

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Elaboración de un material biobasado a partir de almidón de frijol negro
(*Phaseolus vulgaris L.*) para evaluar su potencial de aplicación en la
industria

Trabajo de graduación presentado por Catherine Samantha Paxtor Avelar para
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Biotecnología
Industrial

Guatemala

2026

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Elaboración de un material biobasado a partir de almidón de frijol negro
(Phaseolus vulgaris L.) para evaluar su potencial de aplicación en la
industria

Trabajo de graduación presentado por Catherine Samantha Paxtor Avelar para
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Biotecnología
Industrial

Guatemala

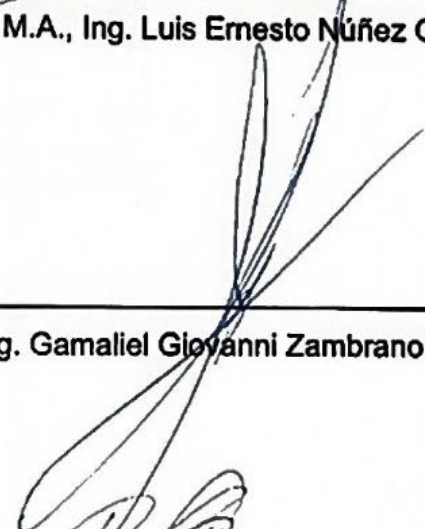
2026

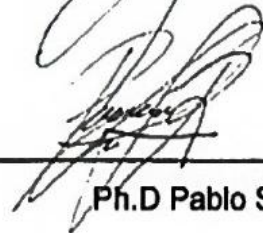
Vo. Bo. :

(f) 
M. Sc., M.A., Ing. Luis Ernesto Núñez González

Tribunal examinador

(f) 
M. Sc., M.A., Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f) 
Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ph.D Pablo Silva

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de enero de 2026

PREFACIO

Agradezco a Dios por darme toda la paciencia, sabiduría, apoyo, comprensión y amor para conseguir mis sueños. Sin ti este proyecto de mi vida no hubiese sido posible.

Agradezco profundamente a mi padre y tía, Estuardo Paxtor y Selma Paxtor, por todo su amor y apoyo que han brindado incondicionalmente, por instruirme y dejarme seguir mis sueños. Siempre serán mi mayor inspiración y motivación. De la misma manera mis hermanos, Andrés Paxtor y Mateo Paxtor, por estar para mí e inspirarme a ser cada día mejor.

Agradezco a mis abuelos, Mateo Paxtor y Catarina Mazariegos, que me vieron crecer y cumplir mis sueños. A pesar de que ya no estés aquí abuela, este trabajo está dedicado a ti.

Agradezco a mis amigos Leonela Oliveros, Melissa Álvarez, Karla Díaz, Andrea Arreaga, Ana Laura Leal, Luis Fernando Samayoa, Virginia López y Daniel Ramírez, por todos los momentos compartidos, aventuras, risas, alegrías y tristezas. Se han convertido en mi familia.

Agradezco profundamente a mi novio, Cristian Arriola, por su constante apoyo, paciencia y guía a lo largo de esta trayectoria. Su comprensión, aliento y compañía fueron fundamentales para mantenerme firme incluso en los momentos más difíciles.

Agradezco a mi asesor, Ing. Luis Núñez, por su acompañamiento durante la realización del trabajo y por todo el conocimiento compartido para guiarme. Al igual que al director de la Facultad de Ingeniería Química, Ing. Gamaliel Zambrano, por todo su apoyo y orientación.

Este trabajo es el fruto de cinco años de esfuerzos, dedicación y muchos desafíos. A pesar de seguir mis sueños lejos de casa me siento agradecida de todo lo vivido durante este tiempo. Espero sea un pequeño aporte a la ciencia y desarrollo en el país.

ÍNDICE

Prefacio	v
Índice	vii
Lista de tablas	xi
Lista de figuras	xiv
Resumen	xvi
Abstract	xvii
1. Introducción	1
2. Objetivos	4
2.1.General	4
2.2.Específicos	4
3. Justificación	5
4. Marco teórico.....	7
4.1.Materiales biobasados	7
4.2.Polímero.....	8
4.3.Biopolímeros	9
4.3.1.Clasificación de los biopolímeros	10
4.3.2.Ventajas y desventajas de los biopolímeros	11
4.3.3.Mercado global de los biopolímeros	12
4.3.4.Sectores de aplicación de los bioplásticos	13
4.4. Almidón como materia prima de elaboración del material biobasado	16
4.5.Propiedades y composición del almidón	17

4.5.1.Pruebas de identificación y calidad	17
4.5.2.Caracterización fisicoquímica	18
4.5.2.1.Solubilidad del almidón	19
4.5.2.2.Poder de hinchamiento	19
4.5.2.3.Capacidad de absorción y retención de agua	20
4.5.2.4.Gelatinización	21
4.5.2.5.Retrogradación	22
4.5.3.Pruebas instrumentales estructurales	24
4.6. Agentes plastificantes	24
4.6.1.Agua destilada.....	25
4.6.2.Glicerina	25
4.7.Propiedades mecánicas.....	26
4.7.1.Módulo de Young	26
4.7.2.Elasticidad	27
4.7.3.Resistencia a la tracción.....	27
4.8.Frijol negro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) para la elaboración de biopolímeros.....	30
4.8.1.Composición nutricional del frijol negro	30
5. Antecedentes	33
5.1.Producción de bioplásticos	33
5.2.Resistencia mecánica de plásticos convencionales más utilizados en industrias.....	35
6. Metodología.....	37
6.1.Extracción de almidón del frijol negro	37
6.2.Análisis fisicoquímico para el almidón de frijol negro	38
6.2.1.Contenido de humedad	38

6.2.2.Determinación de la temperatura de gelatinización	39
6.2.3.Análisis de poder de hinchamiento (PH), índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) a 60°C.	40
6.3.Elaboración del material biobasado a base de almidón de frijol negro	42
6.4.Determinación de espesor de los materiales biobasados	43
6.5.Análisis del contenido de humedad en el bioplástico	44
6.6.Pruebas de tracción al material biobasado de almidón de frijol negro	44
6.7.Análisis estadísticos	46
7. Resultados	49
7.1.Resultados obtenidos de la extracción de almidón de frijol negro ...	49
7.2.Datos obtenidos de formulaciones para la elaboración del material biobasado	51
7.3.Evaluación cualitativa de los materiales biobasados obtenidos	52
7.4.Pruebas fisicoquímicas y mecánicas realizadas en el material biobasado a base de almidón de frijol negro.....	52
7.5.Análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las películas biobasadas en almidón de frijol negro.	54
8. Análisis de resultado	57
9. Conclusiones	67
10. Recomendaciones.....	68
11. Bibliografía	70
12. Anexo	75
12.1.Balances de masa y energía.....	75
12.2.Datos de placas	76

12.3.Datos originales	78
12.4.Muestra de cálculos	86
12.5.Datos calculados	88
12.6.Análisis de error	93
12.7.Documentación del proceso y equipos utilizados	95
13. Glosario	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Ventajas y desventajas de los biopolímeros	11
Tabla 2.	Composición nutricional de 100 g de frijol negro en granos secos.	31
Tabla 3.	Composición de carbohidratos de frijol negro	32
Tabla 4.	Rendimiento de almidón de frijol negro crudo (Phaseolus vulgaris L)	49
Tabla 5.	Contenido de humedad del almidón de frijol negro.....	49
Tabla 6.	Pruebas de solubilidad, poder de hinchamiento y absorción de agua en almidón de frijol negro (Phaseolus vulgaris L)	50
Tabla 7.	Temperatura de gelatinización de almidón extraído de frijol negro (Phaseolus vulgaris L.)	50
Tabla 8.	Formulaciones realizadas para la elaboración de biopelículas....	51
Tabla 9.	Resultados de análisis sensorial en las películas biobasadas..	52
Tabla 10.	Resultados de ensayos para la determinación de espesor del material biobasado	52
Tabla 11.	Determinación de contenido de humedad de los materiales biobasados	53
Tabla 12.	Resultados de pruebas de tracción por formulación de las películas biobasadas	54
Tabla 13.	Prueba t student para las formulaciones F1 y F2 sobre el contenido de humedad en las biopelículas.	54
Tabla 14.	Prueba t student para las formulaciones respecto al espesor de las biopelículas.	55

Tabla 15. Prueba t student en las formulaciones de acuerdo con el módulo de Young.....	56
Tabla 16. Datos de placa para balanza analítica	76
Tabla 17. Datos de plaza de balanza de humedad	77
Tabla 18. Datos de placa de centrifuga Eppendorf	77
Tabla 19. Datos de placa de incubadora	77
Tabla 20. Datos de frijol negro inicial y peso final de la extracción de almidón de frijol negro.....	78
Tabla 21. Datos originales de tubos Falcon para la realización de pruebas fisicoquímicas (IIA, ISA, PH) del almidón de frijol negro	78
Tabla 22. Datos originales para la realización de prueba de índice de absorción de agua en 10 mL de la solución de almidón.	79
Tabla 23. Cantidad de almidón utilizado para determinar la humedad del almidón de frijol negro.....	79
Tabla 24. Datos originales del almidón utilizado para preparar solución al 10% (m/v)	79
Tabla 25. Datos originales para la elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro	80
Tabla 26. Datos obtenidos del espesor de cada formulación del material biobasado	81
Tabla 27. Masa de las películas biobasadas utilizado para determinar el porcentaje de humedad	82
Tabla 28. Datos obtenidos de la formulación 1 (F1) del material biobasado para pruebas de tracción.....	83
Tabla 29. Datos obtenidos de la formulación 2 (F2) del material biobasado para pruebas de tracción.....	84
Tabla 30. Datos obtenidos de la formulación 3 (F3) del material biobasado para pruebas de tracción.....	85

Tabla 31.	Determinación del rendimiento de extracción de almidón a partir de frijol negro con pruebas estadísticas.....	88
Tabla 32.	Promedio y desviación estándar de contenido de humedad y temperatura de gelatinización.....	88
Tabla 33.	Datos calculados sobre las pruebas fisicoquímicas realizadas en el almidón de frijol negro extraído.....	89
Tabla 34.	Promedio y desviación estándar del espesor de la biopelícula por cada formulación realizado.....	89
Tabla 35.	Promedio y desviación estándar del porcentaje de humedad de la biopelícula por cada formulación	90
Tabla 36.	Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 1 (F1).....	90
Tabla 37.	Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 2 (F2).....	91
Tabla 38.	Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 3 (F3).....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa conceptual de materiales biobasados	8
Figura 2.	Clasificación de los biopolímeros según su origen y ejemplos de los polímeros más utilizados en la industria.....	10
Figura 3.	Producción global del mercado de bioplásticos	13
Figura 4.	Aplicaciones de los bioplásticos en distintos sectores y su producción global en miles de toneladas	15
Figura 5.	Estructura química de la amilosa y amilopectina.	17
Figura 6.	Gelatinización del almidón	22
Figura 7.	Interacción de polímeros y agentes plastificantes para la formación de matrices bioplásticas	23
Figura 8.	Curva típica esfuerzo-deformación de un plástico	28
Figura 9.	Pinzas y probeta tipo halterio para ensayos de tracción	28
Figura 10.	Variación de la velocidad en ensayos de muestras de PET a 220°C	29
Figura 11.	Balance de masa global del proceso de extracción de almidón de frijol negro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L).....	75
Figura 12.	Balance de masa global del proceso de elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro	76
Figura 13.	Diagrama de barras del módulo de Young en cada formulación de las biopelículas con su desviación estándar	93
Figura 14.	Extracción de almidón de frijol negro	95
Figura 15.	Sedimento y secado de almidón de frijol negro.....	96
Figura 16.	Pulverización de almidón de frijol negro.....	96

Figura 17. Prueba de Lugol realizado para la identificación de almidón en la extracción del frijol negro.	97
Figura 18. Pruebas fisicoquímicas del almidón de frijol negro	98
Figura 19. Elaboración de material biobasado a partir del almidón de frijol	99
Figura 20. Biopelícula obtenida a partir de almidón de frijol negro con una concentración de 1.0 g.....	100
Figura 21. Balanza analítica utilizada de la marca Ohaus.....	101
Figura 22. Incubadora de chaqueta de aire.....	101
Figura 23. Centrífuga Eppendorf de 5804 R	102

RESUMEN

El presente estudio tuvo como propósito evaluar la extracción del almidón de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) como materia prima para la elaboración de un material biobasado con potencial de aplicación en la industria. Se buscó determinar si este polisacárido posee las propiedades necesarias para generar materiales con resistencia comparable a los plásticos convencionales de baja carga mecánica. El almidón fue obtenido mediante el método de extracción húmeda, alcanzando un rendimiento del 13.48 %(m/m); si bien este valor es inferior al de fuentes como el garbanzo (30 % m/m). Las pruebas funcionales evidenciaron una solubilidad de 4.40 %(m/m), un poder de hinchamiento de 2.01 g/g y un índice de absorción de agua de 2.73 g/g, parámetros que se alinea con el comportamiento típico de almidones de leguminosas y su capacidad para formar matrices cohesivas. A partir de este material se elaboraron biopelículas con diferentes concentraciones de almidón y glicerina, cuyas propiedades fisicoquímicas y mecánicas fueron evaluadas. Los resultados mostraron que al incrementar la concentración de almidón disminuye la humedad y aumenta el espesor y la rigidez del material, alcanzando un módulo de Young de 29.4 MPa en la formulación con mayor contenido de almidón (1.75 g). Los valores obtenidos, aunque inferiores a los de polímeros sintéticos de alta resistencia, demuestran la posibilidad de obtener, a partir de fuentes biológicas, materiales con comportamiento mecánico estable, lo que constituye un avance hacia el desarrollo de formulaciones con propiedades ajustables para aplicaciones industriales específicas.

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the extraction of black bean starch (*Phaseolus vulgaris* L.) as a raw material for the production of a bio-based material with potential industrial applications. The aim was to determine whether this polysaccharide has the necessary properties to produce materials with strength comparable to conventional plastics with low mechanical load. The starch was obtained using the wet extraction method, achieving a yield of 13.48 % (m/m); although this value is lower than that of sources such as chickpeas (30% m/m). Functional tests showed a solubility of 4.40 % (m/m), a swelling power of 2.01 g/g, and a water absorption index of 2.73 g/g, parameters that are in line with the typical behavior of legume starches and their ability to form cohesive matrices. Biomaterials were produced from this material with different concentrations of starch and glycerin, and their physicochemical and mechanical properties were evaluated. The results showed that increasing the starch concentration decreases moisture and increases the thickness and stiffness of the material, reaching a Young's modulus of 29.4 MPa in the formulation with the highest starch content (1.75 g). Although lower than those of high-strength synthetic polymers, the values obtained demonstrate the possibility of obtaining materials with stable mechanical behavior from biological sources, which constitutes a step forward in the development of formulations with adjustable properties for specific industrial applications.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales de origen biológico ha adquirido una importancia creciente dentro de la ingeniería y la ciencia de materiales, impulsado por la necesidad de explorar recursos renovables que permitan obtener polímeros funcionales con propiedades específicas (Thakur & Thakur, 2016). Los materiales biobasados se definen como aquellos obtenidos parcial o totalmente a partir de biomasa renovable o fuentes biológicas como lo son las plantas, se distinguen por su versatilidad, su capacidad de modificación estructural y su aplicabilidad en sectores industriales diversos, incluyendo el alimentario, farmacéutico y de envases (European Bioplastics, 2023).

Entre las distintas materias primas naturales, el almidón ha sido ampliamente estudiado debido a su abundancia, bajo costo y capacidad para formar matrices poliméricas cohesivas mediante los procesos de gelatinización y plastificación (García-Guzmán *et al.*, 2022). Bajo la acción combinada de calor y plastificantes, este polisacárido puede transformarse en un termoplástico amiláceo (TPS), capaz de formar películas o recubrimientos flexibles (Abe *et al.*, 2021). El comportamiento estructural y mecánico de estos materiales depende directamente de la proporción entre el almidón y el plastificante, así como del tipo de fuente vegetal utilizada, ya que la morfología del gránulo, su cristalinidad y la proporción de amilosa y amilopectina determinan sus propiedades finales (Thakur & Thakur, 2016).

En los últimos años, el estudio de fuentes alternativas de almidón ha permitido desarrollar materiales con diferentes grados de rigidez, transparencia y capacidad de absorción de agua, lo que amplía su potencial en aplicaciones tecnológicas (Falua *et al.*, 2022). En este marco, la exploración de nuevos recursos ricos en almidón se ha consolidado como una línea de investigación relevante, no solo por el interés en caracterizar sus propiedades estructurales y

funcionales, sino también por su posible incorporación en procesos de desarrollo de materiales sostenibles con menor impacto ambiental.

En Guatemala, el frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye uno de los cultivos agrícolas más relevantes y de mayor disponibilidad a nivel nacional (MAGA, 2023). Sin embargo, esta alta productividad conlleva una tasa significativa de mermas; según la FAO (2022), en Guatemala se pierde aproximadamente el 14 % de los alimentos básicos en las etapas de postcosecha y distribución debido a daños mecánicos, ataque de plagas o incumplimiento de estándares estéticos de calidad. Este volumen de granos de rechazo, que incluye frijol partido, dañado o fuera de calibre, representa una biomasa subutilizada de bajo costo.

Esto lo convierten en una materia prima viable para la obtención de almidón, ofreciendo una oportunidad para diversificar el uso de cultivos tradicionales mediante su aplicación en el ámbito de la ciencia de materiales. La caracterización del almidón proveniente de este grano puede aportar información valiosa sobre su capacidad filmogénica y su comportamiento como componente base en formulaciones de materiales biobasados.

En este trabajo se evalúa la viabilidad del almidón extraído de frijol negro como materia prima para la elaboración de un material biobasado, mediante la obtención, caracterización fisicoquímica y formulación de biopelículas empleando glicerina como plastificante. Se analizan las propiedades funcionales del almidón (solubilidad, poder de hinchamiento e índice de absorción de agua) y las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las biopelículas (contenido de humedad, espesor y módulo de Young), con el propósito de determinar su comportamiento estructural y su potencial de aplicación en productos de baja carga mecánica.

De esta forma, el presente estudio busca contribuir al conocimiento científico sobre el aprovechamiento del almidón de frijol negro en el desarrollo de

materiales biobasados, generando información experimental que puede servir como base para futuras investigaciones enfocadas en el diseño de materiales funcionales y sostenibles a partir de recursos agrícolas disponibles en Guatemala.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Desarrollar un biomaterial a partir del almidón extraído de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) mediante métodos reportados en estudios previos para evaluar su potencial aplicación en la industria.

2.2. Específicos

1. Extraer almidón de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) por medio de extracción húmeda y realizar pruebas fisicoquímicas para conocer las propiedades determinantes en la síntesis de un biomaterial.
2. Elaborar distintas formulaciones para generar un biomaterial utilizando almidón de frijol negro mediante métodos reportados en estudios previos para identificar aquellas que presenten mayor rendimiento.
3. Comparar las formulaciones seleccionadas mediante pruebas fisicoquímicas y mecánicas para evaluar sus propiedades y determinar su potencial aplicación en la industria.

3. JUSTIFICACIÓN

Los materiales biobasados son aquellos elaborados total o parcialmente a partir de recursos de origen biológico, como la celulosa, el quitosano o el almidón, y se distinguen por provenir de fuentes renovables con potencial para diversas aplicaciones industriales. En los últimos años, su desarrollo ha tomado relevancia por el interés en utilizar materias primas renovables en la fabricación de nuevos materiales con menor impacto ambiental.

De acuerdo con el Instituto de Bioplásticos y Biocomposites (2023), la producción global de bioplásticos, al ser una de las principales categorías de material biobasados, alcanzará aproximadamente 7.5 millones de toneladas para 2026, de las cuales los polímeros PBAT, PLA, PHA y las mezclas de almidón representarán más del 64 % del total.

En América Latina, el mercado de los materiales biobasados también sigue en constante crecimiento alcanzando un valor de USD 830 millones en el 2024 y se estima una tasa de crecimiento anual del 9.20 % (IMARC Group, 2024). Este crecimiento se debe a la demanda por envases y materiales alternativos frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo cuyo uso excesivo ha generado acumulación de residuos y afectaciones al medio ambiente.

Por lo tanto, el desarrollo de estas biopelículas permite de forma complementaria, buscar opciones equivalentes a los plásticos derivados del petróleo, los cuales podrían volverse limitados en el futuro debido a la dependencia de recursos no renovables. Por lo que, se busca identificar y aprovechar materias primas de origen biológico que puedan cumplir funciones similares en determinadas aplicaciones. Entre las diversas fuentes naturales se encuentra el almidón, un polisacárido con capacidad de formar matrices poliméricas mediante el proceso de gelatinización y plastificación.

En Guatemala, el frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia, siendo el segundo grano básico en producción después del maíz. Sin embargo, se estima que aproximadamente el 14 % de esta producción se pierde durante las etapas de cosecha y postcosecha, debido a la ruptura de los granos, daños físicos o al descarte por no cumplir con los estándares de calidad para consumo humano (FAO, 2022). Por lo que se podría utilizar esta fracción para la obtención de almidón.

Dado que existe poca información disponible sobre la utilización del almidón de frijol negro en la elaboración de materiales biobasados, se vuelve necesario generar estudios que permitan evaluarlo como materia prima. Por ello, el presente trabajo se propone analizar la extracción del almidón de frijol negro y elaborar un material biobasado mediante pruebas fisicoquímicas y mecánicas de las biopelículas obtenidas, con el objetivo de determinar si este material presenta propiedades adecuadas para posibles aplicaciones industriales.

El alcance de este estudio se limita al desarrollo del material biobasado a escala laboratorio, comprendiendo la extracción y caracterización del almidón de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.), la formulación de biopelículas con sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas con el fin de contribuir con información para futuras investigaciones sobre el uso de materias primas a partir de fuentes renovables para la fabricación de materiales alternativos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Materiales biobasados

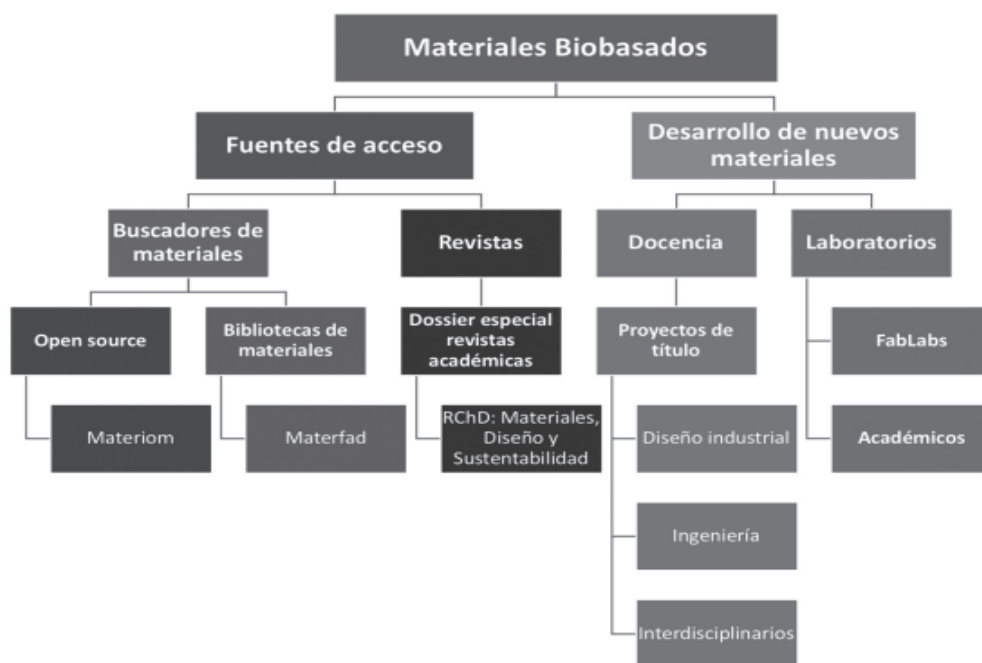
Según Muniyasamy *et al.* (2019), los materiales biobasados, denominados biopolímeros, son plásticos elaborados total o parcialmente a partir de biomasa renovable o fuentes biogénicas, como las plantas. Estos materiales se clasifican en dos tipos: los biopolímeros no biodegradables, que provienen de recursos renovables, pero no se degradan en el ambiente como el polietileno biobasado derivado de la caña de azúcar, y los biopolímeros biodegradables, que además de tener un origen renovable pueden descomponerse naturalmente (European Bioplastics, 2023).

El interés en este tipo de materiales ha aumentado durante la última década debido a la búsqueda de alternativas más sostenibles para la formulación de productos poliméricos. Los materiales biobasados permiten reducir la dependencia de recursos fósiles y, en muchos casos, ofrecen la posibilidad de obtener matrices con menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida (European Bioplastics, 2023). Entre los recursos más utilizados se encuentran polisacáridos como la celulosa, el quitosano y el almidón, cuyo comportamiento fisicoquímico, particularmente su capacidad de formar geles o matrices continuas. Esto los convierte en candidatos estratégicos para el desarrollo de biopelículas y biomateriales funcionales (Muniyasamy *et al.*, 2019).

Por otro lado, el desarrollo de nuevos materiales se produce principalmente en el ámbito académico, a través de proyectos de título en diseño industrial, ingeniería y enfoques interdisciplinarios, así como en laboratorios y FabLabs que impulsan la experimentación aplicada. Esta diversidad de orígenes y espacios de producción, representada en la Figura 1, evidencia que los materiales biobasados

no solo se definen por su composición renovable, sino también por las redes de colaboración y conocimiento que los sostienen (Donoso & Wechsler, 2020).

Figura 1. Mapa conceptual de materiales biobasados



Nota. Fuente: (Donoso & Wechsler, 2020)

4.2. Polímero

Es una macromolécula constituida por eslabones orgánicos denominados monómeros unidos por enlaces covalentes. Los monómeros están formados por átomos de carbono y pueden tener grupos laterales o radicales en sus átomos (Hassan *et al.*, 2019).

Además de estar unidos mediante los enlaces covalentes se encuentran otras fuerzas intermoleculares en la macromolécula como lo son; fuerzas de Van der Waals, interacciones dipolo-dipolo, puentes de hidrógeno y enlaces cruzados.

Estas interacciones influyen en las propiedades físicas como la resistencia mecánica, elasticidad, punto de fusión y solubilidad, etc. (Cortizo *et al.*, 2023).

La característica más importante de los polímeros es su alto peso molecular, lo que los convierte en su principal distintivo con otras moléculas. Esta propiedad es responsable de la resistencia a la tracción, cristalinidad, elasticidad y viscosidad que son útiles para aplicaciones industriales (Cortizo *et al.*, 2023). De la misma manera, las propiedades de los polímeros pueden variar cuando ocurre las reacciones de polimerización donde se obtienen estructuras lineales, ramificaciones, o bien polímeros entrecruzados (Beltrán, 2011).

Los polímeros suelen clasificarse en dos tipos que son los termoplásticos y los termoestables (Cortizo *et al.*, 2023). Los termoplásticos pueden fundirse y remodelarse cuando se les aplica calor y presión, lo que facilita su reciclaje. En contraste, los termoestables presentan una estructura altamente reticulada que se descompone antes de poder fundirse, dificultando así su reutilización (Puskas, 2014).

Asimismo, los polímeros pueden clasificarse según su origen en naturales o sintéticos, y también según su comportamiento ambiental como biodegradables o no biodegradables (Baranwal *et al.*, 2022).

4.3. Biopolímeros

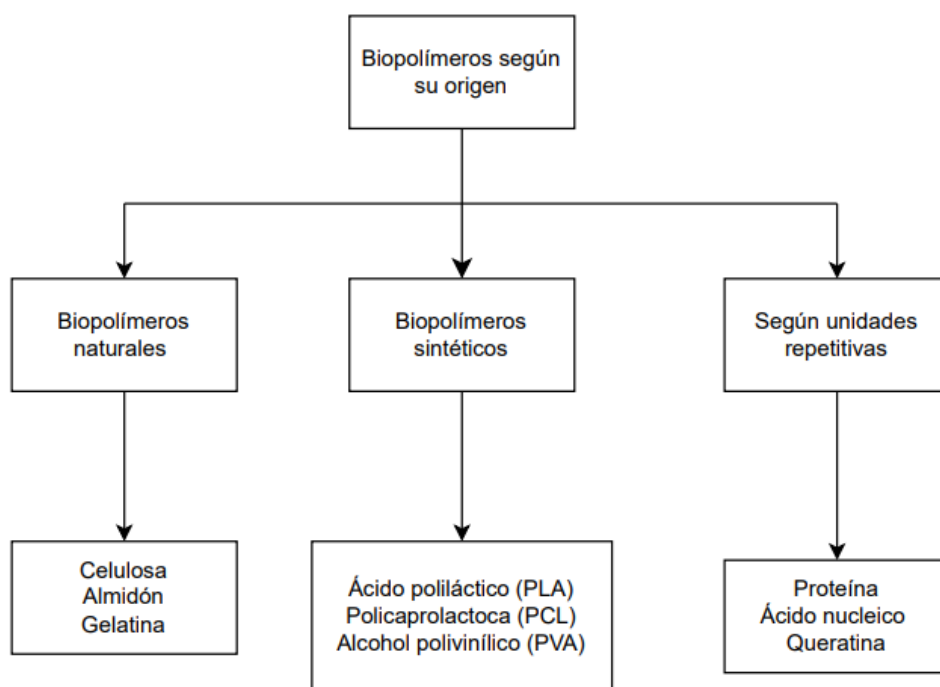
A los polímeros naturales se les conoce como aquellas macromoléculas cuyas unidades estructurales están formadas por compuestos como azúcares, lípidos, aminoácidos y ácidos nucleicos (Baranwal *et al.*, 2022). Estos polímeros pueden encontrarse en una amplia variedad de fuentes naturales, incluyendo microorganismos, organismos genéticamente modificados y sus productos derivados durante procesos como la fermentación o la síntesis de macromoléculas. Su estructura química suele presentar diversas cadenas laterales que contribuyen a las propiedades y funcionalidad específica de cada

molécula (Baranwal *et al.*, 2022). Por lo que estas macromoléculas son utilizadas en distintas aplicaciones industriales, especialmente en la producción de embalajes biodegradables, en el campo de medicina y nanotecnología (Hassan *et al.*, 2019).

4.3.1. Clasificación de los biopolímeros

Según su origen las macromoléculas suelen clasificarse en biopolímeros naturales, biopolímeros sintéticos, y según sus unidades repetitivas. En la Figura 2 se muestra algunos ejemplos de los polímeros y su clasificación.

Figura 2. Clasificación de los biopolímeros según su origen y ejemplos de los polímeros más utilizados en la industria



Nota. Elaboración propia con base en (Baranwal *et al.*, 2022)

Como se observa en la Figura 2, los biopolímeros pueden clasificarse en naturales, sintéticos y también según sus unidades repetitivas. Cada uno de estos tipos presenta características particulares que influyen en su uso industrial. Para

comprender mejor su aplicabilidad y limitaciones, la Tabla 1 resume las principales ventajas y desventajas asociadas a los biopolímeros naturales y sintéticos.

4.3.2. Ventajas y desventajas de los biopolímeros

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los biopolímeros

Tipo de biopolímero	Ventajas	Desventajas
Naturales	Proviene de materiales renovables, biodegradables y biocompatibles. No son tóxicos y pueden obtenerse de los residuos agrícolas.	Suelen ser sensibles a la temperatura, humedad. Su estructura es compleja. Menor estabilidad mecánica y cuentan con un bajo punto de fusión
Sintéticos	Son biocompatibles, con buena resistencia mecánica, mayor estabilidad química.	La síntesis es tóxica, no son biodegradables, el costo de producción es mayor.

Nota. Fuente: (Baranwal *et al.*, 2022)

Presenta la comparación de los biopolímeros naturales y sintéticos donde se resaltan sus principales ventajas y desventajas en función de su origen, comportamiento fisicoquímico y su reproducción industrial.

Los biopolímeros derivados de polisacáridos como se muestran en la Figura 2, entre ellos la celulosa, el almidón y la quitina han sido utilizados en diversas aplicaciones industriales. Particularmente, su uso en la formulación y desarrollo de biopelículas en el sector de alimentos debido a su capacidad de formar matrices. Entre estos destaca el almidón por su disponibilidad, bajo costo y de fácil procesamiento. Cuando se gelatiniza en presencia de agentes plastificantes como el glicerol o sorbitol se obtiene una matriz flexible que puede ser utilizada para el desarrollo de material biobasados. (Cuyumba & Quispe, 2024).

4.3.3. Mercado global de los biopolímeros

La creciente demanda de envases ecológicos y sostenibles ha llevado a la investigación y fabricación de productos biodegradables donde los biopolímeros han destacado por sus diversas aplicaciones en industrias como alimentarias, farmacéuticas y biomédicas.

De acuerdo con la Fundación Ellen MacArthur (EMF) se fabrican 78 millones de toneladas de plástico convencionales de un solo uso, mientras que menos del 2 % suele reciclarse. Ante esta realidad, fabricantes, autoridades y legisladores fomentan la investigación para generar materiales a partir de materiales biológicos que sean resistentes en distintas aplicaciones.

Según Fortune Business Insights (2025), el tamaño del mercado global de biopolímeros ha ido creciendo, para el año 2023 se valoró en USD 7.49 mil millones y se estima que para el 2032 este tenga un valor de USD 56.99 mil millones con una tasa de crecimiento compuesto de 29 %.

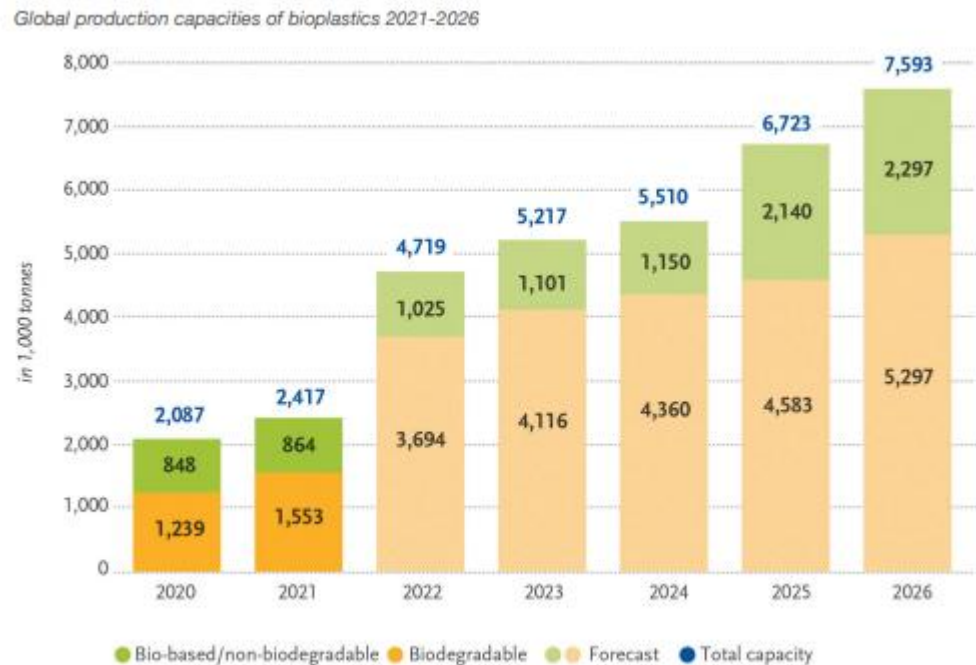
Las circunstancias en otros países siguen la misma tendencia, en Estados Unidos se proyecta que el mercado de bioplásticos alcanzará hasta USD 11.11 mil millones en el año 2032 en la aplicación en automóviles y productos de alta calidad. De igual manera, en China y Alemania se están utilizando para embalajes y empaquetados (Fortune Business Insights, 2025) .

Asimismo, empresas se han comprometido con promover productos respetuosos con el medio ambiente, las principales son BASF (Dinamarca), NatureWorks LLC (Estados Unidos), CheilJedang (Corea del Sur), Novamont (Italia) y Tianjin Guoyun (China). Donde ejemplos destacados como Futamura Chemical Company con la producción de películas transparentes a partir de celulosa han generado alrededor de 11,190 millones de dólares en ingresos, y a la empresa Novamont, fabricante de su producto estrella Mater-Bi, un biopolímero

desarrollado mediante tecnología patentada utiliza almidones, celulosa y aceites vegetales. (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024)

De acuerdo con la producción global según Bioplásticos y Biocomposites (2024, figura 3) alcanzará 7.5 millones de toneladas para el 2026. De las cuáles las mayores producciones son del polibutileno adipato-co-tereftlato (PBAT), el ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA) y mezclas de almidón que representa el 64 % del sector. (Ver figura 3)

Figura 3. Producción global del mercado de bioplásticos



Nota. Fuente: (European Bioplastics, 2021)

4.3.4. Sectores de aplicación de los bioplásticos

En cuanto a los sectores industriales en los que se aplica los bioplásticos son principalmente en envases y productos del consumidor como los electrónicos, automóviles, agricultura, textiles y juguetes. El envasado en alimentos es el líder de este sector con un 43 % de las 2.18 millones de toneladas de bioplásticos producidos en 2023 (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024). Los bioplásticos tiene la capacidad de obtener el mismo rendimiento o mayor en algunos plásticos por lo

que se podrían sustituir en algunas aplicaciones como los envases de alimentos para la producción de cubiertos, pajillas, películas sopladas o recipientes.

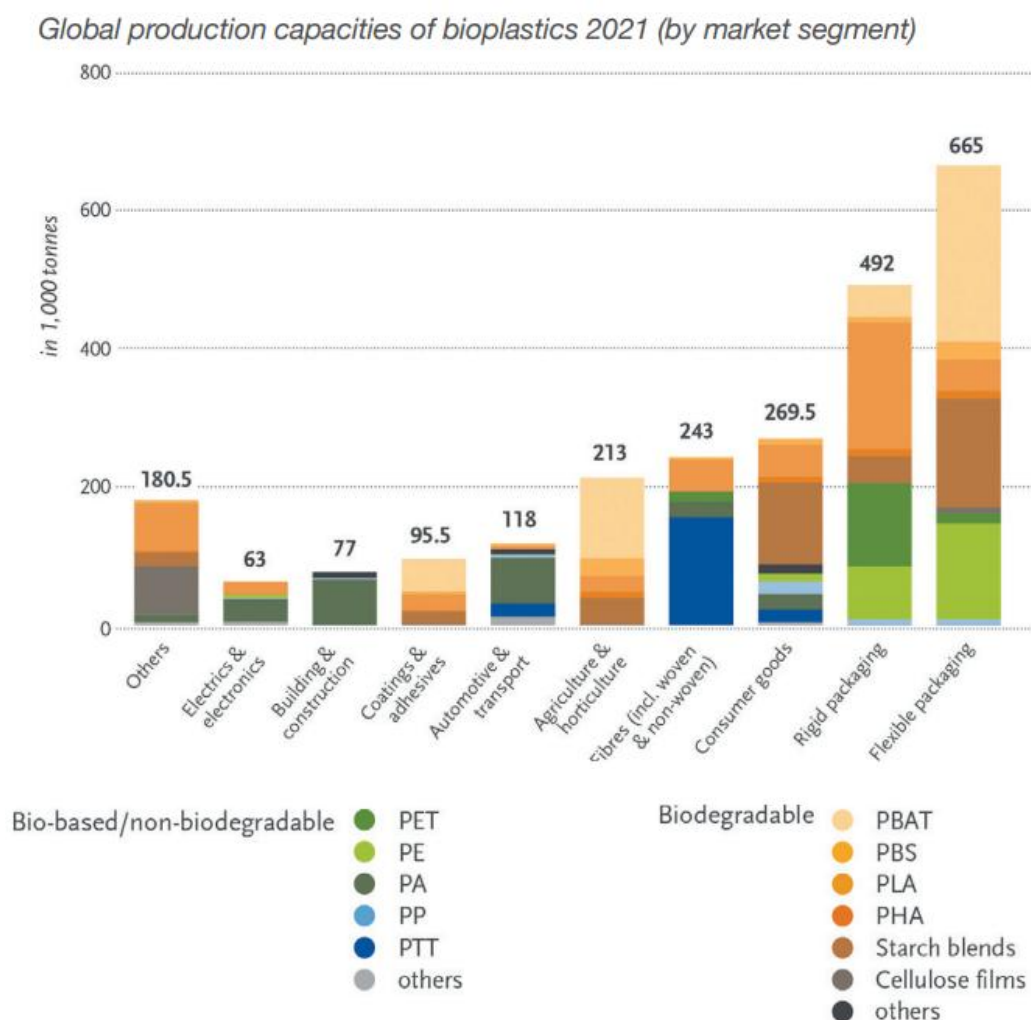
En la industria alimentaria, los bioplásticos se utilizan ampliamente en películas flexibles, bandejas, botellas, cubiertos, pajillas y envases biodegradables. Grandes empresas han adoptado estos materiales en sus líneas de producción: McDonald's y Burger King sustituyeron envases de poliestireno (PS) y polietileno (PE) por ácido poliláctico (PLA), mientras que Coca-Cola, PepsiCo y Heinz emplean Bio-PET en la fabricación de botellas sostenibles. Asimismo, McCain (Australia) utiliza PLA en bolsas flexibles para almacenar papas congeladas, y cadenas como Iper y Co-op han implementado bioplásticos a base de almidón en empaques de productos orgánicos (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024).

El PLA es el bioplástico con mayor participación en el mercado global, empleado en bandejas para ensaladas, envases de yogur, películas para té y envolturas de alimentos frescos por empresas como Danone y Delhaize. Por su parte, el PHB (polihidroxibutirato) se utiliza en bolsas compostables, envoltorios biodegradables, cubiertos desechables y otros artículos de corta vida útil, mientras que el PBAT se emplea en películas sopladas, films agrícolas y bolsas flexibles por su elevada flexibilidad y degradabilidad (European Bioplastics, 2021).

En el sector biomédico, los biopolímeros como PLA, PHA y quitosano se han aplicado en la fabricación de suturas, férulas, andamios para ingeniería de tejidos y sistemas de liberación controlada de fármacos, aprovechando su biocompatibilidad, esterilidad y capacidad de degradación controlada. En la industria cosmética y farmacéutica, se utilizan para la producción de cápsulas, recubrimientos biodegradables y envases mono uso, mientras que en la agricultura se destinan a películas de acolchado biodegradables, macetas compostables y sistemas de liberación de fertilizantes (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024).

Gracias a su versatilidad, los bioplásticos también se aplican en la industria automotriz para la fabricación de componentes interiores, recubrimientos y paneles ligeros, reduciendo el peso del vehículo y, con ello, las emisiones de CO₂. En el sector textil, se utilizan en fibras biodegradables y tejidos técnicos, mientras que en la electrónica se han desarrollado carcasas y piezas compostables que reemplazan polímeros convencionales de alta durabilidad (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024).

Figura 4. Aplicaciones de los bioplásticos en distintos sectores y su producción global en miles de toneladas



Nota. Fuente: (European Bioplastics, 2021)

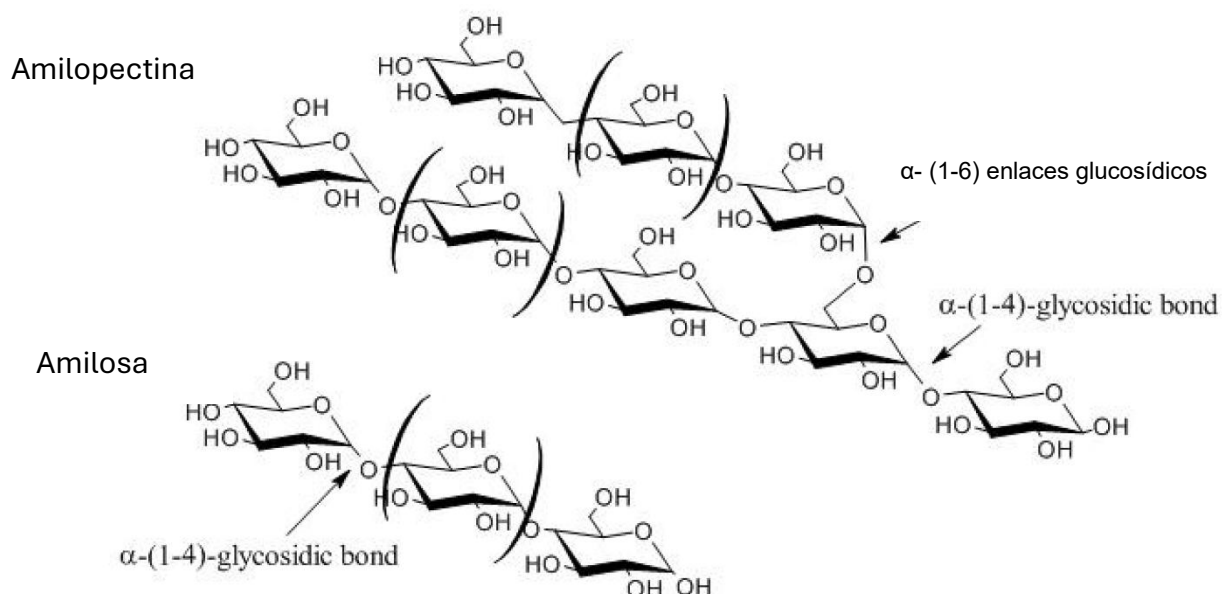
4.4. Almidón como materia prima de elaboración del material biobasado

El almidón es un polisacárido muy abundante en la naturaleza ya que cumplen con la función principal de almacenar energía en las plantas, animales, microorganismos u organismos (Cortizo *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista estructural está conformado por dos macromoléculas; la amilopectina y la amilasa las cuáles están compuestas por monómeros de D-glucosa (Lara-Gómez *et al.*, 2022). La amilosa es una cadena lineal de unidades de anhidroglucosa que se encuentran unidas por enlaces glucosídicos α -(1,4) que suele representar entre un 20 % a 28 % del almidón total mientras que la amilopectina presenta una estructura ramificada la cual está conformada por unidades de glucosa en una cadena lineal conectados por enlaces glucosídicos α -(1,4) y ramificaciones unidas por enlaces glucosídicos α -(1,6) y comprende el 72 al 75 % del almidón (Abe *et al.*, 2021). (Ver figura 5)

La combinación de ambas estructuras químicas proporciona al almidón la característica semicristalina ya que contiene dos regiones; una región cristalina en la que las cadenas de polisacáridos se alinean de manera ordenada produciendo pequeños cristales, y otra región amorfa en la que las cadenas se alienan de forma desordenada y sin orientación específica (Cuyumba & Quispe, 2024). La organización de estas moléculas contribuye a las propiedades físicas del almidón como su capacidad de hinchamiento, temperatura de gelatinización y retrogradación (Abe *et al.*, 2021).

Figura 5. Estructura química de la amilosa y amilopectina.



Nota. Traducido de Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components (Abe *et al.*, 2021).

4.5. Propiedades y composición del almidón

Los métodos analíticos utilizados para caracterizar los almidones se basan en el evaluar su origen, pureza, integridad, propiedades fisicoquímicas, morfológicos y reológicas. Estas propiedades varían de acuerdo con la fuente de almidón por lo que es fundamental establecer dichos parámetros y seleccionar la materia prima para el desarrollo de biopolímeros y películas biobasadas (Pedrosa *et al.*, 2019).

4.5.1. Pruebas de identificación y calidad

Las pruebas de identificación permiten establecer la pureza y calidad del almidón antes de su utilización como materia prima. Entre las determinaciones más comunes se encuentran la humedad, cenizas, pH, acidez, color y pureza. Estas mediciones, estandarizadas por la AOAC y la AACCI, son fundamentales para garantizar la estabilidad del material y evitar alteraciones durante su procesamiento (Pedrosa *et al.*, 2019).

El contenido de humedad es un indicador crucial, ya que un exceso de agua puede favorecer el crecimiento microbiano y modificar las propiedades térmicas y mecánicas del almidón. Se determina por mediante secado en estufa hasta peso constante (Waterschoot *et al.*, 2015) . Asimismo, el pH y la acidez titulable aportan información sobre la estabilidad química del almidón, mientras que el color y la evaluación de impurezas permiten detectar residuos o daños provocados por la extracción (Waterschoot *et al.*, 2015).

Por otra parte, la prueba con solución de Lugol (yodo-yoduro de potasio) se emplea como un método cualitativo para confirmar la presencia de almidón, evidenciada por la aparición de una coloración azul característica al interactuar con la amilosa (Pedrosa *et al.*, 2019).

4.5.2. Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica tiene como finalidad conocer la composición molecular y el comportamiento estructural del almidón frente a factores externos como el agua o la temperatura.

Entre los análisis más comunes se encuentra la determinación del contenido de amilosa y amilopectina, las dos fracciones principales del almidón. La amilosa, de estructura lineal, favorece la formación de películas rígidas y resistentes, mientras que la amilopectina, altamente ramificada, aporta flexibilidad y transparencia (Abe *et al.*, 2021).

Estas propiedades son determinantes en el desempeño de materiales biobasados, ya que influyen en su textura, resistencia mecánica y estabilidad frente a la humedad (Waterschoot *et al.*, 2015).

El contenido de amilosa suele estimarse mediante el método del complejo yodo-almidón, en el que la intensidad de la coloración azul se correlaciona con su concentración (Martín-Sánchez *et al.*, 2013).

Además, se evalúan parámetros como pH, acidez y contenido de fósforo, los cuales afectan la reactividad del almidón y su capacidad de formar enlaces con plastificantes o aditivos durante la elaboración del material biobasado (Waterschoot *et al.*, 2015).

4.5.2.1. Solubilidad del almidón

La solubilidad indica la cantidad de almidón que se disuelve o se dispersa en agua durante el proceso de gelatinización. Este ensayo proporciona información sobre el grado de desorganización del gránulo y sobre la facilidad con la que el almidón puede formar una fase continua con otros componentes del material biobasado (Waterschoot *et al.*, 2015).

El método común consiste en calentar una suspensión de almidón, separar el sobrenadante por centrifugación y cuantificar los sólidos solubles mediante gravimetría o colorimetría con yodo. Una solubilidad moderada es deseable para aplicaciones industriales, ya que facilita la dispersión del almidón en la matriz sin comprometer la cohesión del material (Hoover & Sosulski, 1985).

Pedrosa *et al.* (2019) destacan que la solubilidad aumenta con la temperatura y depende de la proporción amilosa/amilopectina, como de la presencia de lípidos o proteínas que formen complejos con las cadenas poliméricas.

4.5.2.2. Poder de hinchamiento

Es una propiedad fundamental para comprender el comportamiento del almidón frente al agua. Esta característica refleja la capacidad de los gránulos de almidón para absorber humedad y expandirse cuando son expuestos a temperaturas superiores a su punto de gelatinización (Hoover & Sosulski, 1985).

En el ámbito de los materiales biobasados, esta prueba resulta determinante, ya que un almidón con mayor capacidad de hinchamiento favorece

la formación de matrices poliméricas más cohesivas, continuas y uniformes, mejorando la estructura del biomaterial final (Abe *et al.*, 2021).

El procedimiento experimental consiste en calentar una suspensión de almidón en exceso de agua, separar el sobrenadante por centrifugación y cuantificar la cantidad de agua retenida por el residuo, expresándola como gramos de agua por gramo de almidón seco (Meaño Correa *et al.*, 2014).

De acuerdo con Pedrosa *et al.* (2019), el poder de hinchamiento está influido por factores como el contenido de amilopectina, el tamaño y la integridad de los gránulos, el grado de cristalinidad, el pH y la presencia de grupos fosfato. En general, un mayor valor de hinchamiento indica una estructura granular más abierta y permeable, lo que facilita la interacción con plastificantes y promueve la obtención de biopolímeros con mejor flexibilidad y homogeneidad estructural (Abe *et al.*, 2021).

4.5.2.3. Capacidad de absorción y retención de agua

La capacidad de absorción y retención de agua del almidón constituye un indicador clave de su afinidad por el agua y de su habilidad para mantenerla dentro de su estructura interna. Estas propiedades determinan en gran medida el comportamiento higroscópico del material, así como su estabilidad frente a condiciones ambientales variables (Abe *et al.*, 2021).

En cuanto a los biomateriales basados en almidón, dichas pruebas resultan esenciales, ya que permiten evaluar la resistencia del material a la humedad ambiental y su respuesta durante los procesos de secado y almacenamiento. Un almidón con mayor capacidad de absorción de agua tiende a formar películas más elásticas y flexibles, mientras que una baja retención contribuye a obtener productos más rígidos y con menor permeabilidad al vapor de agua (Abe *et al.*, 2021)..

Además, se considera la sinéresis, fenómeno que consiste en la liberación de agua durante el enfriamiento del gel, ya que su magnitud refleja la estabilidad del sistema y su propensión a la retrogradación. De acuerdo con Pedrosa *et al.* (2019), la capacidad de absorción de agua (CAA) está influenciada por factores como la disponibilidad de grupos hidroxilo, el grado de daño en los gránulos y el nivel de cristalinidad del almidón, los cuales determinan su comportamiento durante la hidratación y la conformación de la matriz polimérica.

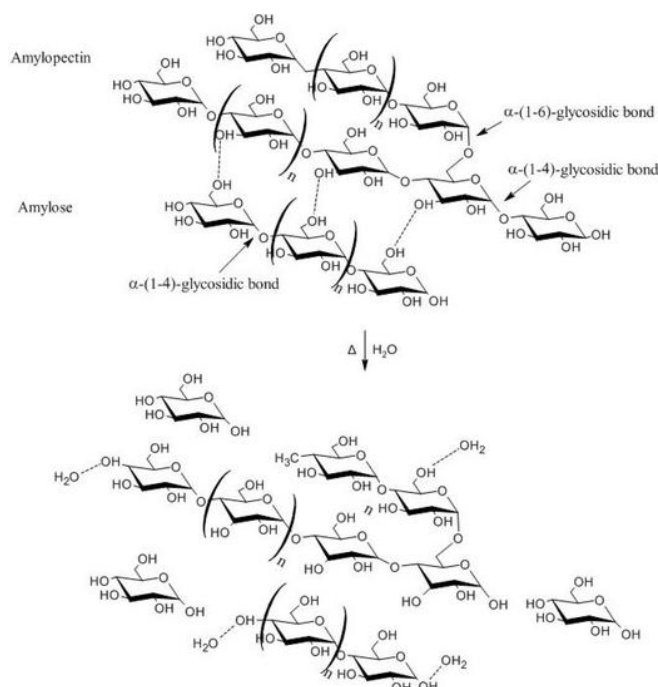
4.5.2.4. Gelatinización

El almidón puede perder su estructura cristalina durante el procesamiento térmico en el que se transforma, a este fenómeno se le llama gelatinización y ocurre cuando los gránulos del almidón se exponen a calor en presencia del agua (Abe *et al.*, 2021). En su estado nativo, las moléculas de amilosa y amilopectina se unen por medio de interacciones del grupo hidroxilo y del oxígeno, de la cual ambas moléculas están unidas entre sí por puentes de hidrogeno (Cuyumba & Quispe, 2024). (Ver figura 6)

Al exponerse a altas temperaturas, la molécula sufre cambios estructurales que provocan la ruptura de los puentes de hidrógenos, donde ocurre la lixiviación de la amilosa provocando un aumento en la viscosidad de la solución y la desorganización estructural en la doble hélices (Abe *et al.*, 2021). Por lo que en las regiones amorfas empieza la gelatinización del almidón.

Figura 6.

Gelatinización del almidón



Fuente (Abe *et al.*, 2021)

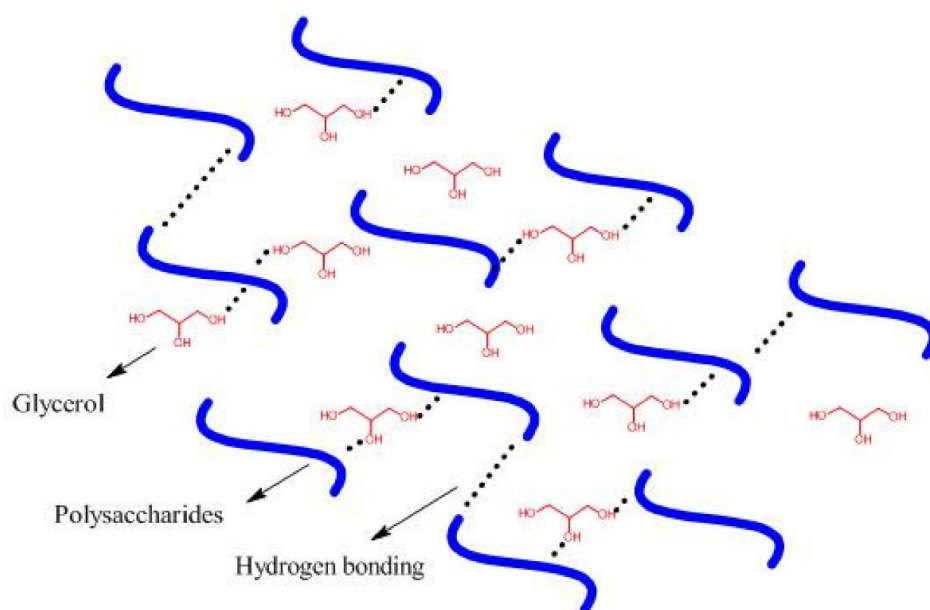
4.5.2.5. Retrogradación

Asimismo, puede ocurrir la retrogradación del almidón en donde se reorganizan las moléculas de amilosa y se obtiene una estructura más ordenada de los enlaces de hidrógeno (Pérez *et al.*, 2009). Por lo tanto, el almidón se cristaliza parcialmente cuando se enfría la solución. El efecto que proporciona agentes plastificantes químicos al almidón permite obtener un almidón termoplástico para la elaboración de bioplásticos (Cortizo *et al.*, 2023). En esta transformación el almidón pierde su estructura granular original y se forma una matriz estructurada con propiedades similares a los polímeros sintéticos termoplásticos. Esto se debe al hinchamiento de los gránulos en conjunto con el agua y plastificantes (Abe *et al.*, 2021).

Para llevar a cabo la transformación del almidón se toma en cuenta condiciones como la temperatura y los plastificantes a utilizar siendo la glicerina y

el agua los más utilizados debido a su capacidad para actuar como lubricantes, ya que aumentan la movilidad molecular y el grado hidrofílico del material biobasado, por lo que se obtiene bioplásticos con mayor flexibilidad (Abe *et al.*, 2021). (Ver Figura 7)

Figura 7. *Interacción de polímeros y agentes plastificantes para la formación de matrices bioplásticas*



Fuente: (Abe *et al.*, 2021)

4.5.3. Pruebas instrumentales estructurales

Las técnicas instrumentales permiten complementar la información obtenida mediante las pruebas fisicoquímicas. En particular, la microscopía de luz polarizada facilita la observación de la forma y el tamaño de los gránulos de almidón, además de evidenciar la pérdida de birrefringencia que ocurre durante el proceso de gelatinización.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) revela la superficie y posibles daños en los gránulos después de la extracción o del tratamiento térmico (Waterschoot *et al.*, 2015).

Asimismo, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite determinar la temperatura y entalpía de gelatinización, mientras que la espectroscopía infrarroja (FTIR) y la difracción de rayos X identifican grupos funcionales, grado de cristalinidad y modificaciones químicas (Waterschoot *et al.*, 2015).

Estos análisis son especialmente útiles para correlacionar la estructura del almidón con las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera del material biobasado.

4.6. Agentes plastificantes

Son agentes químicos que se utilizan en materiales como polímeros para suavizarlas y proporcionar mayor flexibilidad debido al aumento del volumen intersticial de la matriz por lo que el plastificante disminuye la temperatura de transición vítrea (T_g) determina la rigidez del bioplástico (Abe *et al.*, 2021). A temperaturas menores o por debajo de la temperatura vítrea el bioplástico es débil y duro mientras que a temperaturas mayores se obtiene un bioplástico más compacto y suave (Cuyumba & Quispe, 2024).

4.6.1. Agua destilada

Se obtiene a partir de un proceso de destilación en la que ha sido purificada con el fin de eliminar las impurezas. Es decir, que se encuentra libre de sales, minerales, microorganismos y otros contaminantes (Valdivia *et al.*, 2010).

Es utilizado en mezclas de almidón para lograr su gelatinización y favorecer a la ruptura de los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de amilosa y amilopectina. Sin embargo, no debe usarse proporciones altas ya que en la mezcla no se distribuye el almidón (Cuyumba & Quispe, 2024).

4.6.2. Glicerina

Es el plastificante más utilizado dentro de las industrias ya que proporciona humectación (Madarina *et al.*, 2023), tiene la característica de plastificar y brinda una alta estabilidad térmica. En su estructura contiene tres grupos hidroxilo por lo que es soluble en agua. Entre sus propiedades químicas es de apariencia viscosa, incoloro y no tóxico (Cuyumba & Quispe, 2024).

Tiene una gran compatibilidad hacia los almidones por lo que ayuda a la flexibilidad de los polímeros ya que les brinda flexibilidad, elasticidad y mayor resistencia. Es por esto por lo que muchas propiedades mecánicas de los biopolímeros son modificadas también, entre ellas se menciona la resistencia a la tracción y al estiramiento (Yuss, 2021).

El tipo y la cantidad de plastificantes utilizados durante la formulación del material biobasado influyen en las propiedades mecánicas como lo son la resistencia a la tracción, elongación y su flexibilidad (Cuyumba & Quispe, 2024). Por lo tanto, evaluar estas propiedades no solo permite conocer el comportamiento del material ante esfuerzos físico, sino que también ayuda a ajustar la formulación para lograr un equilibrio entre la flexibilidad y la resistencia.

4.7. Propiedades mecánicas

Las propiedades de los materiales biobasados dependen de la estructura, temperatura a la que son sometidos el tipo de esfuerzo que se les aplica y la duración de este. Para la evaluación de desempeño de los bioplásticos se determinan la resistencia a la tracción, la elongación, el módulo de elasticidad, entre otras (Beltrán, 2011).

4.7.1. Módulo de Young

Es una magnitud física que caracteriza el comportamiento elástico de un material de acuerdo con la dirección en que la fuerza se aplique. Definiéndose cómo la relación lineal entre la deformación y la fuerza aplicada por área, $E = \sigma/\varepsilon$ MPa, kPa (Gupta *et al.*, 2022)

Es un modelo utilizado para determinar el estiramiento o la compresión de un material elástico lineal e isótropo mediante forma empírica realizando ensayos de tracción del material (Ortiz & Cruz, 2022). Por lo que su estudio es esencial en áreas como la física, la ingeniería y la ciencia de materiales, ya que permite predecir cómo responderá un material ante cargas de tracción o compresión.

El valor del módulo de Young es característico de cada material y constituye una medida directa de su rigidez. Materiales con valores elevados de este módulo, como el acero o el vidrio, presentan una baja deformación ante la aplicación de esfuerzos, lo que los hace adecuados para estructuras que requieren alta resistencia y estabilidad (Ortiz & Cruz, 2022). En contraste, materiales con un módulo de Young bajo, como los polímeros y elastómeros, muestran una mayor capacidad de deformación, siendo utilizados en aplicaciones donde se requiere flexibilidad (Ortiz & Cruz, 2022).

4.7.2. Elasticidad

Es una propiedad física de los materiales al sufrir una deformación, donde tiene la capacidad de recuperar su forma y dimensiones después de estar sometidos ante una fuerza externa (Vélez *et al.*, 2025). Este comportamiento se presenta siempre que el material no supere su límite elástico, sin llegar a la deformación permanente.

Dentro del estudio de la elasticidad, la elongación se refiere específicamente al alargamiento que experimenta un cuerpo cuando es sometido a una fuerza de tracción. Este fenómeno se cuantifica mediante la variación de longitud que sufre el material respecto a su longitud original (Cervera & Blanco, 2002). La elongación puede expresarse en términos absolutos, como un cambio de longitud, o en términos relativos, conocida como deformación unitaria, que resulta del cociente entre la elongación y la longitud inicial del cuerpo (Vélez *et al.*, 2025).

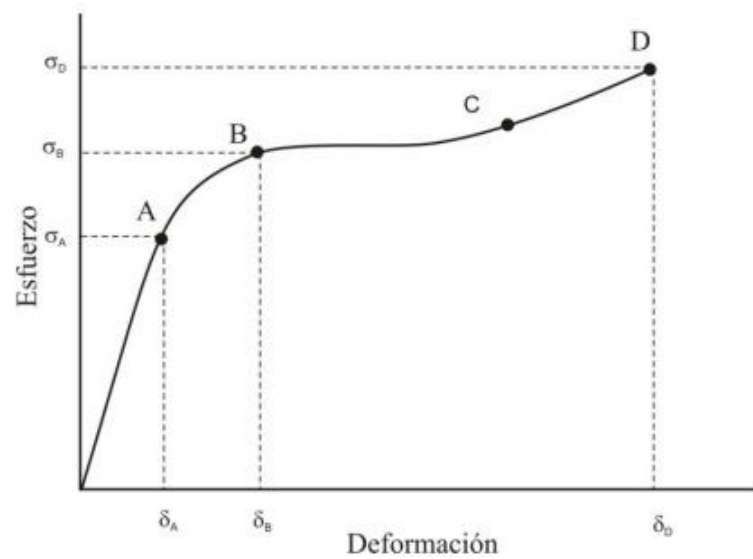
La comprensión de la elasticidad y la elongación es esencial para el diseño de elementos estructurales y mecánicos, ya que permite evaluar si un material puede soportar determinadas cargas sin sufrir deformaciones permanentes (Vélez *et al.*, 2025).

4.7.3. Resistencia a la tracción

Se realizan ensayos a la tracción donde se obtiene la fuerza ejercida a un material al estirarlo. De los cuáles se obtiene información para la determinación de a resistencia a la tracción, elongación y módulos (Beltrán, 2011). Ver figura 8

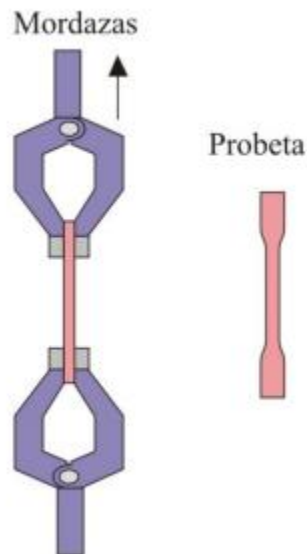
Para llevar a cabo ensayos de tracción se necesita de un brazo fijo y un brazo móvil que cuente con dos pinzas en donde se colocan las probetas. Para determinar la carga y la extensión se realiza mediante la separación de los brazos a velocidad constante. El tamaño de la probeta debe ser de dimensiones normalizadas (Beltrán, 2011). Ver figura 9.

Figura 8. Curva típica esfuerzo-deformación de un plástico



Fuente: (Beltrán, 2011)

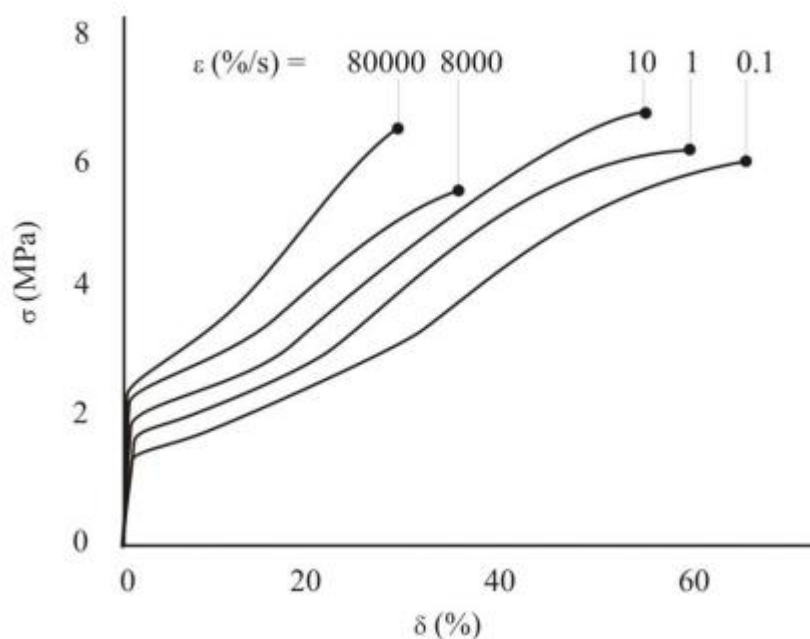
Figura 9. Pinzas y probeta tipo halterio para ensayos de tracción



Fuente; (Beltrán, 2011)

Una característica importante al realizar los ensayos de tracción son las velocidades en comparación con la elongación ya que a menor velocidad los datos no son confiables y a mayores velocidades se obtiene datos válidos para la determinación de elongación y tenacidad (Cuyumba & Quispe, 2024). Un claro ejemplo se observa en la siguiente figura 10 en donde se realizaron ensayos de la velocidad en muestra PET a 220°C.

Figura 10. *Variación de la velocidad en ensayos de muestras de PET a 220°C*



Fuente: (Beltrán, 2011)

Considerando la importancia de los biopolímeros en la elaboración de materiales sostenibles, el almidón se posiciona como una materia prima estratégica debido a su abundancia y capacidad para formar matrices con propiedades similares a los plásticos sintéticos.

4.8. Frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) para la elaboración de biopolímeros

El frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) es una legumbre en grano que pertenece a la familia *Fabaceae*, con una alta influencia y consumo en América Latina por su gran valor nutricional, su importancia cultural y económica. Es una de las fuentes esenciales de proteínas carbohidratos, fibra dietética, vitaminas y algunas minerales. Al compararlo con cereales, posee hasta 2.5 veces más de proteínas por lo que es alimento altamente nutricional (Punia *et al.*, 2020).

La producción de frijol en Guatemala posee el segundo lugar en volumen de granos básicos después del maíz con un valor de 6.19% lo que equivale a 3,092,385.68 quintales ocupando una superficie de 207,892.62 hectáreas (1.91%) del territorio nacional (DIGEGR, 2023).

La composición proximal del frijol negro por cada 100 g comestibles contiene un promedio; humedad (13.28%), proteína (18.2%), grasas (1.3 g) cenizas (4.54%), fibra (3.6 g), carbohidratos (63.4 g) y de minerales contiene calcio (133 mg) y hierro (9.3 mg) (Ichina, 2021). Este dado por su riqueza nutricional ha despertado el interés no solamente en la alimentación, sino también en aplicaciones industriales (Ichina, 2021)

4.8.1. Composición nutricional del frijol negro

La composición mayoritaria del frijol negro son los carbohidratos que abarcan entre un 55% y 65% de su peso, de los cuáles el almidón es el más abundante. Este polisacárido está formado por amilosa (20% al 30%) y amilopectina entre un (70% a 80%) los cuales influyen en las propiedades funcionales. La amilosa cuenta con una estructura lineal que facilita la formación de películas resistentes mientras que la amilopectina al tener una cadena ramificada contribuye a la elasticidad de los geles (Cuyumba & Quispe, 2024).

Asimismo, aporta distintos macronutrientes y minerales como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición nutricional de 100 g de frijol negro en granos secos.

Macronutrientes y Minerales	Unidad	Cantidad	Macronutrientes y Minerales	Unidad	Cantidad
Agua	%	11	Cobre	mg	0.84
Energía	Kcal	341	Selenio	mcg	3.20
Proteína	g	21.60	Tiamina	mg	0.90
Grasa Total	g	1.42	Riboflavina	mg	0.19
AG. Saturados	g	0.37	Niacina	mg	1.96
AG. Monosaturados	g	0.12	Á. Pantoténico	mg	0.90
g. Polisaturados	g	0.61	Vitamina B6	mg	0.29
Colesterol	mg	0.00	Ácido Fólico	mcg	0
Carbohidrato	g	62.36	Folato Alimentos	mcg	444
Azúcares	g	2.12	Folato FDE	mcg	444
Fibra dietética	g	15.50	Vitamina B12	mcg	0
Ceniza	g	3.60	Vitamina A EAR	mcg	0
Calcio	mg	123	Retinol	mcg	0
Hierro	mg	5.02	B. carotenos	mcg	0
Magnesio	mg	171	Vitamina E	Mg	0.21
Fósforo	mg	352	Vitamina D	mcg	0
Potasio	mg	1483	Vitamina K	mcg	5.60
Sodio	mg	5	Fracción Comestible	%	100
Zinc	mg	3.65			

Fuente: Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP, 2018)

La composición del frijol negro está constituida principalmente por carbohidratos complejos, entre los cuales predominan el almidón y la fibra dietética (Serrano & Goñi, 2004). Estos compuestos desempeñan un papel fundamental en sus propiedades funcionales y en su potencial para la obtención de biopolímeros. En la Tabla 3 se presenta la caracterización de los carbohidratos presentes en el frijol negro cocido, donde se observa una alta proporción de almidón total y fibra dietética, además de pequeñas cantidades de azúcares simples como la rafinosa, estaquiosa y verbascosa.

Tabla 3. Composición de carbohidratos de frijol negro

Carbohidratos	% materia seca
Glucosa libre	0.1
Almidón total	42.9
Almidón rápidamente digerible	7.5
Almidón lentamente digerible	8.4
Fibra dietética global	27.0
Fibra soluble	4.5
Fibra insoluble	22.6
Almidón resistent	26.9
Rafinosa	0.40
Estaquiosa	3.23
Verbascosa	0.12

Nota. Elaboración propia con base en (Serrano & Goñi, 2004)

5. ANTECEDENTES

5.1. Producción de bioplásticos

La elevada demanda de plásticos y los efectos negativos que generan en el medio ambiente se ha impulsado el desarrollo de nuevas líneas de investigación con el fin de obtener materiales de origen natural con la capacidad de sustituir a los polímeros derivados del petróleo.

Bajo esta línea, un estudio realizado en Arabia Saudita abordó la síntesis de bioplásticos a partir de tres tipos de almidón: de cáscara de plátano, arroz y de maíz. Además, se utilizaron dos plastificantes (glicerina y sorbitol) en proporciones de 1:1 junto con rellenos naturales en polvo de papa y madera. La composición de las muestras de bioplástico fue de 5 mL de ácido acético al 5 %, 5 mL del plastificante y 40 mL de almidón al 20 % (m/v) (Shafqat *et al.*, 2021)

Posteriormente, se realizaron pruebas de contenido de humedad, absorción de agua y solubilidad en agua, además de evaluar sus propiedades mecánicas mediante el módulo de Young, utilizando una máquina de ensayos universal. Se observó que las mezclas con adición de rellenos mejoraron proporcionalmente la resistencia a la tracción y el módulo de Young, mientras que las muestras con glicerol presentaron valores más bajos de resistencia a la tracción (entre 1 MPa y 3.5 MPa), en comparación con las muestras con sorbitol, que mostraron un módulo de Young de 2.5 MPa hasta 6 MPa.

Asimismo, se ha utilizado almidón de otros ingredientes vegetales para la elaboración de biopelículas biodegradables. Un estudio realizado por Meneses *et al.* (2007) elaboró un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, utilizando el método Taguchi como diseño experimental. Se empleó una combinación de plastificantes, extensores, espesantes, lubricantes y humectantes

para la obtención del biopolímero, utilizando equipos de la industria del plástico, como molinos abiertos, inyectoras y prensas de vulcanización. Los resultados demostraron que las mezclas obtenidas presentaron propiedades químicas, mecánicas y biodegradables adecuadas, destacando que la formulación con almidón comercial alcanzó una resistencia a la tracción de 3.249 MPa, un módulo de elasticidad de 1.284 MPa y una densidad de 1.05 g/mL. Estos resultados respaldan la posibilidad de obtener almidón de fuentes no convencionales para el desarrollo de material biobasados.

En una línea de investigación reciente Fajardo (2023) estudió la producción de bioplásticos a partir de almidón de yuca como potencial aplicación en envases y utensilios desechables. Se obtuvo la modificación del almidón mediante procesos de acilación, la mezcla con polímeros como PVA y goma xantana. Se realizó pruebas de tracción, biodegradabilidad y compostabilidad de acuerdo con las normas ASTM D638 y EN3232:2000

En Guatemala también se han desarrollado investigaciones orientadas al aprovechamiento de fuentes naturales, como el almidón, para la producción de bioplásticos. En la Universidad de San Carlos de Guatemala, (Gálvez, 2016) elaboró plásticos biodegradables a partir de almidón de maíz (*Zea mays*), utilizando glicerina y urea como plastificantes. Los resultados mostraron que los bioplásticos sin urea alcanzaron una resistencia de 11.36 kg/cm², mientras que aquellos con urea presentaron solo 2.89 kg/cm², lo que evidencia el impacto del tipo de plastificante en el desempeño mecánico del material biobasado. Además, se comprobó que estos materiales presentan una degradación entre el 20 % y el 40 % en un periodo de 30 días, lo que demuestra su gran potencial como sustituto de los plásticos derivados del petróleo.

5.2. Resistencia mecánica de plásticos convencionales más utilizados en industrias.

El polietileno de baja densidad (LDPE) es uno de los polímeros sintéticos más utilizados en la industria de empaques debido a su alta flexibilidad, baja densidad (0.91 a 0.94 g/cm³), buena resistencia a la humedad y excelente procesabilidad térmica. Sin embargo, su estructura altamente lineal con numerosas ramificaciones confiere un carácter hidrofóbico y químicamente inerte, lo que lo hace resistente a la degradación natural. Estas propiedades, aunque ventajosas desde el punto de vista funcional, representan un desafío ambiental, ya que los productos fabricados con LDPE como bolsas, envoltorios y películas plásticas pueden persistir en el ambiente por más de 100 años antes de degradarse completamente (Majeed, AlMaadeed & Zagho, 2018).

De acuerdo con Majeed *et al.* (2018), las películas de LDPE convencionales presentan buenas propiedades mecánicas, con resistencias a la tracción entre 12 y 20 MPa y módulos de Young de aproximadamente 200 a 300 MPa, lo que las hace adecuadas para aplicaciones estructurales ligeras y empaques flexibles. No obstante, el LDPE presenta alta permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua, lo que limita su uso en productos que requieren barreras herméticas o conservación prolongada. Además, al ser un polímero de origen fósil, su producción implica un alto consumo energético y una elevada huella de carbono por lo que se busca alternativas de origen biológico que puedan cumplir con alguna de sus funciones.

En el estudio de Tone *et al.* (2024), el polipropileno (PP) fue evaluado como una matriz convencional para películas activas destinadas a empaques alimentarios. En cuanto a sus propiedades mecánicas, el PP presentó una resistencia a la tracción promedio de 31 MPa y un módulo de Young de 0.68 GPa, tanto en dirección longitudinal como transversal, evidenciando una alta capacidad

de deformación con valores de elongación cercanos al 700 %, lo que confirma su carácter flexible y dúctil.

Asimismo, se han realizado estudios por Lu y Menary (2024) donde se llevó a cabo una caracterización detallada de las propiedades mecánicas del polietileno tereftalato (PET) mediante la aplicación de métodos destructivos y no destructivos. Los autores emplearon ensayos de tracción y análisis dinámico-mecánico (DMA), complementados con un enfoque basado en ondas Lamb guiadas, con el propósito de estimar con precisión el módulo de Young del material. Los resultados obtenidos mostraron que el módulo elástico del PET se encuentra entre 3.3 y 3.8 GPa en los ensayos de tracción convencionales, mientras que los valores determinados por métodos dinámicos alcanzaron hasta 5.7 GPa, debido al comportamiento viscoelástico dependiente de la frecuencia

. Estas pruebas permitieron validar la efectividad del método no destructivo para caracterizar materiales poliméricos y evidenciaron la alta rigidez y estabilidad mecánica del PET, propiedades que explican su amplio uso en aplicaciones que requieren resistencia estructural y durabilidad.

6. METODOLOGÍA

6.1. Extracción de almidón del frijol negro

Cristalería y equipo

- Licuadora
- Balanza analítica
- Espátula
- Colador
- Papel aluminio
- Cronómetro
- Fundas ziploc
- Beaker de 400 mL
- Beaker de 250 mL
- Probeta de 10 mL

Reactivos

- 400 gramos de frijol negro
- Agua destilada

Procedimiento:

1. Pesar 400 gramos de frijol negro en una balanza analítica.
2. Transferir los granos a un beaker de 5L y se llenó con agua destilada hasta cubrir completamente los granos.
3. Dejar reposar la mezcla durante 12 horas a temperatura ambiente para facilitar la hidratación del grano.
4. Posteriormente, colar los frijoles con ayuda de un colador y licuarlos en una licuadora doméstica.
5. Licuar durante 5 minutos, realizando pulsos de 1 minuto hasta obtener una mezcla homogénea.

6. Filtrar la mezcla utilizando un colador, conservando el sobrenadante y retirando los residuos de celulosa y fibras.
7. Transferir el sobrenadante a beakers de 400 mL y se dejar reposar durante 24 horas a una temperatura de 4°C a 10°C para permitir la sedimentación del almidón.
8. Extraer cuidadosamente el sobrenadante. Y lavar 10 veces con agua destilada el almidón sedimentado para eliminar la capa grisáceo y purificar el almidón.
9. Colocar el almidón sedimentado en bandejas de aluminio-
10. Secar el almidón en un horno a 40°C durante 20 horas hasta eliminar la humedad residual.
11. Pesar el almidón seco para determinar el rendimiento de extracción a partir de la masa inicial de frijol negro.
12. Almacenar el almidón seco en una bolsa Ziploc a temperatura ambiente para evitar la absorción de humedad y conservar la materia prima hasta su uso posterior.

Ecuación 1. Rendimiento de almidón de frijol negro

$$\% = \frac{\text{masa de almidón seco (g)}}{\text{masa de frijol utilizado (g)}} \times 100$$

6.2. Análisis fisicoquímico para el almidón de frijol negro

6.2.1. Contenido de humedad

Materiales y equipos

- Balanza de humedad OHAUS modelo MB120
- 5 gramos de almidón de frijol
- Espátula

Procedimiento

1. Encender la balanza de humedad marca Ohaus y dejar estabilizar el equipo.
2. Colocar un plato de aluminio limpio y seco para tarar la balanza.
3. Pesar 5.00 g de almidón de frijol negro sobre el plato de pesaje.
4. Programar el método SmartGuide en modo de secado estándar a 150 °C hasta alcanzar peso constante.
5. Iniciar la corrida y, al finalizar, registrar el porcentaje de humedad obtenido.
6. Registrar el valor final mostrado por el equipo en la hoja de resultados.
7. Repetir el procedimiento por triplicado para obtener el promedio y la desviación estándar.

6.2.2. Determinación de la temperatura de gelatinización

Materiales y equipos

- Balanza analítica
- Estufa
- Beaker de 100mL
- Balón aforado de 100mL
- Probeta de 50mL
- Varilla
- Termómetro

Procedimiento

1. Preparar una suspensión al 10 % (m/v) de almidón de frijol negro con agua destilada en un balón aforado de 100 mL.
2. Transferir 50 mL de la suspensión a un beaker de 100 mL y colocar una varilla de vidrio para facilitar la agitación.
3. Colocar el beaker con la solución en un baño María a 60 °C, manteniendo una agitación manual constante.

4. Incrementar gradualmente la temperatura del baño a una razón de 2 °C/min hasta observar la formación de pasta (aumento de viscosidad y pérdida de la estructura granular).
5. Registrar la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que se forma la pasta, correspondiente a la temperatura de gelatinización del almidón.

6.2.3. Análisis de poder de hinchamiento (PH), índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) a 60°C.

Materiales y equipo

- Almidón de frijol negro
- Balanza analítica
- 3 tubos falcón de 50mL
- Beaker de 50 mL
- Baño térmico con control de temperatura
- Centrífuga
- Probeta de 10 mL y 50 mL
- Centrífuga
- Espátula
- Pipeta graduada de 5 mL

Procedimiento

1. Pesar 1.25 g de almidón de frijol negro en tubos Falcón de 50 mL previamente secos y tarados.
2. Añadir 30 mL de agua precalentada a 60°C a cada tubo.
3. Agitar para dispersar la muestra y mantenerla en un baño María a 60°C durante 30 minutos, realizando agitación ocasional.
4. Centrifugar las muestras a 4900 rpm durante 30 minutos a temperatura ambiente.
5. Separar cuidadosamente el sobrenadante del sedimento mediante la decantación controlada.

6. Medir el volumen del sobrenadante en una probeta de 50 mL y tomar 10 mL de este para transferirlo a un beaker de 50 mL.
7. Secar el beaker con el sobrenadante en un horno a 45°C hasta eliminar completamente el contenido de agua.
8. Pesar el residuo seco obtenido en una balanza analítica para calcular la solubilidad del almidón.
9. Determinar el poder de hinchamiento e índice de absorción de agua mediante la diferencia de masa entre el sedimento húmedo y la muestra seca inicial.

Para la determinación de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento utilizar las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2. Índice de absorción de agua (IAA)

$$IAA = \frac{\text{Peso de gel (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}}$$

Ecuación 3. Índice de solubilidad en agua (ISA)

$$ISA(\%) = \frac{\text{Peso solubles (g)} * V * 10}{\text{Peso muestra (g)}}$$

Ecuación 4. Poder de hinchamiento (PH)

$$PH = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de muestra (g)} - \text{Peso solubles (g)}}$$

6.3. Elaboración del material biobasado a base de almidón de frijol negro

Materiales y equipos

- Almidón de frijol negro
- Agua destilada
- Glicerina (99%)
- Ácido acético glacial al 1% (v/v)
- Balanza analítica marca Ohaus
- Pipeta graduada de 1mL
- Pipeta graduada de 5mL
- Beaker de 50mL
- Varilla
- Estufa
- Termómetro
- Cajas Petri de vidrio
- Horno secador
- Bolsas herméticas

Procedimiento

1. Pesar en una balanza analítica la cantidad de almidón de frijol negro correspondiente a cada formulación experimental (1.25 g, 1.50 g y 1.75 g).
2. Colocar el almidón en un beaker de 50 mL y añadir 30 mL de agua destilada.
3. Llevar la suspensión a un baño María a 60 °C, manteniendo la temperatura constante.
4. Añadir 1 mL de glicerina a la solución utilizando una pipeta graduada de 1 mL.
5. Agregar 4 mL de ácido acético al 1 % con ayuda de una pipeta graduada de 5 mL.

6. Agitar constantemente la mezcla con una varilla de vidrio hasta obtener una solución homogénea.
7. Continuar con la agitación y el calentamiento hasta alcanzar la temperatura de gelatinización del almidón.
8. Verter cuidadosamente la solución gelatinizada en cajas Petri limpias y secas, procurando una distribución uniforme.
9. Introducir las cajas Petri en un horno de secado a 45 °C durante 48 horas.
10. Desmoldar cuidadosamente las biopelículas secas para evitar rupturas.
11. Almacenar las biopelículas en bolsas Ziploc herméticas para prevenir la absorción de humedad y conservar sus propiedades.

6.4. Determinación de espesor de los materiales biobasados

Materiales y equipos

- Láminas de la película biobasada
- Calibrador vernier
- Tijeras
- Regla

Procedimiento

1. Cortar para cada formulación, tres probetas de 1.5 cm x 4.5 cm utilizando una regla milimétrica y tijeras para garantizar dimensiones uniformes.
2. Medir el espesor de cada probeta con el calibrador Vernier en tres puntos distintos y registrar los valores obtenidos.
3. Calcular el promedio del espesor de las tres mediciones correspondientes a cada formulación experimental.

6.5. Análisis del contenido de humedad en el bioplástico

Materiales y equipo

- Biopelículas de almidón de frijol negro
- Balanza de humedad Ohaus MB120

Procedimiento

1. Pesar 2.00 g del material biobasado previamente cortando en trozos pequeños y colocarlos en un plato limpio y seco de la balanza de humedad.
2. Programar el equipo a 105 °C en modo de secado estándar, configurando la finalización automática al alcanzar peso constante.
3. Registrar directamente el porcentaje de humedad mostrado por el equipo al finalizar la corrida.
4. Repetir el procedimiento por triplicado para cada formulación experimental y anotar los resultados obtenidos para su análisis estadístico.

6.6. Pruebas de tracción al material biobasado de almidón de frijol negro

Materiales y equipos

- Probeta de 15mm de ancho y 45mm de largo
- Dos clips de carpeta o mini mordazas
- Soporte superior fijo y gancho inferior
- Pesas calibradas de acero inoxidable (50g, 100 g, 200g y 500g)
- Regla

Procedimiento

1. Tomar las probetas del material biobasado previamente medidas en espesor (t) y el ancho (b) y registrar los datos.

2. Trazar en cada probeta dos líneas separadas 20 mm para definir la longitud calibrada (L_0).
3. Colocar los clips superior e inferior a una distancia de 8 mm del borde, dejando entre ellos la zona libre entre clips de la longitud calibrada (L_0).
4. Posteriormente, aplicar carga de menor a mayor utilizando las pesas calibradas; 50, 100, 150, 200 y 500 gramos.
5. En cada incremento se esperar entre 5 a 10 segundos para estabilizarse.
6. Medir la nueva distancia L entre las marcas con una regla y registrar la masa total colgada.
7. Continuar el ensayo hasta la ruptura del material biobasado, donde se registra la masa y la distancia entre las marcas antes de romperse (L_b).
8. Repetir el procedimiento por triplicado para cada formulación del material biobasado, con el fin de obtener los valores promedio y su desviación estándar.

Los cálculos por realizar para la determinación de las pruebas de tracción son:

Ecuación 5. Determinación de fuerza

$$F (N) = m * g$$

Donde:

$m = \text{masa del objeto}$

$g = \text{gravedad}$

Ecuación 6. Cálculo para determinar el área transversal de la muestra

$$A_0 = b * t$$

Donde:

$b = \text{ancho}$

$t = \text{espesor}$

Ecuación 7. Determinación de tensión

$$\sigma = \frac{F (N)}{A_0}$$

Donde:

F = fuerza

A_0 = área superficial

Ecuación 8. Determinación de elongación por unidad de longitud

$$\varepsilon = \frac{L_b - L_0}{L_0}$$

Donde:

L_b = Longitud luego de la aplicación de fuerza antes de romperse

L_0 = Longitud inicial

6.7. Análisis estadísticos

Variables analizadas

- Contenido de humedad % (‘m/m)
- Espesor (mm)
- Módulo de Young (MPa)

Procedimiento

1. Registrar los datos experimentales en las hojas de cálculo de Microsoft Excel, asegurando la identificación de cada formulación y variable analizada.
2. Calcular los parámetros descriptivos de cada conjunto de datos: media aritmética, varianza, desviación estándar y número de observaciones ($n = 3$).
3. Comprobar la homogeneidad de varianzas y la distribución normal de los datos mediante inspección visual de dispersión y cálculo de varianzas.
4. Definir el nivel de significancia para las pruebas de hipótesis en $\alpha = 0.05$ (95 % de confianza).

5. Emplear la prueba t de Student para dos muestras independientes en las variables contenido de humedad y
6. significativas entre los pares de formulaciones (F1–F2, F1–F3, F2–F3).
7. Aplicar la prueba t de Student para muestras emparejadas en la variable Módulo de Young, considerando las comparaciones entre F1–F2 y F1–F3, debido a que las mediciones provinieron de ensayos realizados bajo condiciones controladas y comparables.
8. Establecer como hipótesis nula (H_0) que no existe diferencia significativa entre las medias de las formulaciones ($\mu_1 = \mu_2$).
9. Establecer como hipótesis alternativa (H_1) que existe una diferencia significativa entre las medias ($\mu_1 \neq \mu_2$).
10. Comparar el valor obtenido del estadístico t con el valor crítico determinado para los grados de libertad (2) y nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$).
11. Determinar la significancia estadística según los criterios:
 - a. Si $p \leq 0.05 \rightarrow$ Rechazar H_0 (existe diferencia significativa).
 - b. Si $p > 0.05 \rightarrow$ No rechazar H_0 (no existe diferencia significativa).
12. Analizar los valores de t y p obtenidos para cada comparación, identificando que mostraron diferencias significativas entre formulaciones.

Para calcular el valor estadístico t se utiliza la siguiente ecuación

Ecuación 9. Determinación del valor estadístico t

$$t = \frac{(\overline{X}_1 - \overline{X}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Donde:

$\overline{X}_1, \overline{X}_2$ = medias de cada formulación

s_1^2, s_2^2 = varianzas

n_1, n_2 = número de observaciones por grupo

7. RESULTADOS

7.1. Resultados obtenidos de la extracción de almidón de frijol negro

Tabla 4. Rendimiento de almidón de frijol negro crudo (*Phaseolus vulgaris* L)

Pruebas	Rendimiento ($\pm 0.0002\%$)	Promedio	Desviación estándar
1	12.8964	13.48%	0.51
2	13.7946		
3	13.7618		

Fuente: Elaboración propia

Se muestra en triplicado el porcentaje de rendimiento de la extracción de frijol negro por cada 400 gramos de frijol, asimismo se realizó el promedio y desviación estándar. Realizado en base a (Gurunathan *et al.*, 2025).

Tabla 5. Contenido de humedad del almidón de frijol negro

Prueba No.	Porcentaje de humedad ($\pm 0.01\%$)	Promedio	Desviación estándar
1	13.48	12.75%	0.64
2	12.51		
3	12.26		

Fuente: Elaboración propia

Se presenta el porcentaje de humedad obtenido de almidón de frijol negro en triplicado obtenidos a partir de una balanza de humedad marca Ohaus modelo MB120. Realizado en base a (Gurunathan *et al.*, 2025).

Tabla 6. Pruebas de solubilidad, poder de hinchamiento y absorción de agua en almidón de frijol negro (*Phaseolus vulgaris L*)

Propiedad	Temperatura a 60°C			Promedio	Desviación estándar
	1	2	3		
Solubilidad (%)	4.2345 ± 0.00086	4.4934 ± 0.00085	4.3926 ± 0.000885	4.404	0.0008
Poder de hinchamiento (g/g)	2.040 ± 0.00029	2.310 ± 0.00032	1.946 ± 0.00028	2.099	0.1887
Absorción de agua (g/g)	2.008 ± 0.00086	2.273 ± 0.00085	1.916 ± 0.00085	2.065	0.1854

Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos de la solubilidad (ISA), poder de hinchamiento (PH) e índice de absorción de agua (IAA) del almidón extraído de frijol negro. Se presenta el promedio y la desviación estándar. Realizado en base a (Gurunathan *et al.*, 2025)

Tabla 7. Temperatura de gelatinización de almidón extraído de frijol negro (*Phaseolus vulgaris L.*)

Prueba No.	Temperatura de gelatinización (±0.25 °C)	Promedio	Desviación estándar
1	87	86.33°C	1.15
2	85		
3	87		

Fuente: Elaboración propia

Se presentan en triplicado la temperatura de gelatinización de almidón con el promedio y desviación estándar. Realizado en base a (Ichina, 2021).

7.2. Datos obtenidos de formulaciones para la elaboración del material biobasado

Tabla 8. Formulaciones realizadas para la elaboración de biopelículas.

Formulación	Cantidad			
	Almidón (± 0.0001 g)	Glicerina (± 0.03 mL)	Ácido acético (± 0.03 mL)	Agua (± 0.5 mL)
F1	1.25	1	4	30
F2	1.50	1	4	30
F3	1.75	1	4	30

Fuente: Elaboración propia

Se observa las formulaciones para la elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro. Se presenta la variación de concentración de almidón y las cantidades de plastificantes como agua. Realizado en base a (Ichina, 2021).

Nota. El diseño experimental se limitó a este rango (1.25g-1.75g) bajo el criterio de minimizar la materia prima. Se obtuvo una biopelícula funcional utilizando la menor cantidad posible de polímero. Se descartaron concentraciones mayores a 1.75g ya que implicaban un consumo excedente de materia prima y concentraciones inferior a 1.25g no fueron capaces de formar una matriz polimérica.

7.3. Evaluación cualitativa de los materiales biobasados obtenidos

Tabla 9. Resultados de análisis sensorial en las películas biobasadas.

Formulación	Almidón (± 0.0001 g)	Formación de biopelícula	Fácil moldeado	Transparencia
F1	1.25	Sí	Sí	Sí
F2	1.50	Sí	Sí	Sí
F3	1.75	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis sensorial de las formulaciones para cualificarlos y posteriormente realizarle pruebas fisicoquímicas y mecánicas. Realizado en base a (Ichina, 2021).

7.4. Pruebas fisicoquímicas y mecánicas realizadas en el material biobasado a base de almidón de frijol negro

Tabla 10. Resultados de ensayos para la determinación de espesor del material biobasado

Formulación	No. de réplica	Espesor (± 0.001 mm)	Promedio	Desviación estándar
F1	1	0.055	0.563	0.0032
	2	0.060		
	3	0.054		
F2	1	0.065	0.0617	0.0035
	2	0.058		
	3	0.062		
F3	1	0.075	0.0717	0.0031
	2	0.071		
	3	0.069		

Fuente: Elaboración propia

Se presenta las tres formulaciones. Se realizó las mediciones en triplicado, al igual que se determinó el promedio y la desviación estándar.

Tabla 11. Determinación de contenido de humedad de los materiales biobasados

Formulación	No. de réplica	Porcentaje de humedad (± 0.01 %)	Promedio	Desviación estándar
F1	1	23.33	22.55	0.9641
	2	21.47		
	3	22.84		
F2	1	18.36	19.33	0.8377
	2	19.84		
	3	19.78		
F3	1	20.47	19.32	1.0029
	2	18.83		
	3	18.65		

Fuente: Elaboración propia

Se muestra el porcentaje de humedad obtenido por cada formulación, además de su promedio y desviación estándar. Se realizó con el fin de caracterizar el material biobasado.

Tabla 12. Resultados de pruebas de tracción por formulación de las películas biobasadas

Formulación	Módulo de Young (MPa)	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación (%)
F1	12.5145 ± 0.370	1.76	1.908 ± 0.055	10 ± 0.05
F2	28.0369 ± 0.832	1.96	2.322 ± 0.067	5 ± 0.03
F3	29.4112 ± 0.870	3.92	3.650 ± 0.106	10 ± 0.04

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los resultados de la carga máxima, el módulo de Young, el esfuerzo y elongación de cada material biobasado.

7.5. Análisis estadístico de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las películas biobasadas en almidón de frijol negro.

Tabla 13. Prueba t student para las formulaciones F1 y F2 sobre el contenido de humedad en las biopelículas.

Comparación	F1 – F2	F1 – F3	F2 – F3
Estadístico t	3.328	6.671	0.009
Grados de libertad	2	2	2
P(T<=t) una cola	0.0398	0.0109	0.4967
P(T<=t) dos colas	0.0796	0.0217	0.9933
Valor crítico t (una cola)	2.920	2.912	2.920
Valor crítico t (dos colas)	4.303	4.303	4.303

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los resultados de la prueba t para cada formulación respecto al contenido de humedad con el fin de compararlos, indicando diferencias

significativas entre las formulaciones F1-F2 y F1-F3. Mientras que entre las formulaciones con mayor concentración F2 y F3 no existe una diferencia.

Nota. Los valores de $p \leq 0.05$ se consideran estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). En estos casos, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que existe una diferencia real entre las formulaciones.

Tabla 14. Prueba t student para las formulaciones respecto al espesor de las biopelículas.

Comparación	F1 – F2	F1 – F3	F2 – F3
Estadístico t	-1.4368	-5.889	-5.774
Grados de libertad	2	2	2
P(T<=t) una cola	0.1437	0.0138	0.0144
P(T<=t) dos colas	0.2873	0.0276	0.0287
Valor crítico t (una cola)	2.920	2.922	2.920
Valor crítico t (dos colas)	4.303	4.303	4.303

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los resultados de la prueba t para cada formulación respecto al espesor. El espesor entre F1 y F3 una diferencia los datos significativos. Mayor concentración de almidón se produjeron películas más gruesas. Lo mismo se observa entre la formulación F2 y F3.

Nota. Los valores de $p \leq 0.05$ se consideran estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). En estos casos, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que existe una diferencia real entre las formulaciones.

Tabla 15. Prueba t student en las formulaciones de acuerdo con el módulo de Young.

Parámetro	F1 – F2	F1 – F3	F2 – F3
Estadístico t	-8.570	-7.324	-2.703
Grados de libertad	2	2	2
P(T<=t) una cola	0.0068	0.0091	0.0570
P(T<=t) dos colas	0.0133	0.0181	0.1139
Valor crítico t (una cola)	2.920	2.912	2.920
Valor crítico t (dos colas)	4.303	4.303	4.303

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los resultados de la prueba t student en las formulaciones respecto a el módulo de Young. Donde las formulaciones F1-F2 y F1-F3 presentaron una diferencia significativa.

Nota. Los valores de $p \leq 0.05$ se consideran estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). En estos casos, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que existe una diferencia real entre las formulaciones.

8. ANÁLISIS DE RESULTADO

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un material biobasado a partir del almidón extraído de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.), con el propósito de evaluar su potencial aplicación en la industria. Para ello, se obtuvo el almidón mediante un proceso de extracción húmeda y se determinó su rendimiento, seguido de pruebas fisicoquímica a través de ensayos de solubilidad, poder de hinchamiento, índice de absorción de agua y temperatura de gelatinización. Posteriormente, se realizaron tres formulaciones con tres repeticiones variando la cantidad de almidón (1.25 g, 1.50 g, 1.75 g); este rango experimental fue seleccionado tras identificar que concentraciones inferiores a 1.25 g no lograban formar una matriz continua y cohesiva, mientras que concentraciones superiores a 1.75 g resultaban en materiales con rigidez excesiva y pérdida de flexibilidad. Para cada biopelícula, utilizando glicerina al 99 % y ácido acético glacial al 5 % (v/v) para evaluar sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas, con el objetivo de identificar la formulación con mejores características para su potencial uso en aplicaciones industriales.

El almidón de frijol negro se obtuvo mediante el método de vía húmeda, triturando los granos previamente remojados, filtrando la suspensión y recuperando el almidón por sedimentación. El sedimento se secó a 40 °C, se pulverizó hasta obtener un polvo homogéneo y se almacenó herméticamente para su posterior análisis. De acuerdo con el resultado obtenido en la tabla 3, se presenta el rendimiento promedio fue de 13.48% (m/m) lo que demostró que el método de extracción por vía humedad fue efectiva para extraer almidón de *Phaseolus vulgaris* L. Este valor fue menor en comparación con otras legumbres como el garbanzo con 30 %, semillas de *Okenia hypogaea* con 75 % y frijol común con 36% (Corzo-Ríos *et al.*, 2000).

El bajo rendimiento de almidón en el frijol negro fue posiblemente debido al método de extracción donde al filtrar los granos de mayor tamaño se quedaron en el colador junto con residuos de fibra y celulosa, a su vez, la suspensión con almidón sedimentada se lavó 10 veces para separar la capa oscura grisácea del líquido sobrenadante con el fin de aclarar el almidón lo que pudo ocasionar pérdidas del material.

A pesar del bajo rendimiento obtenido a comparación del rendimiento de frijol común (36 %) se obtuvo un polvo blanco fino que demuestran que el frijol negro es una fuente potencial para extraer almidón, pero el proceso podría aumentar utilizando pretratamientos alcalinos o físicos como mayor tiempo de homogenización usando licuadoras industriales para romper las estructuras celulares del grano y liberar con mayor facilidad los gránulos de almidón.

Durante el proceso de extracción húmeda del almidón de frijol negro se genera un residuo sólido rico en fibra dietética (15.50 g / 100 g), proteínas (21.60g/100g) y minerales como el fósforo (352mg), calcio (123 mg), hierro (5.02 mg) y potasio (1483 mg) que llegan a constituir el 86 % (m/m) de los residuos (INCAP, 2018).

Por lo que estos pueden ser deshidratados y mediante un proceso de molienda se obtendría una pasta que se reincorpore como ingrediente fortificante en panificación o para la producción de concentrados proteicos animales, aprovechando también su contenido energético de 341 Kcal (INCAP, 2018).

En cuanto al contenido de humedad promedio del almidón de frijol negro fue de 12.75% (m/m) dicho valor se encuentra dentro del rango recomendado para almacenamiento de almidones secos que es entre el 10 % y 14 % (Miranda Villa *et al.*, 2013). Por lo que el proceso de secado fue adecuado para eliminar la cantidad necesaria de agua libre sin dañar o alterar la estructura del almidón. La humedad residual en almidones influye en su preservación, ya que a niveles superiores al 15

% pueden proliferar microorganismo o bien causar retrogradación (Grafia *et al.*, 2023). En este caso, el valor obtenido, indica que el material puede preservarse y ser utilizado posteriormente para la elaboración de material biobasados.

El almidón de frijol negro presentó un valor promedio de solubilidad de 4.40 % (m/m), poder de hinchamiento de 2.10 g/g e índice de absorción de agua de 2.07 g/g a 60 °C (Ver Tabla 5) que demuestran un comportamiento típico de los almidones provenientes de legumbres que se distinguen por su baja solubilidad y capacidad de hinchamiento (Miranda-Villa *et al.*, 2013). Dicho comportamiento se debe a las interacciones entre las cadenas de almidón de la amilosa y amilopectina (dominios amorfo y cristalino) en la estructura interna de los gránulos que limitan la penetración del agua y por tanto la expansión de la estructura (Miranda Villa *et al.*, 2013).

El valor de solubilidad obtenido para el almidón de frijol negro (4.40 %) fue superior al reportado por Miranda *et al.* (2013) para el almidón de frijol Zaragoza (*Phaseolus lunatus L.*), que presentó una solubilidad de 2.03 % y una capacidad de retención de agua de 2.8 %. Esta diferencia sugiere que el almidón de frijol negro posee una estructura granular menos compacta y con menor proporción de amilosa, lo que facilita la difusión del agua hacia el interior del gránulo y la dispersión parcial de las cadenas durante el calentamiento. En cambio, el almidón de frijol Zaragoza mostró un hinchamiento restringido y baja solubilidad, lo que indica una mayor cohesión molecular debida a enlaces de hidrógeno más fuertes y una organización interna más ordenada.

Al comparar los resultados con los del almidón de ñame, reportados por Alvis *et al.* (2008), que presentó una solubilidad de 1.25 % y una capacidad de retención de agua de 2.3 %, se observa una diferencia aún más marcada. El almidón de ñame contiene un porcentaje de amilosa más elevado (25–27 %), lo cual refuerza las interacciones entre cadenas lineales, limitando el hinchamiento y reduciendo la solubilidad. En contraste, el almidón de frijol negro, con una menor

proporción de amilosa, exhibe una mayor interacción con el agua y una estructura más flexible.

Por otra parte, el poder de hinchamiento promedio (2.10 g/g) coincide con lo reportado por Gani *et al.*, (2016) en almidones de frijol rojo cuyos valores oscilaron entre 1.62–2.13 g/g a 60 °C. El almidón de frijol posee una estructura semicristalina que se expande lentamente a medida que la temperatura incrementa ya que las fuerzas intragranulares tienden a debilitarse sin romper completamente los gránulos (Hoover & Sosulski, 1985). Sin embargo, comparado con almidones de cereales o tubérculos, los cuales pueden alcanzar valores de hinchamiento superiores a 8 - 12 g/g el frijol negro mantiene una menor capacidad de expansión, característica que contribuye a su mayor resistencia térmica.

De la misma manera, el índice de absorción de agua (2.07 g/g) complementa el estudio del almidón de frijol negro ya que este indica la capacidad de retener agua dentro de sus gránulos. Dicho valor bajo es típico en los almidones de leguminosas, ya que, en un estudio similar por Miranda *et al.*, (2013) de almidón *P. Lunatus* reportó un IAA de 2.80 g/g a 60 °C por su organización molecular más compacta de amilosa y amilopectina. Al comparar este valor con el autor Moorthy (2002) se reportaron valores superiores para el almidón de ñame de 2.55 g/g, para la papa de 5.83 g/g y para la yuca entre 0.82 a 15 g/g. Por lo que se demuestra que los almidones de tubérculos poseen una mayor capacidad de hidratación (Wani *et al.*, 2010). Por lo tanto, estos valores pueden contribuir a la formulación de biopelículas con menor sensibilidad higroscópica y mayor durabilidad durante su almacenamiento.

En cuanto a los resultados de la tabla 6, la temperatura promedio de gelatinización obtenida fue de 86.13 °C, valor en el cual las muestras de almidón presentaron un cambio de coloración de amarillo a azul intenso al aplicar la prueba con reactivo de Lugol, indicando la pérdida progresiva de la estructura cristalina. Este comportamiento se explica porque, al someter los gránulos de almidón a

temperaturas elevadas en presencia de agua, las moléculas comienzan a absorber humedad, incrementando su volumen y provocando la ruptura de los enlaces de hidrógeno que mantienen unidas las cadenas de amilosa y amilopectina (Abe *et al.*, 2021) Como consecuencia, los gránulos se hinchan, se desorganizan y pierden su ordenamiento cristalino, dando lugar a una suspensión más viscosa y opaca característica del proceso de gelatinización.

Resultados similares fueron reportados por Chang *et al.* (2018) en almidón de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), con un rango de gelatinización entre 73.4 °C y 79.1 °C. De igual forma, Pérez *et al.* (2006), en un estudio realizado en México con almidón de *Phaseolus lunatus*, determinaron temperaturas entre 75.2 °C y 87.6 °C, lo que ubica el valor obtenido en este trabajo dentro del rango esperado para leguminosas. Sin embargo, al compararlo con otras fuentes de almidón como maíz (62–73 °C), arroz (68–78 °C), papa (56–67 °C) y trigo (58–64 °C), se observa que el almidón de frijol negro presenta una mayor estabilidad térmica. Esto puede atribuirse a su mayor grado de cristalinidad y a la fuerte interacción entre las cadenas lineales de amilosa y las ramificaciones de amilopectina, lo que confiere una estructura más compacta y resistente a la desorganización térmica durante el proceso de calentamiento y secado.

Posterior al análisis fisicoquímico del almidón de frijol negro se llevó a cabo tres formulaciones para la elaboración del material biobasado a partir de almidón donde la variable independiente fue la cantidad de almidón (Ver Tabla 7) con el fin de evaluar su efecto en la formación de biopelículas mientras que las demás condiciones como el volumen de agua (30mL), glicerina al 99% (1 mL) y ácido acético al 5 % (v/v) se mantuvieron constante de acuerdo con estudios previos (Dominguez, 2022) con el fin de garantizar la reproducibilidad del procedimiento y la comparación directa entre formulaciones .

A partir de la evaluación física inicial de las biopelículas se seleccionaron las formulaciones correspondientes a las formulaciones F1, F2, F3 diferenciadas

por la concentración de almidón empleada (F1: 1.25 g, F2: 1.50 g y F3: 1.75 g) para la realización de pruebas fisicoquímicas y mecánicas. Como se observa en el Tabla 8, las tres formulaciones lograron generar biopelículas transparentes, flexibles y con buena uniformidad, demostrando una gelatinización efectiva del almidón de frijol negro en presencia de plastificantes y agentes acidulantes. Sin embargo, las biopelículas obtenidas mostraron fragilidad y baja resistencia a la tracción por lo que se limita su aplicación directa. Coincidiendo con lo reportado por Abe *et al.*, (2021) donde estos materiales basados únicamente en almidón por su naturaleza hidrofílica su interacción entre las cadenas poliméricas es débil posterior al proceso de secado.

El espesor resultante de cada formulación osciló entre 0.056 y 0.072 mm (ver Tabla 9), mostrando un incremento conforme aumentó la cantidad de almidón utilizada en cada formulación: F1 (1.25 g), F2 (1.50 g) y F3 (1.75 g). Este aumento puede atribuirse a la mayor viscosidad de la mezcla inicial en formulaciones con mayor concentración de almidón, lo que reduce la evaporación del solvente y favorece la formación de una capa más densa durante el secado a 45 °C por 48 horas. El análisis estadístico mediante la prueba t de Student (ver Tablas 16–18) confirmó estas diferencias, indicando que las comparaciones F1–F3 y F2–F3 presentaron variaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$), mientras que entre F1 y F2 no se observó una diferencia relevante ($p = 0.144$). Esto demuestra que el incremento del contenido de almidón por encima de 1.50 g influye de forma directa en el grosor final de la película, mientras que las formulaciones de 1.25 g y 1.50 g producen espesores estadísticamente similares. Estos resultados coinciden con lo reportado por Cuyumba y Quispe (2024), quienes observaron en biopelículas de almidón de cáscara de Musa sp. un comportamiento similar, donde el incremento del contenido de polímero produjo un aumento del espesor y favoreció una mayor cohesión estructural, reflejada en biopelículas más gruesas, con menor permeabilidad y con mayor resistencia mecánica debido al incremento en el entrecruzamiento físico dentro de la matriz polimérica.

En cuanto al contenido de humedad se obtuvo una disminución al aumentar la cantidad de almidón (Ver tabla 10). Se observa que la formulación F1 (1.25 g) un valor más alto de 22.44 %, seguido de F2 (1.50 g) con 19.33 % y F3 (1.50 g) con 19.32 %. Esta tendencia fue confirmada mediante el análisis estadístico con la prueba t de Student, donde se evidenció una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las formulaciones F1–F3 y F1–F2, mientras que entre F2–F3 no se observaron diferencias estadísticamente relevantes ($p=0.497$). Estos resultados indican que el incremento de almidón por encima de 1.50 g (F2) no modifica de manera sustancial la capacidad del material para retener humedad, pero sí existe una reducción significativa cuando la concentración inicial de almidón aumenta desde 1.25 g (F1).

Esto puede deberse a la glicerina que interactúa con un mayor número de cadenas poliméricas de almidón. Cuando la concentración de almidón se aumenta, las moléculas del glicerol encuentran menos grupos hidroxilo disponibles para reaccionar, por lo que se reduce la capacidad de retención de agua.

Asimismo, la variación observada puede estar influenciada por las condiciones de operación, ya que la glicerina, al ser un compuesto higroscópico, puede absorber vapor de agua después del secado. Este fenómeno se evidenció principalmente en la formulación F1 con la menor concentración de almidón (1.25 g), cuyas biopelículas, más delgadas, presentaron una mayor superficie expuesta al aire, favoreciendo la reabsorción de humedad ambiental durante el almacenamiento. Esta reabsorción es común en material biobasados con alta proporción de glicerol, como lo señala Madarina *et al.* (2023), quienes observaron que los materiales plastificados con glicerina presentan una tendencia a equilibrarse con la humedad del ambiente, afectando su estabilidad dimensional.

Las biopelículas elaboradas a partir de almidón de frijol negro presentaron una resistencia a la tracción máxima en la formulación (F3) (1.75 g almidón) de 3.65 MPa y un módulo de Young de 29.4 MPa, valores característicos de

termoplásticos de almidón (TPS) con alto contenido de plastificante. Respecto al análisis estadístico se obtuvo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las formulaciones F1-F2 y F1-F3 ya que el aumentar la concentración de almidón este también aumento la rigidez del material elaborado. No obstante, entre las formulaciones F2 con 1.50 g de almidón y F3 con la mayor concentración de almidón 1.75g no se observaron diferencias estadísticas por lo que a partir de la concentración de 1.50g (F2) de la matriz alcanzó un punto de saturación donde la rigidez no incrementa significativamente ($p = 0.0570$).

Estos resultados son coherentes con lo reportado por Falua *et al.* (2022), quienes indican que el tipo y la concentración de plastificante influyen significativamente en las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera de los materiales a base de almidón, ya que los plastificantes aumentan el volumen intersticial en la matriz polimérica y reducen los enlaces polímero-polímero, lo que disminuye la rigidez, pero incrementa la flexibilidad del material. En este caso, la glicerina, empleada posee un alto poder plastificante debido a su pequeño tamaño de cadena y alta hidrofiliidad, lo que explica la baja resistencia mecánica y la alta capacidad de deformación observadas en las biopelículas obtenidas.

De acuerdo con Falua *et al.* (2022), bioplásticos de almidón elaborados con glicerol (G), sorbitol (S) o mezclas G/S (glicerol/sorbitol) en concentraciones de 15–45 % (m/m, base almidón) presentan resistencias a la tracción que oscilan entre 9.59–1.67 MPa (G), 28.35–5.84 MPa (S) y 15.82–3.99 MPa (G/S), respectivamente. Estos valores son comparables con los obtenidos en el presente trabajo, donde la biopelícula con mayor concentración de almidón (F3) alcanzó 3.65 MPa, lo que confirma que el uso de glicerina como plastificante favorece la flexibilidad y la homogeneidad, pero reduce la resistencia estructural del material.

Asimismo, se ha reportado que en material biobasados de almidón de ñame con diferentes proporciones de glicerina (0–40 %, m/m), la resistencia disminuye de 49 a 10 MPa, mientras que la elongación y la permeabilidad al vapor de agua

aumentan (Abe *et al.*, 2021). Estos resultados respaldan la tendencia observada en este estudio, donde las biopelículas de frijol negro mostraron alta flexibilidad, pero baja rigidez, consecuencia directa de la acción plastificante de la glicerina, que interrumpe los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de amilosa y amilopectina.

Cuando se comparan los valores de tracción obtenidos con otros bioplásticos de almidón modificados o reforzados, se observa que las películas de almidón reforzadas con extractos vegetales o fibras naturales pueden alcanzar resistencias de 16 a 19 MPa (Falua *et al.*, 2022), mientras que los biopolímeros comerciales como el ácido poliláctico (PLA) presentan valores de 50 a 70 MPa y un módulo de Young cercano a 3 GPa. Esto confirma que el material biobasado desarrollado a partir de almidón de frijol negro no compite con materiales estructurales, sino que se ubica dentro de la categoría de filmes de baja carga mecánica, comparables con bioplásticos termoplásticos de almidón sin refuerzo.

Considerando la baja carga mecánica y la naturaleza hidrofílica del material, su aplicación industrial se proyecta más allá de los envases primarios que son utilizados en el sector alimenticio para recubrimientos de alimentos, películas de envoltura en alimentos secos, semisecos, entre otros (Gamage *et al.*, 2022) .

Este biopolímero puede ser utilizado para películas de acolchado agrícola donde se requiere que el material proporcione cobertura al suelo para prevenir el crecimiento de malezas (Gamage *et al.*, 2022). Asimismo, su solubilidad y flexibilidad lo postulan como candidato para empaques hidrosolubles de dosis unitarias, por ejemplo, de detergentes o agroquímicos o bien, como recubrimiento interno de cartón y papel para sustituir ceras sintéticas en cajas de transporte de frutas secas.

En el marco de la industria farmacéutica de acuerdo con Gheorghita *et al.* (2021), los biopolímeros basados en almidón se pueden utilizar para el desarrollo de sistemas de liberación controlada de fármacos y encapsulación de probióticos. Donde las películas desarrolladas pueden ser aplicadas para envolver compuestos probióticos o drogas con el fin de evitar degradación enzimática.

Para expandir la aplicabilidad industrial del material biobasado hacia productos de mayor resistencia, se podría realizar mezclas de plastificantes (glicerol/sorbitol) o la incorporar refuerzos naturales como nanocelulosa o quitosano, los cuales, según Falua *et al.* (2022), pueden elevar la resistencia de los materiales de almidón hasta valores cercanos a 15–20 MPa.

9. CONCLUSIONES

1. Se logró extraer almidón a partir de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) mediante el método de extracción húmeda, obteniendo un rendimiento del 13.48 % (m/m). El almidón presentó una solubilidad de 4.40 % (m/m), un poder de hinchamiento de 2.10 g/g y un índice de absorción de agua de 2.73 g/g, características con las que se infiere su capacidad para interactuar con el agua y formar matrices cohesivas, confirmando su potencial como materia prima biobasada para la elaboración de biopelículas.
2. Se elaboraron biopelículas a partir del almidón obtenido, evaluando el efecto de diferentes concentraciones de almidón sobre sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas. El análisis estadístico mediante la prueba t de Student evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de humedad, espesor y módulo de Young entre las formulaciones, comprobando que, al aumentar la concentración de almidón, disminuye la humedad y aumenta la rigidez y el espesor del material. Con ello se demostró que la proporción almidón/glicerina permite modular las propiedades del biomaterial para obtener películas más flexibles o compactas según la aplicación.
3. Se compararon las propiedades del material desarrollado con otros biopolímeros y plásticos convencionales, determinándose que las biopelículas de almidón de frijol negro se comportan como filmes de baja carga mecánica, similares a los termoplásticos de almidón sin refuerzo. Aunque su resistencia a la tracción (3.65 MPa) y su módulo de Young (29.4 MPa) son menores en comparación con polímeros industriales como el PLA o el LDPE, destacan por su flexibilidad, transparencia y homogeneidad estructural.

10. RECOMENDACIONES

- Analizar la dependencia del rendimiento de extracción con respecto a la porosidad de la malla filtrante, utilizando diferentes tamaños de abertura con el fin de minimizar la pérdida de gránulos de almidón durante la separación de la fibra y la celulosa.
- Estudiar el proceso de secado del almidón, evaluando temperaturas inferiores a 40 °C y diferentes tiempos de exposición para evitar alteraciones en la morfología de los gránulos. Asimismo, analizar la influencia de la velocidad del flujo de aire y la humedad relativa durante el secado, considerando alternativas como el secador de bandejas con flujo de aire controlado o el secado por atomización para disminuir la humedad residual del producto final.
- Determinar las cinéticas del proceso asociadas a la extracción húmeda del almidón (rendimiento vs. tiempo, relación sólido-líquido, agitación, temperatura y tamaño de partícula) y la deshidratación del residuo (curvas de secado y modelo cinético de pérdida de humedad), con el objetivo de estimar parámetros de velocidad y condiciones de operación.
- Determinar el comportamiento térmico del almidón mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el objetivo de conocer las transiciones térmicas, estabilidad y degradación del material.
- Evaluar la incorporación de agentes de refuerzo biodegradables, como fibras de celulosa, quitosano o nanocelulosa, con el propósito de mejorar la resistencia a la tracción, la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas del material biobasado.

- Determinar la biodegradabilidad de las biopelículas bajo condiciones controladas (compostaje, suelo y agua), siguiendo normas internacionales como ASTM D5338 o ISO 14855, para obtener el tiempo de degradación del material biobasado y su impacto ambiental.
- Para aplicaciones en la industria alimentaria, realizar pruebas microbiológicas que garanticen la inocuidad del material biobasado al estar en contacto con alimentos de distinta naturaleza, como productos grasos, acuosos o ácidos.

11. BIBLIOGRAFÍA

Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021). Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers*, 13(15), 2484. <https://doi.org/10.3390/polym13152484>

Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., & Kumar, A. (2022). Biopolymer: A Sustainable Material for Food and Medical Applications. *Polymers*, 14(5), 983. <https://doi.org/10.3390/polym14050983>

Beltrán, M. (2011). *Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros*. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/16883>

Cervera, M., & Blanco, E. (2002). *Mecánica de estructuras* (2a. ed., reimp). A Edicions UPC.

Cortizo, M. S., Oberti, T. G., & Peruzzo, P. J. (2023). *Introducción a la síntesis de polímeros*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/161059>

Cuyumba, L., & Quispe, M. (2024). *Efecto de los plastificantes sobre la biodegradabilidad y propiedades mecánicas del bioplástico a partir de almidón de cáscara de Musa sp.* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/11743/T010_46537_392_T%20-%20T010_73610063_T.pdf?sequence=14&isAllowed=y

DIGEGR. (2023). *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Estimación de Producción de Granos Básicos (maíz y frijol) por departamento, año 2023*. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos.

Donoso, S., & Wechsler, A. (2020). Los materiales bio basados y el paradigma desarrollista latinoamericano: Perspectivas desde el Diseño industrial. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 114, 71. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi114.4116>

European Bioplastics. (2021). *Bioplastics Market Development Update 2021*. <https://docs.european->

bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_s
hort_version.pdf

European Bioplastics. (2023). *Biopolymers, facts and statistics*. Institute for Bioplastics and Biocomposites.

Falua, K. J., Pokharel, A., Babaei-Ghazvini, A., Ai, Y., & Acharya, B. (2022). Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers*, 14(11), 2215. <https://doi.org/10.3390/polym14112215>

Fortune Business Insights. (2025). *Tamaño del mercado bioplástico, crecimiento, acción, análisis, informe, 2032*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/bioplastics-market-101940>

Gálvez, A. (2016). *Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz (Zea mays)*. [Univesidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5102/>

Gamage, A., Liyanapathirana, A., Manamperi, A., Gunathilake, C., Mani, S., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Applications of Starch Biopolymers for a Sustainable Modern Agriculture. *Sustainability*, 14(10), 6085. <https://doi.org/10.3390/su14106085>

García-Guzmán, L., Cabrera-Barjas, G., Soria-Hernández, C. G., Castaño, J., Guadarrama-Lezama, A. Y., & Rodríguez Llamazares, S. (2022). Progress in Starch-Based Materials for Food Packaging Applications. *Polysaccharides*, 3(1), 136-177. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010007>

Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A Comprehensive Review of Biodegradable Polymer-Based Films and Coatings and Their Food Packaging Applications. *Materials*, 15(17), 5899. <https://doi.org/10.3390/ma15175899>

Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., & Čep, R. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*, 15(1), 15264. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>

Hassan, M., Bai, jun, & Dou, D.-Q. (2019). Biopolymers; Definition, Classification and Applications. *Egyptian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2019.6967.1580>

Hoover, R., & Sosulski, F. (1985). *Studies on the Functional Characteristics and Digestibility of Starches from Phaseolus vulgaris Biotypes—Hoover—1985—Starch—Stärke—Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/star.19850370602>

Ichina, J. (2021). *Obtención de plásticos biodegradables a partir de almidón de fréjol negro (Phaseolus vulgaris L.) para envoltura de alimentos*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

INCAP. (2018). *Tabla de Composición de Alimentos de Centroamérica*. Instituto de Nutricion de Centroamérica y Panamá.

Lara-Gómez, A. B., Aguirre-Loredo, R. Y., Castro-Rosas, J., Rangel-Vargas, E., Hernández-Juárez, M., & Gómez-Aldapa, C. A. (2022). Películas de almidón de papa (*Solanum tuberosum* L.), empaques innovadores para alimentos: Una revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), Article 19. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.8965>

Madarina, A., Irawan, B., & Sunarso, S. (2023). *Effect of glycerin as a plasticizer on flexural strength in the fabrication of gypsum-based chip* (12:1460). F1000Research. <https://doi.org/10.12688/f1000research.139416.1>

Martín-Sánchez, M., Martín-Sánchez, M. T., & Pinto, G. (2013). Reactivo de Lugol: Historia de su descubrimiento y aplicaciones didácticas. *Educación Química*, 24(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)73192-6](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)73192-6)

Meaño Correa, N., Ciarfella Pérez, A. T., & Dorta Villegas, A. M. (2014). Evaluación de las propiedades químicas y funcionales del almidón nativo de ñame congo (*Dioscorea bulbifera* L.) para predecir sus posibles usos tecnológicos. *Saber*, 26(2), 182-188. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1315-01622014000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Miranda-Villa, P. P., Marrugo-Ligardo, Y. A., & Montero-Castillo, P. M. (2013). Caracterización Funcional del Almidón de Fríjol Zaragoza (*Phaseolus*

Lunatus L.) y Cuantificación de su Almidón Resistente: Functional Characterization of Bean Zaragoza Starch (Phaseolus Lunatus L.) and Quantification of the Resistant Starch. *TecnoLógicas*, (30), 17-32. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-77992013000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Muniasamy, S., Muniasamy, S., Mohanrasu, K., Mohanrasu, K., Gada, A., Gada, A., Mokhena, T. C., Mokhena, T. C., Mtibe, A., Boobalan, T., Paul, V., & Arun, A. (2019). Biobased Biodegradable Polymers for Ecological Applications: A Move Towards Manufacturing Sustainable Biodegradable Plastic Products. En S. ul-Islam (Ed.), *Integrating Green Chemistry and Sustainable Engineering* (1.^a ed., pp. 215-253). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119509868.ch8>

Negrete-Bolagay, D., & Guerrero, V. H. (2024). Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics: Perspectives from Formulation, Processing, and Performance. *Polymers*, 16(18), 2561. <https://doi.org/10.3390/polym16182561>

Ortiz, M., & Cruz, A. (2022). Determinación del módulo de Young. *Vol. 9*. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/issue/archive>

Pedrosa, M. T., Sampaio, U. M., & Schmiele, M. (2019). Chapter 2—Identification and Analysis of Starch. En M. T. P. Silva Clerici & M. Schmiele (Eds.), *Starches for Food Application* (pp. 23-69). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00002-2>

Pérez, S., Baldwin, P. M., & Gallant, D. J. (2009). Chapter 5—Structural Features of Starch Granules I. En J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch (Third Edition)* (pp. 149-192). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00005-7>

Punia, S., Dhull, S. B., Sandhu, K. S., Kaur, M., & Purewal, S. S. (2020). Kidney bean (Phaseolus vulgaris) starch: A review. *Legume Science*, 2(3), e52. <https://doi.org/10.1002/leg3.52>

Puskas, J. (2014). Introduction to Polymer Chemistry. *DEStech Publishing Inc.* <https://www.destechpub.com/product/introduction-polymer-chemistry-2/>

Serrano, J., & Goñi, I. (2004). Papel del frijol negro *Phaseolus vulgaris* en el estado nutricional de la población guatemalteca. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(1), 36-44.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0004-06222004000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., & Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1739-1749. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>

Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2016). *Handbook of sustainable polymers: Structure and chemistry* (p. 933). <https://doi.org/10.4032/9789814613569>

Valdivia, Y., Pedro, S., & Laurel, M. (2010). *Agua para uso de laboratorios*. <https://www.redalyc.org/pdf/2230/223017807002.pdf>

Vélez Aspiazu, E. E., Cedeño Salazar, P. A., Franco Zavala, A. Z., & Coello Espinoza, L. E. (2025). La Ley de Hooke: Fundamentos de la Elasticidad en Estructuras y su Relevancia en la Arquitectura. *Reincisol.*, 4(7), 1307-1326. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V4\(7\)1307-1326](https://doi.org/10.59282/reincisol.V4(7)1307-1326)

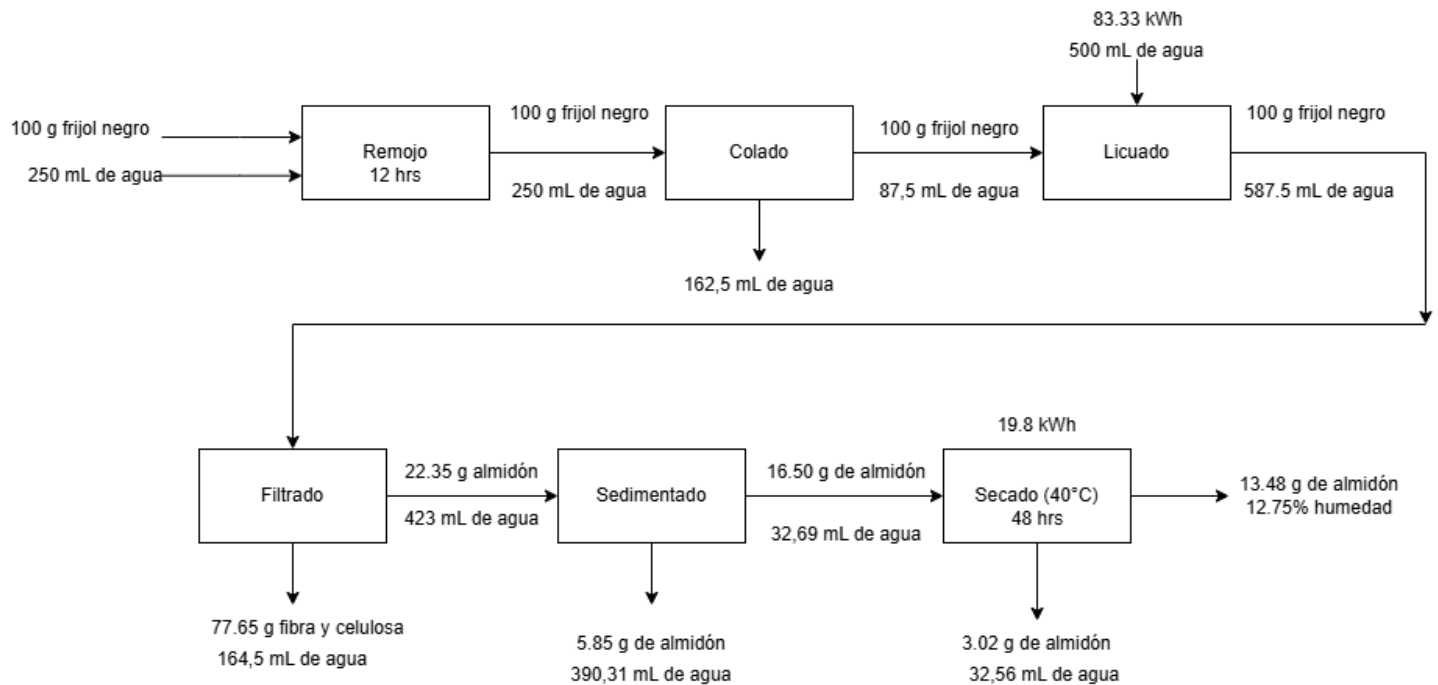
Waterschoot, J., Gomand, S. V., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2015). Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. *Starch - Stärke*, 67(1-2), 14-29. <https://doi.org/10.1002/star.201300238>

Yuss, J. (2021). *Plástico biodegradable*. https://polired.upm.es/index.php/ingenia_materiales

12. ANEXO

12.1. Balances de masa y energía

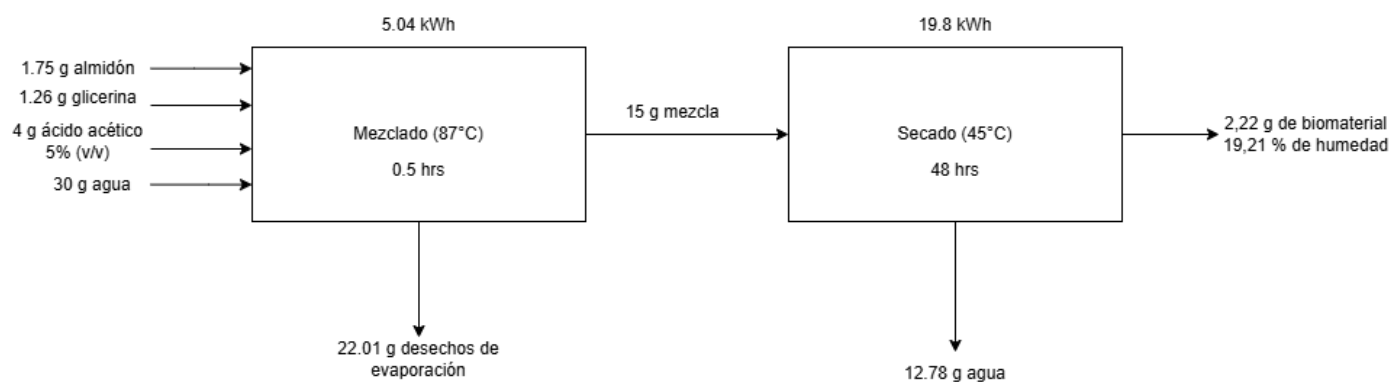
Figura 11. Balance de masa global del proceso de extracción de almidón de frijol negro (*Phaseolus vulgaris L*)



Fuente: Elaboración propia

Se presenta el balance global del proceso de extracción de almidón de frijol. Donde se obtiene que de cada 100 g de frijol negro se extrae 13,49 g de almidón con una humedad de 12,75%.

Figura 12. Balance de masa global del proceso de elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro



Fuente: Elaboración propia

Se presenta el proceso para la elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro. Donde se muestra las entradas y salidas del proceso global.

12.2.Datos de placas

Tabla 16. Datos de placa para balanza analítica

Balanza analítica	
Marca	Ohaus
Modelo	PA214
Capacidad (g)	210
Incertidumbre (g)	± 0.0001

Nota. Datos tomados de la placa del equipo Ohaus, modelo PA214.

Tabla 17. Datos de placa de balanza de humedad

Balanza humedad	
Marca	Ohaus
Modelo	MB120
Capacidad (g)	120
Rango de temperatura de calentamiento	40°C a 230°C

Nota. Datos tomados de la placa de la balanza de humedad marca Ohaus, modelo MB120

Tabla 18. Datos de placa de centrífuga Eppendorf

Centrífuga	
Marca	Eppendorf
Modelo	5804R
No. rotores	12
Voltaje	120V
Frecuencia	50-60 Hz
Velocidad angular	14000 rpm
Capacidad	4x250mL / 2x5 MTP

Nota. Datos tomados de la placa del equipo Marca Eppendorf, modelo 5804R.

Tabla 19. Datos de placa de incubadora

Incubadora	
Marca	VWR Symphony
Modelo	414004-588
Voltaje	120V
Frecuencia	60Hz
Rango de temperatura	20°C a 65°C
Uniformidad de temperatura	±0.7°C a 37°C

Nota. Datos tomados de la placa de la incubadora marca VWR Symphony.

12.3.Datos originales

Tabla 20. Datos de frijol negro inicial y peso final de la extracción de almidón de frijol negro

No. de prueba	Peso inicial de frijol negro (± 0.0001 g)	Peso final de almidón de frijol negro (± 0.0001 g)
1	400.0154	51.5856
2	401.5215	55.1785
3	400.9273	55.0471

Fuente: Elaboración propia

Se observa el proceso en triplicado de extracción de almidón de frijol, donde el peso inicial es de frijol negro y el peso final es de almidón de frijol negro.

Tabla 21. Datos originales de tubos Falcon para la realización de pruebas fisicoquímicas (IIA, ISA, PH) del almidón de frijol negro

No. tubo	Masa tubo vacío (± 0.0001 g)	Masa tubo final (± 0.0001 g)	Almidón seco (± 0.0001 g)	Agua destilada inicial (± 0.05 mL)	Agua final (± 0.05 mL)
1	12.6625	15.145	1.2362	30	27
2	13.0474	15.874	1.2525	30	28
3	12.5699	15.000	1.2685	30	28

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los datos originales de los tubos falcón, así como la cantidad de almidón y agua utilizada para realizar pruebas fisicoquímicas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 30.

Tabla 22. Datos originales para la realización de prueba de índice de absorción de agua en 10 mL de la solución de almidón

No. de beaker	Masa de beaker vacío (± 0.0001 g)	Masa de beaker con solución (± 0.0001 g)	Masa de beaker con peso constante (± 0.0001 g)
1	49.39	59.6	49.41
2	28.70	38.9	28.72
3	32.16	42.4	32.18

Fuente: Elaboración propia

Se muestra los datos del beaker vacío y con la solución de 10 mL que posteriormente se secó hasta obtener un peso constante para determinar el índice de absorción de agua en el almidón de frijol negro.

Tabla 23. Cantidad de almidón utilizado para determinar la humedad del almidón de frijol negro

No. prueba	Masa almidón inicial (± 0.0001 g)	Porcentaje humedad ($\pm 0.01\%$)
1	5.018	13.48
2	5.039	12.51
3	5.009	12.26

Fuente: Elaboración propia

Se observa el peso utilizado para realizar las pruebas de contenido de humedad del almidón de frijol negro en la balanza de humedad Ohaus MB120.

Tabla 24. Datos originales del almidón utilizado para preparar solución al 10% (m/v)

No. réplica	Masa almidón (± 0.0001 g)
1	10.0007
2	10.0123
3	10.0051

Fuente: Elaboración propia

Se tomaron estos datos para preparar una solución al 10% (m/v) de almidón de frijol para determinar la temperatura de gelatinización.

Tabla 25. Datos originales para la elaboración del material biobasado a partir de almidón de frijol negro

Formulación	Peso almidón (± 0.0001 g)	Glicerina (± 0.03 mL)	Ácido acético 5% (v/v) (± 0.05 mL)	Agua destilada (± 0.05 mL)
F1	1.254	1	4	30
	1.261			
	1.251			
F2	1.504			
	1.515			
	1.603			
F3	1.757			
	1.755			
	1.753			

Fuente: Elaboración propia

Se observa la cantidad específica de gramos de almidón utilizado para cada formulación del material biobasado además de las cantidades de glicerina, ácido acético 5% (v/v) y agua destilada.

Tabla 26. Datos obtenidos del espesor de cada formulación del material biobasado

Formulación	No. de réplica	Espesor (± 0.01 mm)
F1	1	0.055
	2	0.06
	3	0.054
F2	1	0.065
	2	0.058
	3	0.062
F3	1	0.075
	2	0.071
	3	0.069

Fuente: Elaboración propia

Se observan el espesor de cada biopelícula medidas por un calibrador Vernier.

Tabla 27. Masa de las películas biobasadas utilizado para determinar el porcentaje de humedad

Formulación	No. de réplica	Masa de las películas (± 0.0001 g)	Porcentaje humedad (± 0.01 %)
F1	1	2.017	23.33
	2	2.135	21.47
	3	2.028	22.84
F2	1	2.003	18.36
	2	2.014	19.84
	3	2.036	19.78
F3	1	2.219	20.47
	2	2.101	18.83
	3	2.073	18.65

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la cantidad de las películas elaboradas a partir de almidón de frijol negro utilizado para realizar las pruebas de contenido de humedad en la balanza de humedad Ohaus MB120.

Tabla 28. Datos obtenidos de la formulación 1 (F1) del material biobasado para pruebas de tracción

Replicación	Masa colgante (g)	Ancho (± 0.01 mm)	Longitud final (± 0.5 mm)	Longitud inicial (± 0.5 mm)
1	50	15	20	20
	100		21	20
	150		22	20
	180		22	20
2	50	15	20	20
	100		21	20
	150		21	20
	180		22	20
3	50	15	20	20
	100		21	20
	150		21.8	20
	180		22	20

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se presenta la masa colgante utilizada para evaluar propiedades mecánicas del material biobasado. Se realizó en triplicado y se muestra la longitud de elongación.

Tabla 29. Datos obtenidos de la formulación 2 (F2) del material biobasado para pruebas de tracción

Replicación	Masa colgante (g)	Ancho (± 0.01 mm)	Longitud final (± 0.5 mm)	Longitud inicial (± 0.5 mm)
1	50	15	20	20
	100		20.5	20
	150		21	20
	200		21	20
2	50	15	20	20
	100		20	20
	150		21	20
	200		21	20
3	50	15	20	20
	100		20	20
	150		21	20
	200		21	20

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se presenta la masa colgante utilizada para evaluar propiedades mecánicas del material biobasado. Se realizó en triplicado y se muestra la longitud de elongación.

Tabla 30. Datos obtenidos de la formulación 3 (F3) del material biobasado para pruebas de tracción

Replicación	Masa colgante (g)	Ancho (± 0.01 mm)	Longitud final (± 0.5 mm)	Longitud inicial (± 0.5 mm)
1	50	15	20	20
	100		21	20
	200		21	20
	250		21.5	20
	300		21.5	20
	400		22	20
2	50	15	20	20
	100		20	20
	150		21	20
	200		21	20
	250		21.5	20
	300		21.5	20
	400		22	20
3	50	15	20	20
	100		20	20
	200		21	20
	250		21	20
	300		21.5	20
	400		22	20

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se presenta la masa colgante utilizada para evaluar propiedades mecánicas del material biobasado. Se realizó en triplicado y se muestra la longitud de elongación.

12.4.Muestra de cálculos

Cálculo 1. Rendimiento de extracción de almidón a partir de frijol negro

$$\% = \frac{54.5856}{400} * 100 = 12.89\%$$

Cálculo realizado a partir de la Ecuación 1 para determinar el rendimiento de almidón, los resultados se observan en la Tabla 4.

Cálculo 2. Determinación de solubilidad (ISA) de almidón a partir de frijol negro

$$ISA(\%) = \frac{0.0198g * 24mL}{1.2362g * 10} = 4.325\%$$

Se realizó este cálculo a partir de la Ecuación 3 para determinar la solubilidad del almidón, a partir de los datos originales de la Tabla 18. Los resultados se observan en la Tabla 6

Cálculo 3. Determinación de índice de absorción de agua (IAA) en almidón de frijol negro

$$IAA = \frac{2.4825 g}{1.2362 g} = 2.008$$

Se realizó este cálculo a partir de la Ecuación 2 para determinar el índice de absorción de agua a partir de los datos originales de la Tabla 19. Los resultados se observan en la Tabla 6.

Cálculo 4. Determinación de poder de hinchamiento (PH)

$$PH = \frac{2.4825 g}{1.2362 g - 0.0198 g} = 2.0408$$

Se realizó este cálculo a partir de la Ecuación 4 para determinar el poder de hinchamiento del almidón, a partir de los datos originales de la Tabla 18. Los resultados se observan en la Tabla 6

Cálculo 5. Determinación de fuerza para cada material biobasado elaborado de almidón de frijol negro

$$F = 100 \text{ g} * \frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 0.981 \text{ N}$$

Se realizó este cálculo a partir de la Ecuación 5 para determinar la fuerza en las tres formulaciones para la elaboración del material biobasado. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 33,34 y 35.

Cálculo 6. Área superficial del material biobasado a base de almidón de frijol negro

$$A = b * t = 15 \text{ mm} * 0.0717 \text{ mm}$$

$$A = 1.075 \text{ mm}^2$$

Se determinó el área de la base del almidón para obtener los cálculos de esfuerzo y deformación de las tres formulaciones. Se utilizando la Ecuación 6 para su realización.

Cálculo 7. Determinación de tensión del material biobasado elaborado a partir de almidón de frijol negro

$$\sigma = \frac{0.981 \text{ N}}{1.075 \text{ mm}^2} = 0.9125 \text{ Mpa}$$

Se determinó la tensión del material biobasado para obtener la carga máxima de cada formulación. Los resultados se observan en la Tabla 33, 34 y 35. Se utilizó la Ecuación 7 para realizar el cálculo.

Cálculo 8. Determinación de elongación por unidad de longitud

$$\varepsilon = \frac{21 \text{ mm} - 20 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} * 100 = 5\%$$

Este cálculo se realizó a partir de la Ecuación 8 para determinar el porcentaje de deformación del material biobasado durante el ensayo de tracción, expresando el cambio en la longitud original de la probeta al aplicarle una carga hasta su ruptura.

12.5.Datos calculados

Tabla 31. Determinación del rendimiento de extracción de almidón a partir de frijol negro con pruebas estadísticas

No. prueba	Rendimiento de almidón extraído (%)	Promedio (%)	Desviación estándar
1	12.896	13.484	0.5094
2	13.795		
3	13.762		

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla se elaboró para presentar los resultados del rendimiento de extracción de almidón obtenido a partir del frijol negro, mostrando los valores obtenidos en cada prueba, así como el promedio y la desviación estándar

Tabla 32. Promedio y desviación estándar de contenido de humedad y temperatura de gelatinización

Prueba	Promedio	Desviación estándar
Contenido de humedad (%)	12.75 ±0.01	0.64
Temperatura de gelatinización (°C)	83.33 ± 0.25	1.15

Fuente: Elaboración propia

Se muestran los valores promedio y la desviación estándar del contenido de humedad y la temperatura de gelatinización del almidón de frijol negro, con el objetivo de evaluar sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 33. Datos calculados sobre las pruebas fisicoquímicas realizadas en el almidón de frijol negro extraído

Propiedad	Temperatura a 60°C			Promedio	Desviación estándar
	1	2	3		
Solubilidad (%)	4.2345 ± 0.00086	4.4934 ± 0.00085	4.3926 ± 0.000885	4.404	0.0008
Poder de hinchamiento (g/g)	2.040 ± 0.00029	2.310 ± 0.00032	1.946 ± 0.00028	2.099	0.1887
Absorción de agua (g/g)	2.008 ± 0.00086	2.273 ± 0.00085	1.916 ± 0.00085	2.065	0.1854

Fuente: Elaboración propia

Se presentan los valores de solubilidad, poder de hinchamiento y absorción de agua, al igual que el promedio y desviación estándar para las pruebas fisicoquímicas del almidón extraído de frijol negro.

Tabla 34. Promedio y desviación estándar del espesor de la biopelícula por cada formulación realizado

Formulación	Promedio espesor (±0.01 mm)	Desviación estándar
F1	0.0563	0.0032
F2	0.0617	0.0035
F3	0.0717	0.0031

Fuente: Elaboración propia

Se presentan los valores promedios y desviación estándar del espesor de las tres formulaciones para la elaboración del material biobasado.

Tabla 35. Promedio y desviación estándar del porcentaje de humedad de la biopelícula por cada formulación

Formulación	Promedio de humedad (%)	Desviación estándar
F1	22.55	0.9641
F2	19.33	0.8377
F3	19.32	1.0029

Fuente: Elaboración propia

Se presentan los valores promedios y desviación estándar de la humedad en las tres formulaciones para la elaboración del material biobasado con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 36. Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 1 (F1)

No. Réplica	Masa (g)	Δ longitud (± 0.7)	Fuerza (N)	Área (± 0.15 mm ²)	Tensión σ (Mpa)	Deformación ε (%)	Módulo de Young (Mpa)
1	50	0	0.491	0.926	0.530	0%	10.600
	100	1	0.981	0.926	1.060	5%	
	150	2	1.472	0.926	1.590	10%	
	180	2	1.766	0.926	1.908	10%	
2	50	0	0.491	0.926	0.530	0%	13.780
	100	1	0.981	0.926	1.060	5%	
	150	1	1.472	0.926	1.590	5%	
	180	2	1.766	0.926	1.908	10%	
3	50	0	0.491	0.926	0.530	0%	13.164
	100	1	0.981	0.926	1.060	5%	
	150	1.8	1.472	0.926	1.590	9%	
	180	2	1.766	0.926	1.908	10%	

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los datos experimentales utilizados en la determinación del módulo de Young del material biobasado correspondiente a la formulación 1, mostrando las mediciones de masa aplicada, fuerza, área transversal, tensión y deformación obtenidas en cada réplica.

Tabla 37. Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 2 (F2)

No. Réplica	Masa (g)	Δ longitud	Fuerza (N)	Área (mm^2)	Tensión σ (Mpa)	Deformación ε (%)	Módulo de Young (Mpa)
1	50	0	0.491	0.845	0.580	0%	29.551
	100	0.5	0.981	0.845	1.161	3%	
	150	1	1.472	0.845	1.741	5%	
	200	1	1.962	0.845	2.322	5%	
2	50	0	0.491	0.845	0.580	0%	26.576
	100	0.2	0.981	0.845	1.161	1%	
	150	1	1.472	0.845	1.741	5%	
	200	1	1.962	0.845	2.322	5%	
3	50	0	0.491	0.845	0.580	0%	27.984
	100	0.3	0.981	0.845	1.161	2%	
	150	1	1.472	0.845	1.741	5%	
	200	1	1.962	0.845	2.322	5%	

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los datos experimentales utilizados en la determinación del módulo de Young del material biobasado correspondiente a la formulación 2, mostrando las mediciones de masa aplicada, fuerza, área transversal, tensión y deformación obtenidas en cada réplica.

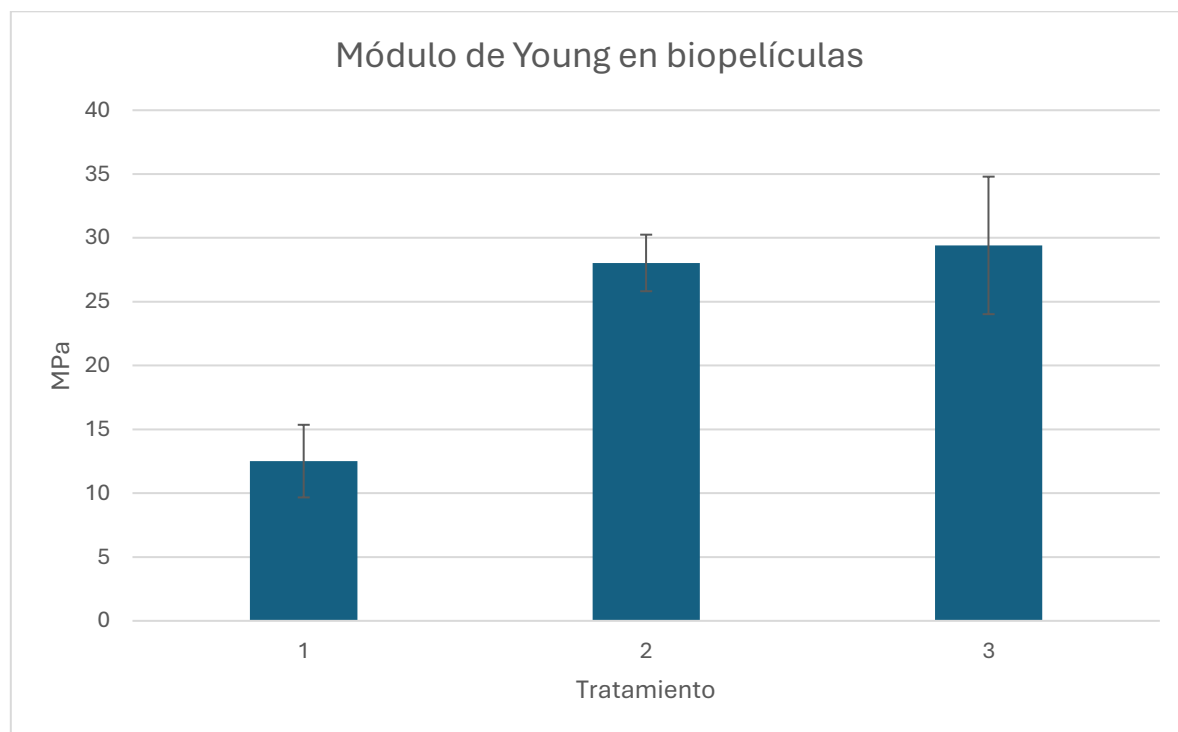
Tabla 38. Datos calculados para determinar el módulo de Young de la formulación 3 (F3)

No. Réplica	Masa (g)	Δ longitud	Fuerza (N)	Área (mm^2)	Tensión σ (Mpa)	Deformación ε (%)	Módulo de Young (Mpa)
1	50	0	0.491	1.075	0.456	0%	31.940
	100	1	0.981	1.075	0.913	5%	
	200	1	1.962	1.075	1.825	5%	
	250	1.5	2.453	1.075	2.281	8%	
	300	1.5	2.943	1.075	2.738	8%	
	400	2	3.924	1.075	3.650	10%	
2	50	0	0.491	1.075	0.456	0%	27.377
	100	0	0.981	1.075	0.913	0%	
	200	1	1.472	1.075	1.369	5%	
	250	1	1.962	1.075	1.825	5%	
	300	1.5	2.453	1.075	2.281	8%	
	400	1.5	2.943	1.075	2.738	8%	
3	50	0	0.491	1.075	0.456	0%	28.917
	100	0	0.981	1.075	0.913	0%	
	200	1	1.962	1.075	1.825	5%	
	250	1	2.453	1.075	2.281	5%	
	300	1.5	2.943	1.075	2.738	8%	
	400	2	3.924	1.075	3.650	10%	

Fuente: Elaboración propia

Se presenta los datos experimentales utilizados en la determinación del módulo de Young del material biobasado correspondiente a la formulación 3, mostrando las mediciones de masa aplicada, fuerza, área transversal, tensión y deformación obtenidas en cada réplica.

Figura 13. Diagrama de barras del módulo de Young en cada formulación de las biopelículas con su desviación estándar



Fuente: Elaboración propia

12.6. Análisis de error

Cálculo 9. Media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{12.896 + 1.795 + 13.762}{3} = 13.484$$

Se realizó este cálculo en cada prueba realizada para determinar su promedio. Los resultados se encuentran en las Tablas 4-7 y de la Tabla 10-12.

Cálculo 10. Desviación estándar

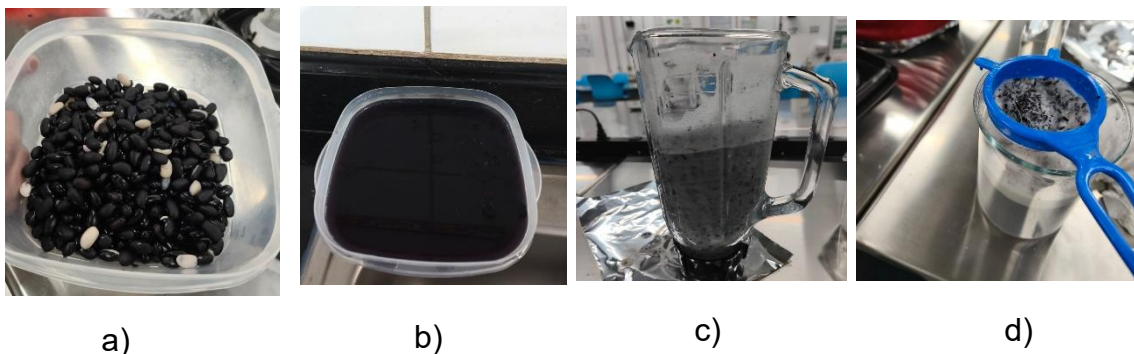
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$
$$= \sqrt{\frac{(12.896 - 13.484)^2 + (13.795 - 13.484)^2 + (13.762 - 13.484)^2}{2 - 1}} = 0.5094$$

Se realizó este cálculo en cada prueba realizada para determinar su desviación estándar. Los resultados se encuentran en las Tablas 4-7 y de la Tabla 10-12.

Estos cálculos se realizaron para obtener los valores promedio y la desviación estándar de los resultados experimentales obtenidos en triplicado para cada una de las pruebas realizadas. La media aritmética permitió determinar el valor representativo de las mediciones, mientras que la desviación estándar se utilizó para evaluar la variabilidad y precisión de los datos obtenidos en los ensayos.

12.7.Documentación del proceso y equipos utilizados

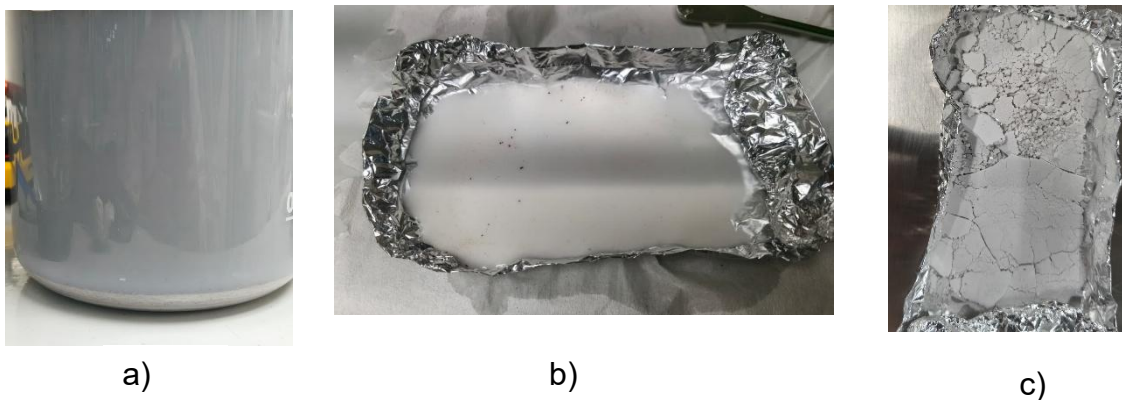
Figura 14. Extracción de almidón de frijol negro



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observan los pasos detallados para la extracción de almidón de frijol negro: a) Recepción de materia prima, b) remojo de 12 horas del frijol, c) licuado del frijol negro en remojo, d) filtración del frijol negro. Realizado en la Universidad del Valle de Guatemala.

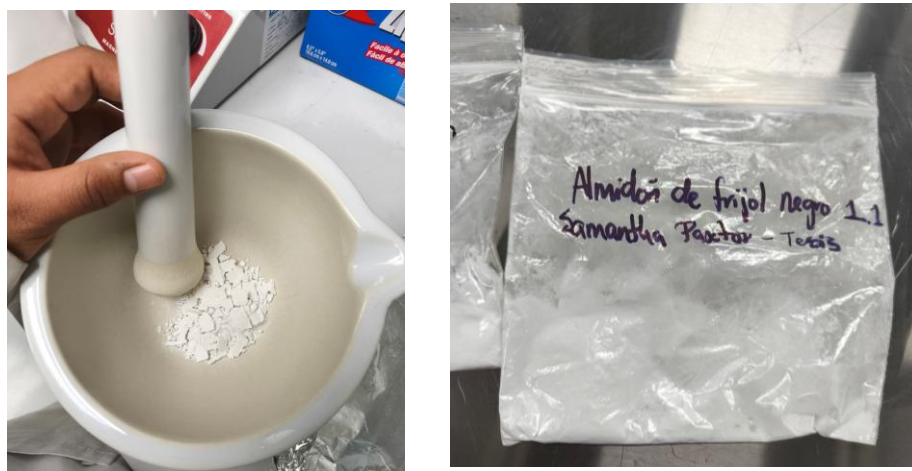
Figura 15. Sedimento y secado de almidón de frijol negro



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la siguiente figura: a) sedimento del almidón de frijol negro, b) Secado del almidón, c) almidón seco. Realizado en la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 16. Pulverización de almidón de frijol negro



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la pulverización del almidón de frijol negro con el fin de obtener un polvo más fino y homogéneo. Realizado en la Universidad del Valle de Guatemala.

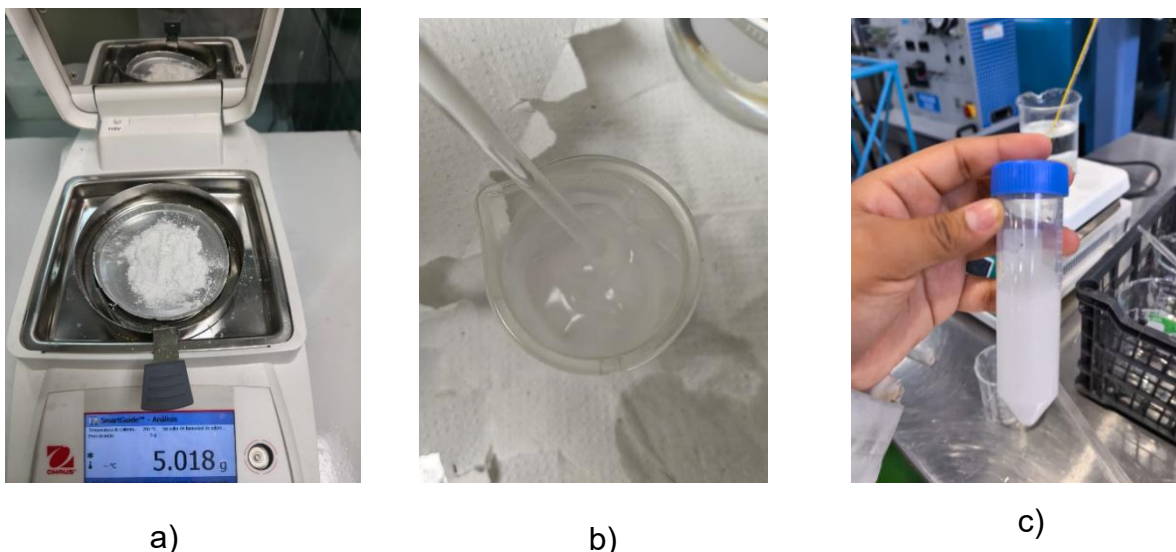
Figura 17. Prueba de Lugol realizado para la identificación de almidón en la extracción del frijol negro.



Fuente: Elaboración propia

Se observa una coloración azul intenso que identifica el almidón al momento de calentarse. Se realizó para identificar la temperatura de gelatinización además de detectar almidón por un cambio de color.

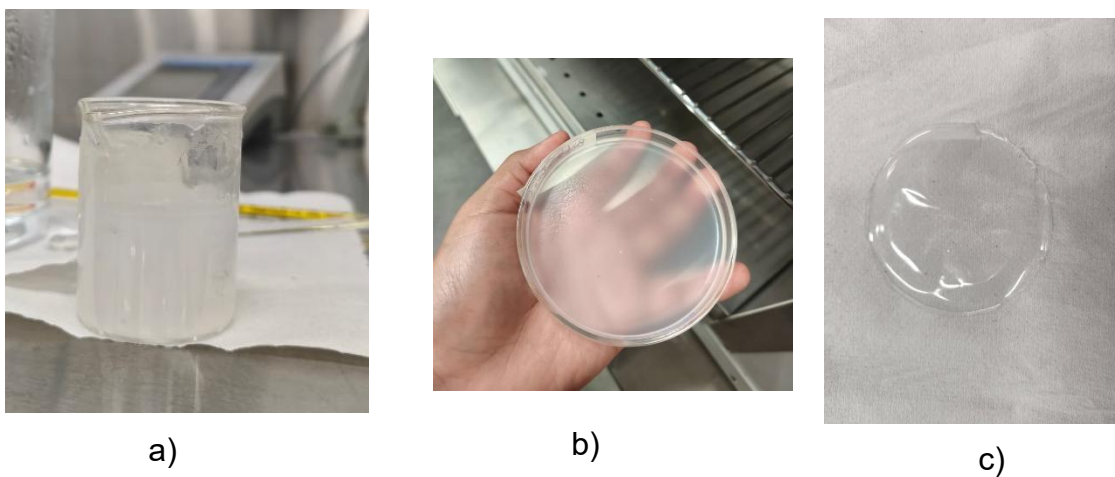
Figura 18. Pruebas fisicoquímicas del almidón de frijol negro



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron pruebas fisicoquímicas del almidón de frijol negro para su caracterización: a) Prueba de contenido de humedad, b) determinación de temperatura de gelatinización, c) prueba de solubilidad, poder de hinchamiento e índice de absorción de agua. Realizado en la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 19. Elaboración de material biobasado a partir del almidón de frijol



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se presenta los pasos en los cuáles se elaboró el material biobasado; a) Solución con los materiales de elaboración del material biobasado hasta su temperatura de gelatinización, b) mezcla en caja Petri, c) material biobasado de almidón de frijol seco. Realizado en la Universidad del Valle de Guatemala.

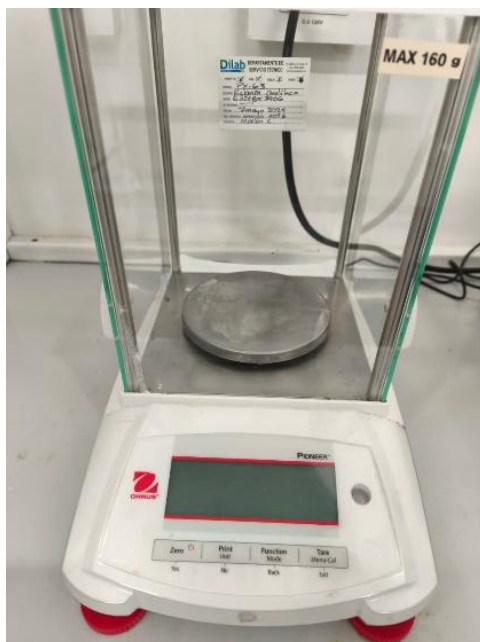
Figura 20. Biopelícula obtenida a partir de almidón de frijol negro con una concentración de 1.0 g



Fuente: Elaboración propia

En la figura se muestra el resultado de una formulación elaborada con 1.0 g de almidón de frijol negro, en la cual no se logró la formación de una matriz polimérica funcional y consistente. La biopelícula obtenida presentó baja integridad estructural, limitada cohesión y escasa estabilidad mecánica. Debido a que concentraciones inferiores 1.25g de almidón no permitieron la formación de matrices continuas, y considerando el uso de los recursos, no se realizaron formulaciones adicionales con menores concentraciones.

Figura 21. Balanza analítica utilizada de la marca Ohaus



Fuente: Elaboración propia.

Equipo disponible en la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 22. Incubadora de chaqueta de aire



Fuente: Elaboración propia

Equipo disponible en la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 23. *Centrífuga Eppendorf de 5804 R*



Fuente: Elaboración propia

Equipo disponible en la Universidad del Valle de Guatemala.

13. GLOSARIO

1. **Material biobasado:** es un material de origen natural, sintético o híbrido diseñado para interactuar de forma segura y compatible con organismos. También se refiere a materiales de origen natural o biobasados que se obtienen de la naturaleza o procesos agroindustriales que tiene un bajo impacto ecológico.
2. **Almidón:** hidrato de carbono, una sustancia blanca y granulada que sirve como reserva energética en vegetales y se usa tanto en alimentación como en la industria.
3. **Amilosa:** es un polisacárido constituyente del almidón, formado por moléculas de glucosa
4. **Amilopectina:** es un polisacárido de cadena ramificada constituyente del almidón vegetal.
5. **Plastificante:** Sustancia empleada para añadir propiedades mecánicas y características físicas a un material plástico.
6. **Retrogradación del almidón:** proceso en el que el almidón gelatinizado se reorganiza y recristaliza de forma ordenada al enfriarse.
7. **Tensión:** Efecto de aplicar una fuerza sobre una forma alargada aumentando su longitud.