de tal forma que se ve ampliamente afectada en condiciones de humedad. (Falcão, L.d. S., et al., 2022).

Prueba de ataque químico

Para esta prueba, se decidió emplear un ácido fuerte y una base fuerte, siendo estos el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio respectivamente. Se tomó una pequeña muestra del producto final obtenido de los ensayos 5 y 6, las cuales fueron expuestas a aproximadamente dos gotas de cada reactivo.

Se tomó un periodo de prueba de tres minutos, permitiendo que la película reaccionara con las sustancias. Pasado este tiempo, se examinó la superficie y se evidenció un cambio en la coloración de las muestras. En ambos casos, hubo una decoloración en la parte expuesta, pasando de un color marrón oscuro a un blanco opaco. Sin embargo, al examinar la parte inferior de las muestras, no se evidenció ningún daño en la superficie.

Prueba de biodegradabilidad

Tras realizar la prueba de degradación de las muestras del ensayo 5 y 6 tanto en agua como en tierra, se evidenció una rápida descomposición, esto debido a las condiciones de humedad presentes en el suelo y en el agua, de tal forma que las películas biodegradables se deterioraron casi en su totalidad al cabo de siete días.

Específicamente, las muestras que fueron enterradas presentaron un aumento en su densidad debido a la aparición de una capa de moho en su superficie. En adición a ello, mostraron signos de disminución de su volumen y pérdida de humedad, de tal forma que el prototipo adquirió una apariencia similar a la de una hoja de papel, fragmentada en diferentes pedazos. La cual a su vez se mostró frágil y poco elástica.

Ahora bien, en el caso de las películas expuestas a condiciones de humedad, se evidenció

un aumento en su densidad debido a la absorción del agua del medio, lo cual generó una apariencia más delicada en el prototipo, de tal forma que este perdía ductilidad al someterse a una fuerza externa, ya fuese manual o mecánica. Sumado a ello, se evidenció que la película biodegradable pasados siete días estaba en la capacidad de disolverse en agua tras mezclarla con un objeto externo.

12. ANÁLISIS DE COSTOS

Durante la elaboración de la película biodegradable se presentaron una serie de costos directos por materias primas y mano de obra, e incluso, costos fijos relacionados con infraestructura, los cuales están contemplados a continuación:

- **Tabla 11. Costo de las materias primas en la cantidad mínima vendida**

Materia Prima	Cantidad	Costo Unitario
Almidón de plátano verde	200g	\$3,650
Pectina	50g	\$8,000
PVOH	1000mL	\$15,000
Glicerol	500mL	\$19,000
Agua destilada	4000mL	\$21,000
Cáscara de huevo	200g	NA
Costo total		\$66,650

Tabla 11. Costo de las materias primas en la cantidad mínima vendida. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

Ahora bien, tomando a consideración que para la elaboración de la película biodegradable no se empleó en su totalidad la cantidad comprada, se presentan los costos relacionados con cada uno de los ensayos de biopelículas de acuerdo con las cantidades empleadas para las disoluciones y la matriz polimérica en general, cabe destacar que el costo del agua destilada y glicerol fue asumido por la Universidad EAN, sin embargo, se presenta el valor aproximado a continuación:

• **Tabla 12. Costo de las materias primas empleadas en cada ensayo**

		Cantidad					
#Ensayo	Almidón de plátano verde (g)	Agua destilada (mL)	Pectina (g)	PVOH (g)	Glicerina (g)	Cáscara de huevo (g)	
1	60	160	5	NA	20	5,65	
2	40	200	10	NA	40	10	
3	20	300	10	40	50	10	
4	20	300	10	20	50	10	
5	20	300	10	4	50	10	
6	20	300	10	6	50	10	
7	20	300	10	6	40	14	
#Ensayo	Costo de cada componente en cada uno de los ensayos (\$)						Costo Total Ensayo
1	\$1,095	\$840	\$800	NA	\$760	NA	\$3,495
2	\$730	\$1,050	\$1,600	NA	\$1,520	NA	\$4,900
3	\$365	\$1,575	\$1,600	\$600	\$1,900	NA	\$6,040
4	\$365	\$1,575	\$1,600	\$300	\$1,900	NA	\$5,740
5	\$365	\$1,575	\$1,600	\$60	\$1,900	NA	\$5,500
6	\$365	\$1,575	\$1,600	\$90	\$1,900	NA	\$5,530
7	\$365	\$1,575	\$3,200	\$90	\$1,520	NA	\$6,750
8	\$365	\$1,575	\$3,200	\$90	\$1,330	NA	\$6,560
Costo total por los ocho ensayos							\$44,515

Tabla 12. Costo de las materias primas empleadas en cada ensayo. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

Como se puede evidenciar tras realizar 8 ensayos de prototipos se generó un costo de \$44,515COP relacionados con materias primas, lo cual nos permite considerar que es un proyecto económicamente viable pues no implica costos base exorbitantes.

Adicionalmente, se debe considerar el costo de mano de obra de los ingenieros encargados, en este caso en particular el valor que se muestra a continuación corresponde al costo tentativo por ensayo realizado.

- **Tabla 13. Costo de la mano de obra por ensayo realizado**

Cantidad de ingenieros	Costo por hora trabajada	Cantidad de horas trabajadas	Total
Ingeniero 1	\$50.000	2	\$100.000
Ingeniero 2	\$50.000	2	\$100.000
Ingeniero 3	\$50.000	2	\$100.000
Costo total de mano de obra por ensayo realizado			\$300.000

Tabla 13. Costo de la mano de obra por ensayo realizado. Tomado de (Elaboración propia., 2024)

De la tabla 13 se puede evidenciar que por cada ensayo realizado se presentó un costo de mano de obra total de \$300,000COP, es decir, al culminar los ocho ensayos en el laboratorio se generó un costo de mano de obra de aproximadamente \$2,400,000COP.

Finalmente, se debe considerar el costo por infraestructura relacionado con los laboratorios y los equipos que estos contienen, cuyo valor corresponde a \$690,000 pesos por cada dos horas trabajadas en cada uno de los ensayos, lo cual asciende a un precio de \$5,520,000COP por la prestación de las instalaciones para los ocho ensayos realizados. Sin embargo, en este caso en particular el coste fue asumido por la Universidad EAN.

13. CONCLUSIONES

Considerando la latente problemática relacionada con los plásticos de un solo uso en Colombia y la crisis medioambiental que se ha exacerbado debido al exceso y falta de regulación de estos, se tomó la decisión de encaminar una investigación enfocada en elaborar una matriz polimérica como una alternativa sostenible a este planteamiento, la cual busca brindar un enfoque diferencial y sostenible que incorpore desechos orgánicos como la cáscara de huevo e incluso fuentes de almidón poco usuales como el plátano verde, que ha demostrado ser una excelente materia prima para fabricar películas plásticas biodegradables.

Entre sus principales beneficios están su resistencia al calor, su capacidad de biodegradarse de manera más rápida que los plásticos convencionales y su disponibilidad en grandes cantidades a bajo costo.

Este uso del almidón también contribuye a la reducción de la contaminación plástica y promueve el aprovechamiento de recursos naturales no explotados, lo que ofrece un camino hacia soluciones más sostenibles para diversas industrias. Adicionalmente, se ha observado que el almidón, cuando se mezcla con PVOH, presenta una gran compatibilidad al momento de formarse la película plástica, mostrando un gran potencial para el uso de compostaje, ya que estas se degradan y son absorbidas fácilmente por el suelo.

Ahora bien, una vez desarrollado el prototipo de biopelícula, se evidenció que esta tiene la capacidad de degradarse de forma satisfactoria en agua, degradándose completamente al momento de entrar en contacto con la misma. Adicionalmente, se percibió que tiene la capacidad de resistir dos semanas sin degradarse a condiciones ambiente conservando su textura.

Con base en las pruebas de caracterización realizadas, se denotó que el material presenta propiedades limitadas de elasticidad, con un alargamiento de rotura del 2% al 4,2%, indicando

una ductilidad baja. Sin embargo, la rápida biodegradabilidad, tanto en el suelo como en el agua, lo posiciona como un material de uso conveniente para aplicaciones de corta vida útil, aspecto que impacta positivamente en la sostenibilidad y los recursos medioambientales en el país.

Contrastando, los resultados permitieron confirmar que la formulación empleada en la película es coherente con la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos convencionales de un solo uso, ya que se aprovechan materias primas biodegradables que se descomponen de forma eficiente en un aproximado de siete días a comparación de otros plásticos cuyo tiempo de degradación asciende a cuatrocientos cincuenta años. De tal forma que estas características refuerzan el potencial del producto final como solución innovadora dentro del modelo sostenible y de economía circular en Colombia.

Finalmente, es importante mencionar que con fines investigativos los resultados de los ensayos 5 y 6 fueron presentados en un póster, el cual participó en el evento digital global ACIQXIQ24 en la categoría Ingeniería Química bajo el ID Ing31.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboelazm, A. A., Awan, Z. A., El-Dash, H. A., El-Ganiny, A. M., Yahya, G. & Yousef, N. E. (2023). Optimizing Eco-Friendly Degradation of Polyvinyl Chloride (PVC) Plastic Using Environmental Strains of *Malassezia* Species and *Aspergillus fumigatus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20), 15452. Tomado de <https://doi.org/10.3390/ijms242015452>
- Acharjee, S. A., Bharali, P., Gogoi, B., Sorhie, V., Walling, B., & Alemtoshi. (2023). PHA-Based Bioplastic: A Potential Alternative to Address Microplastic Pollution. *Water, Air & Soil Pollution*, 234(1), 1–31. Tomado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-022-06029-2>
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of Different Types of Bioplastics through Composting—A Recent Trend in Green Recycling. *Catalysts* (2073-4344), 13(2), 294. Tomado de <https://doi.org/10.3390/catal13020294>
- Ahmad, A., Banat, F., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2024). An overview of biodegradable poly (lactic acid) production from fermentative lactic acid for biomedical and bioplastic applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(3), 3057-3076. Tomado de <https://link-springer-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/article/10.1007/s13399-022-02581-3>
- Ahmad, I., Fatima, S., Khan, M. R. & Sadiq, M. B. (2024). Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review. *Heliyon*. Tomado de <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1016/j.heliyon.2024.e27453>
- Almeida, M. F., Oliveira, N. L., Resende, J. V., Ribeiro, J. S., Souza, C. C. E., Veloso, C. M & Viana, E. B. M. (2022). Development of starch-based bioplastics of green plantain banana

(*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100776. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>

- Arcila Pulgarín, M. I., Aranzazu Hernández, L. F., Castrillón Arias, C., Valencia Montoya, J. A., Bolaños Benavides, M. M., & Castellanos Castellanos, P. A. (2002). El cultivo del plátano. Tomado de
- Arotoma Chujutalli, L.F. y Pacahuala Jines, M.F. (2020). Revisión bibliográfica de la elaboración de bioplástico a partir de residuos de origen animal y vegetal. Repositorio Digital Institucional. Universidad Cesar Vallejo. Tomado de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/67209>
- Behera, S., Das, S., Priyadarshane, M. (2022). Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications. *Chemosphere*, 294, 133723. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133723>
- Beltrán Villavicencio, M., Espinosa Valdemar, R.M., Vázquez Morillas, A. & Velasco Pérez, M. (2021). Bioplásticos y plásticos degradables. ANIPAC. Universidad Autónoma Metropolitana. Tomado de [bioplasticos.pdf \(anipac.org.mx\)](https://www.anipac.org.mx/bioplasticos.pdf)
- Butt, M. T. Z., Gull, N., Khan, R. U., & Khan, S. M. (2022). Polyvinylchloride (PVC): Structure and properties relationship. *Polyvinylchloride-based Blends: Preparation, Characterization and Applications*, 19-47. Tomado de https://doi.org/10.1007/978-3-030-78455-3_2
- Boey, J. Y., Lee, C. K., & Tay, G. S. (2022). Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review. *Polymers*, 14(18), 3737. <https://doi.org/10.3390/polym14183737>
- Bowyer, M., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Singh, S. P., Thakur, R., & Vuong, Q. V. (2019).

Starch-based films: Major factors affecting their properties. International journal of biological macromolecules, 132, 1079-1089. Tomado de <https://linkinghub-elsevier.com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/retrieve/pii/S0141813019310487>

- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2023, 20 de marzo). polyvinyl alcohol. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/polyvinyl-alcohol>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 6 de agosto). high-density polyethylene. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/high-density-polyethylene>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 16 de agosto). polyethylene terephthalate. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (2024, 29 de julio). Polypropylene. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/polypropylene>.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 19 de julio). Polystyrene. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/polystyrene>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 26 de julio). starch". Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/starch>.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 13 de agosto). Plastic. Britannica Academic. Tomado de <https://academic-eb-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/levels/collegiate/article/plastic/108561>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 16 de agosto). glycerol. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/glycerol>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 27 de agosto). PVC. Enciclopedia Británica.

Tomado de: <https://www.britannica.com/science/polyvinyl-chloride>

- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, 27 de agosto). Pectin. Encyclopedia Britannica. Tomado de <https://www.britannica.com/science/pectin>
- British Plastics Federation. (2024). Polyvinyl Alcohol (PVOH). BPF. Tomado de <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/polyvinyl-alcohol-pvoh.aspx>
- Censi, V., Saiano, F., Bongiorno, D., Indelicato, S., Napoli, A., & Piazzese, D. (2022). Bioplastics: A new analytical challenge. *Frontiers in Chemistry*, 10, 971792. Tomado de <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.971792/full>
- Cromtek. (2024). Balanza Analítica: Así funciona en el laboratorio. Cromtek. Tomado de <https://www.cromtek.cl/2021/05/12/balanza-analitica-asi-funciona-en-el-laboratorio/>
- Das, A., Gadekar, P.T., Gadhave, R.V. & Mahanwar, P.A. (2018). Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 8, 21-33. Tomado de <https://doi.org/10.4236/ojpchem.2018.82003>
- Dave, G., Larsson, Å. & Lithner, D. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the total environment*, 409(18), 3309-3324. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
- Dhakal, H. N., Oladijo, O. P., Phiri, R., Rangappa, S. M. & Siengchin, S. (2023). Development of sustainable biopolymer-based composites for lightweight applications from agricultural waste biomass: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. Tomado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504823000337?via%3Dihub>
- EuroPlas. (2024). How much does biodegradable plastic cost? EuroPlas. Tomado de

<https://europلاس.com.vn/en-US/blog-1/how-much-does-biodegradable-plastic-cost#:~:text=Currently%20the%20price%20of%20biodegradable,which%20require%20higher%20production%20costs.>

- Encyclopædia Britannica. (2024). Major industrial polymers. Britannica Academic. Tomado de <https://academic-eb-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/levels/collegiate/article/major-industrial-polymers/117700>
- Enríquez, M., Velasco, R., & Ortiz, V. (2012). Películas Biodegradables Basadas En Almidón. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 182-192. Tomado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000100021&lng=en&tlng=es.
- Espinel, F. (2022, 26 de mayo). Cuál es la función del horno de laboratorio. Intekgroup. Tomado de <https://intekgroup.com.co/horno-de-laboratorio-funcion/#:~:text=Un%20horno%20de%20laboratorio%20es,fundir%20muestras%20entre%20otras%20aplicaciones.>
- Falcão, L.d. S., Coelho, D.B., Veggi, P.C., Campelo, P.H., Albuquerque, P.M. & Moraes, M.A. (2022). El almidón como matriz para la incorporación y liberación de compuestos bioactivos: fundamentos y aplicaciones. *Polímeros*, 14 (12), 2361. Tomado de <https://doi.org/10.3390/polym14122361>
- Fauza, A. N., Mardiyati, Y., Santosa, S. P., Shoimah, S. M & Steven, S. (2022). Facile Preparation of Cellulose Bioplastic from *Cladophora* sp. Algae via Hydrogel Method. *Polymers* (20734360), 14(21), 4699. Tomado de <https://doi.org/10.3390/polym14214699>
- Federación Nacional de Avicultores de Colombia. (2024). Consumo per cápita-Nacional.

FENAVI. Tomado de <https://fenavi.org/estadisticas/consumo-per-capita-nacional-p/>

- Fisher, J. P., Gillen, G., Lerman, M. J., Lembong, J. & Muramoto, S. (2018). The evolution of polystyrene as a cell culture material. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 24(5) 359-372. Tomado de <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2018.0056>
- Fondo Mundial para la Naturaleza. (2022, 08 de junio). Contaminación por plásticos: el eterno problema de los océanos. WWF. Tomado de <https://www.wwf.org.co/?375810/Que-tan-grave-es-la-contaminacion-por-plasticos>
- Fridovich-Keil, J. L. (2024,15 de abril). bioplastic. *Encyclopedia Britannica*. Tomado de <https://www.britannica.com/technology/bioplastic>
- Fundación AQUAE. (2021, 17 de mayo). Clasificación de tipos de plásticos y su reciclaje. AQUAE. Tomado de https://www.fundacionaquae.org/wiki/tipos-de-plasticos/#7_tipos_de_plasticos
- Fundación Integralia DKV. (2024, 29 de abril). Tipos de plásticos: Clasificación y reciclaje. DKV. Tomado de <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>
- Gadhav, R. V., Das, A., Mahanwar, P. A., & Gadekar, P. T. (2018). Starch based bioplastics: the future of sustainable packaging. Tomado de <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=84926>
- González, V y Patricia, M. (2020). Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática. *Revista colombiana de ciencia animal recia*, 12(2), 106-116. Tomado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-42972020000200106#:~:text=Su%20alto%20contenido%20en%20carbonato,materia%20pri

ma%20%C3%BAnica%20y%20polifuncional.

- Greenpeace Colombia y MASP. (2019, noviembre 14). Situación Actual De Los Plásticos En Colombia Y Su Impacto En El Medio Ambiente. Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública (MASP) de la Facultad de Derecho de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia. Documento pdf. Tomado de https://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf
- GS TECHNOLOGIES LTDA. (2024). Alargamiento de rotura A. Zwick/Roell. Tomado de <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/alargamiento-de-rotura/>
- Hassanisaadi, M., Riseh, R. S., Thakur, V. K. & Vazvani, M. G. (2024). Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. Industrial Crops and Products, 208, 117904. Tomado de <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1016/j.indcrop.2023.117904>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2024). Certificación de producto, procesos y servicios. ICONTEC. Tomado de <https://www.icontec.org/certificacion-de-producto/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2024). MATERIALES TERMOPLÁSTICOS. ICONTEC. Tomado de https://tienda.icontec.org/sectores/industrias-del-caucho-y-del-plastico/plasticos/materiales-termoplasticos.html?products_format=5705
- Instituto Tecnológico del Plástico. (2019, 15 de marzo). Clasificación e identificación de materiales plásticos. AIMPLAS. Tomado de <https://www.aimplas.es/blog/clasificacion-e-identificacion-de-materiales-plasticos/>
- Kalstein France. (2024). ¿Qué es una plancha de calentamiento? Kalstein. Tomado de <https://kalstein.co/que-es-una-plancha-de-calentamiento/#>

- Liu, G., Song, Y., Wang, J., Zhuang, H., Ma, L., Li, C., ... & Zhang, J. (2014). Effects of nanoclay type on the physical and antimicrobial properties of PVOH-based nanocomposite films. *LWT-Food Science and Technology*, 57(2), 562-568. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.009>
- Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *Am. J. Polym. Sci*, 6(1), 1-11. Tomado de doi: 10.5923/j.ajps.20160601.01
- MaTex SA. (2024). Tamices de Laboratorio. MaTex. Tomado de <https://matexsa.com.mx/tamices/#:~:text=Los%20tamices%20para%20pruebas%20de,es%20para%20pruebas%20de%20granulometr%C3%ADa.>
- Mendez, A. (2023, 13 de octubre). Ácido poliláctico (PLA): obtención, aplicaciones y propiedades. *Plastics Technology Mexico*. Tomado de [https://www.pt-mexico.com/articulos/acido-polilactico-\(pla\)-obtencion-aplicaciones-y-propiedades](https://www.pt-mexico.com/articulos/acido-polilactico-(pla)-obtencion-aplicaciones-y-propiedades)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 30 de noviembre). Decreto Numero 1630 de 2021. Tomado de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Decreto-1630-de-2021.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024, 02 de julio). Minambiente establece medidas para la reducción gradual de plásticos de un solo uso en Colombia. Min Ambiente. Tomado de <https://www.minambiente.gov.co/minambiente-establece-medidas-para-la-reduccion-gradual-de-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia/>
- Nigam, S., Das, A. K., Matkawala, F., & Patidar, M. K. (2022). An insight overview of bioplastics produced from cellulose extracted from plant material, its applications and degradation. *Environmental Sustainability*, 5(4), 423-441. Tomado de <https://link-springer-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/article/10.1007/s42398-022-00248-3#Fig2>

- OECD. (2024). Plastics. OECD. Tomado de <https://www.oecd.org/en/topics/plastics.html>
- Omega. (2024). Medidor de pH. Omega. Tomado de <https://es.omega.com/prodinfo/medidor-ph.html>
- Paredes Vega, R.A. (2020). Propuesta de elaboración de bioplástico en base a almidón de yuca para vasos descartables. Repositorio Digital Institucional. Universidad Continental. Tomado de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12438/2/IV_FIN_108_TI_Paredes_Vega_2020.pdf
- Plastic Action Centre. (2023, 18 de octubre). El plástico en cifras. Plastic Action Centre. Tomado de <https://plasticactioncentre.ca/directory/plastic-by-the-numbers/>
- Precisur. (2024). ¿Para qué sirve una balanza analítica? Precisur. Tomado de https://balanzasprecisur.com/para-que-sirve-una-balanza-analitica/?srsltid=AfmBOorR8EnNXXdT6hVXTvtStadpzGw_aMvEb1V7H9AT83Mo1T_IEv9u
- Rajaram, B., Onepe, M., & Ulrich, M. (2022, 23 de mayo). Material Analysis for Bioplastics Quality Assurance and Degradation. TA instruments. Tomado de <https://www.tainstruments.com/material-analysis-for-bioplastics-quality-assurance-and-degradation/>
- Rivera Quiña, Y.D y Vilchez Orellana, V.A. (2020). Revisión sistemática: análisis de las propiedades de los bioplásticos a base de almidón. Repositorio Digital Institucional. Universidad César Vallejo. Tomado de [Rivera_QYD-Vilchez_OVA-SD.pdf \(ucv.edu.pe\)](#)
- Rodriguez A. (2019, 19 de marzo). La cáscara de huevo: estructura, formación & qué factores afectan a su calidad. aviNews. Tomado de <https://avinews.com/la-cascara-de-huevo->

estructura-formacion-que-factores-afectan-a-su-calidad/

- Rojas; T. (2023, 18 de agosto). Todo el sobre el polietileno de alta densidad (HDPE): Usos, ventajas y mercado actual. Tecnología del Plástico. Tomado de:
<https://www.plastico.com/es/noticias/todo-sobre-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-usos-ventajas-y-mercado-actual>
- Ruiz Galeano, C. (2022). Obtención de bioplástico a partir de la extracción de almidón de los residuos de papa Capiro. Fundación Universidad de América. Tomado de
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9059/4/6171130-2022-2-IQ.pdf>
- Sparkconcept. (2024). Bioplastic Vs. Plastic Price: What're the Factors to Affect Their Cost? Sparkconcept. Tomado de <https://sparkconcept.com/bioplastic-vs-plastic-price-whatre-the-factors-to-affect-their-cost/>
- Sravya, G. C., Gautam, S., Kumar, K. U., Poonguzhali, R. S., & Manuel, R. I. (2024). Assessing LDPE Microplastics' Impact on Green Gram (*Vigna radiata* L. Wilczek) Cultivation: A Greenhouse Pot Experiment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. Tomado de: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103710>
- Servei Estació. (2024). ¿Qué es el PET? Características, usos y aplicaciones. Servei Estació. Tomado de <https://serveiestacio.com/blog/que-es-el-pet/?srsltid=AfmBOookw9reK7z-UWso9SiBlzoQ8qBcAMJrA46jWeT6yipnt29PPOOY>
- The Essential Chemical Industry. (2017, 27 de abril). Poly(ethene) (Polyethylene). Tomado de <https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>
- Universidad de los Andes. (2019, 19 de noviembre). Casi el 60 % de la basura diaria de Bogotá es desecho plástico. Consultorio Jurídico y Clínicas Jurídicas. Tomado de <https://derecho.uniandes.edu.co/informe-situacion-actual-de-los-plasticos-en->

