



Extracción de biopolímero del residuo de cáliz de uvilla (*Physalis peruviana* L.) para síntesis de bioplásticos

Extraction of biopolymer from Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) calyx residue for bioplastic synthesis

 Yessenia Beatriz Sarango Ortega^{1*},  Viviana Sánchez-Vásquez¹,  José Humberto Vera Rodríguez²

¹Universidad Estatal de Milagro. Cdla. Universitaria “Dr. Rómulo Minchala Murillo” -km. 11/2 vía Milagro - Virgen de Fátima; Milagro, Guayas, Ecuador. 091703.

²Universidad Agraria del Ecuador UAE. Vía Puerto Marítimo - Avenida 25 de Julio y Pío Jaramillo (Campus principal) Guayaquil, Guayas, Ecuador, 091307.

RESUMEN: A diferencia de los polímeros sintéticos, los polímeros naturales (biopolímeros) se obtienen mediante procesos de baja huella ambiental y, gracias a su inherente susceptibilidad a la biodegradación, son una alternativa ideal para la elaboración de productos de un solo uso como platos, vasos y sorbetes. El cáliz de uvilla (*Physalis peruviana* L.), un residuo agrícola, es excepcionalmente rico en polisacáridos estructurales (celulosa, pectina y almidón), lo que lo posiciona como una materia prima renovable y de bajo costo para la bioplastificación. Este estudio aborda el desarrollo y la optimización metodológica de un protocolo eficiente para la extracción y purificación de un biopolímero a partir de este residuo. El material vegetal se obtuvo mediante muestreo de poblaciones naturales en dos ecosistemas andinos, a partir del cual se implementaron cuatro ensayos experimentales distintos de extracción: método de “hielo-agua”, Soxhlet, celulosa, y método combinado de celulosa y almidón. Los resultados permitieron establecer un protocolo confiable para obtener un biopolímero a partir de *Physalis peruviana* L., siendo una fuente sostenible con potencial para reemplazar materiales petroquímicos y reducir tanto los residuos agroindustriales como la contaminación plástica.

Palabras Clave: Almidón, biodegradable celulosa, polímero natural.

ABSTRACT: Unlike synthetic polymers, natural polymers (biopolymers) are obtained through processes with a low environmental footprint and, due to their inherent biodegradability, represent an ideal alternative for the production of single-use items such as plates, cups, and straws. The calyx of the Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.), an agricultural residue, is/ exceptionally rich in structural polysaccharides (cellulose, pectin, and starch), /making it a renewable and low-cost raw material for bioplastification. This study focuses on the development and methodological optimization of an efficient protocol for the extraction and purification of a biopolymer from this residue. The plant material was collected through sampling of natural populations in two Andean ecosystems, from which four distinct extraction experiments were implemented: the “ice-water” method, Soxhlet extraction, cellulose extraction, and a combined cellulose-starch method. The results allowed the establishment of a reliable protocol for obtaining a biopolymer from *Physalis peruviana* L., confirming it as a sustainable source with potential to replace petrochemical materials and to reduce both agro-industrial waste and plastic pollution.

Key words: Starch, biodegradable cellulose, natural polymer.

*Autor para correspondencia: ysarangoo@unemi.edu.ec

Recibido: 29/07/2025

Aceptado: 07/11/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Conceptualización; Metodología; Supervisión; Redacción - borrador original:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega. **Investigación:** Yessenia Beatriz Sarango Ortega, Viviana Sánchez-Vásquez. **Curación de datos; Redacción - revisión y edición:** José Humberto Vera Rodríguez.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

La necesidad de buscar alternativas debido a la contaminación ambiental persistente causada por los polímeros sintéticos derivados mayoritariamente de compuestos petroquímicos y resistentes a la biodegradación (1) ha posicionado a los biopolímeros como una alternativa tecnológica. Estas macromoléculas de origen biológico poseen una importancia ecológica fundamental debido a su inherente biodegradabilidad, proporcionando su mineralización en el ambiente en un tiempo significativamente menor (2). Esta característica es clave, ya que habilita su aplicación en materiales de alto consumo y vida útil corta, como platos, vasos y sorbetes, lo que proporciona que estos utensilios de un solo uso no persistan tras su descarte (3).

La química de polímeros se enfoca en el estudio de estas macromoléculas orgánicas resultantes de la polimerización de unidades monoméricas, unidas mediante enlaces covalentes (4). La arquitectura molecular de estos compuestos es el factor primordial que determina su amplio espectro de propiedades fisicoquímicas, térmicas y mecánicas. Históricamente, la producción se ha centrado en los polímeros sintéticos, mayoritariamente derivados de compuestos petroquímicos (5).

Este problema se ve agravado por la ineficiencia de los protocolos de reciclaje, que a menudo implican costes energéticos y logísticos prohibitivos en las fases de recuperación, purificación y reprocesamiento. Esta dinámica ha acelerado el cambio climático y ha generado riesgos sanitarios, enmarcando la necesidad urgente de soluciones sostenibles (6).

En respuesta a esta crisis, las investigaciones se han volcado hacia la valorización de los biopolímeros al ser macromoléculas de origen biológico o pueden ser sintetizadas a partir de materias primas renovables, y se postulan como la alternativa sostenible más viable (7). Ecológicamente, su ventaja se centra en la mineralización de la cadena polimérica, un proceso mediado por la acción de enzimas extracelulares microbianas que genera productos inocuos (agua, dióxido de carbono y metano) en comparación con los plásticos petroquímicos (1). Esta propiedad es crucial, ya que permite el desarrollo de materiales destinados a usos cortos o únicos (como platos, vasos y sorbetes) que no persisten en el ambiente tras su descarte, cerrando así el ciclo de vida del producto.

Los biopolímeros se clasifican en grupos principales: los derivados de la biomasa (como el almidón, la celulosa y los derivados de la quitina), los sintetizados a partir de monómeros bioderivados, y aquellos sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos - PHA) (8). Los biopolímeros procedentes de residuos agroindustriales son particularmente atractivos, ofreciendo un bajo coste de adquisición e impulsan un modelo de economía circular.

A pesar de la promesa de los biopolímeros de origen vegetal, los métodos de extracción convencionales presentan limitaciones significativas en rendimiento, pureza y reproducibilidad (9). Esta barrera tecnológica subraya la

necesidad de desarrollar y optimizar protocolos específicos de aislamiento. Bajo esa perspectiva esta investigación se orienta hacia fuentes vegetales no tradicionales, como *Physalis peruviana* L., una especie andina cuya composición sugiere un alto potencial biotecnológico (10). La optimización del proceso de extracción en esta especie constituye un paso esencial para la valorización de los recursos fitogenéticos andinos y la promoción de tecnologías limpias aplicadas a la producción de biopolímeros (11).

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es diseñar y estandarizar un protocolo de extracción de biopolímeros a partir del cáliz de *P. peruviana* L., con el propósito de evaluar la obtención y potencial aplicación de esta materia prima renovable en el desarrollo de materiales biodegradables con proyección tecnológica, tales como envases y utensilios de un solo uso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El material vegetal de *P. peruviana* L. fue recolectado en dos ecosistemas andinos ecuatorianos, refleja un diseño de muestreo crucial para evaluar la variabilidad ecogeográfica. Las muestras se obtuvieron en Pelileo (Tungurahua, 2600 m.s.n.m.), caracterizado por un clima frío, y en Carigan -Tenería (Loja, 1850 m.s.n.m.), con un régimen templado subhúmedo. Estas condiciones contrastantes (temperaturas promedio de 16 a 22 °C) permiten estudiar la influencia ambiental sobre el rendimiento y las propiedades estructurales del biopolímero extraído, principalmente del cáliz de la especie.

Recolección

El muestreo biológico de *P. peruviana* L. se efectuó en poblaciones naturales a través de parcelas cuadráticas de 5 x 5 m. La recolección se centró en cálices desprendidos en la base de las plantas, y se seleccionaron únicamente aquellos que presentaban integridad estructural y tonalidades cromáticas que oscilaron desde verde amarillento hasta marrón claro, propias de los diferentes estados de maduración. Se excluyeron rigurosamente los especímenes que mostraban cualquier indicio de deterioro físico o desintegración.

En el laboratorio se separó manualmente el cáliz del fruto y se secó a 32 °C durante una semana. Posteriormente, el material seco se llevó al laboratorio para su procesamiento. Para los ensayos 1, 2 y 3 se utilizó cáliz triturado, y para el ensayo 4, cáliz entero, siguiendo los protocolos revisados en la bibliografía.

Diseño experimental

La metodología se enfocó en la obtención de un biopolímero a partir del cáliz de uvilla (*Physalis peruviana* L.), mediante la ejecución de cuatro ensayos principales diseñados para extraer sus componentes clave: resinas (Ensayos 1 y 2) y celulosa (Ensayos 3 y 4). En los ensayos

se utilizó material seco se procesó en dos presentaciones: triturado (Ensayos 1, 2 y 3) y entero (Ensayo 4), con el objetivo de ejecutar distintos protocolos de extracción bibliográficamente revisados.

En la extracción de resinas vegetales se aplicaron dos métodos distintos, basándose en el principio de que las bajas temperaturas o el uso de solventes orgánicos facilitan la separación del principio activo (12).

Ensayo 1 (hielo - agua): El método se basó en la fragilización de la resina inducida por el frío. Se agitaron 200 g de cáliz triturado en agua fría (0-15 °C) durante 45 minutos para facilitar la separación. Aunque parte de la resina quedó retenida en las fibras al hidratarse, se logró una eficiencia del 90 %. La resina obtenida se secó con papel filtro durante una hora (12).

Ensayo 2 (extracción Soxhlet): Se extrajo la resina mediante Soxhlet utilizando etanol como solvente durante tres días. El extracto se concentró en un rotaevaporador y la resina obtenida se trató con un baño ácido para reducir su consistencia pegajosa y facilitar su manipulación (13).

Ensayo 3 (extracción de celulosa): se utilizaron 25 g de cáliz triturado en un proceso de cuatro etapas para obtener celulosa de alta pureza (14-16):

1. Hidrólisis alcalina inicial: Tratamiento con 150 mL de NaOH al 10 % a 150 °C durante una hora para eliminar ceras, pectinas y resinas.
2. Hidrólisis ácida suave: Aplicación de 150 mL de H₂SO₄ al 0,4 % por una hora, seguido de lavado con agua destilada hasta neutralidad.
3. Cloración: Uso de 250 mL de NaClO al 3,5 % en baño maría a 30 °C hasta alcanzar pH 9,2, seguido de lavado hasta pH neutro.
4. Extracción alcalina y blanqueo final: Extracción con 150 mL de NaOH al 20 % por una hora, seguido de un blanqueo con NaClO al 0,5 % por una hora.

La celulosa obtenida se secó al ambiente por 24 horas y luego en estufa a 60 °C por 24 horas. Para el ensayo 3 se emplearon 0,25 g de celulosa extraída, mezclados con 3 mL de agua, 0,5 mL de glicerina y 0,5 mL de vinagre. Con base en los resultados obtenidos, se realizaron tres subensayos:

- Ensayo 3.1: 0,25 g de celulosa + 0,25 g de quitosano.
- Ensayo 3.2: 0,25 g de celulosa + 0,25 g de almidón.
- Ensayo 3.3: 0,25 g de celulosa (tamizado en 0,17mm) + 0,50 g de almidón.

Cada mezcla se agitó a 200 rpm y 100 °C durante 30 minutos, luego se secó en estufa a 50 °C por 24 horas, siguiendo el protocolo (15).

Ensayo 4 (celulosa - almidón): este protocolo se basó en la modificación de referencias previas (14,16), utilizando 6 g de cáliz entero seco. El proceso consistió en:

1. Tratamiento Alcalino/Estabilizante: 150 mL de NaOH al 10 % y 30 mL de Na₂SO₃ al 1 % (para preservar polímeros)

a 100 °C por 3 horas bajo agitación. El material sólido fue filtrado y lavado hasta un color cristalino.

2. Blanqueamiento Prolongado: La muestra fue tratada con NaClO al 0,5 % en baño María a 50 °C y agitación, siguiendo un ciclo de 4 horas, seguido de 2 horas y, finalmente, 24 horas, con lavados intermedios.

El material sólido fue triturado con 100 mL de agua, filtrado y utilizado para la formulación del biopolímero.

Se utilizaron 2 g de celulosa extraída y se combinaron con 6 mL de agua, 0,25 g de almidón, 1 mL de ácido acético y 5 gotas de glicerina. Esta mezcla se agitó a 100 °C y 300 r.p.m. durante 30 minutos. La solución viscosa se vertió en una caja Petri de plástico para ser secada en estufa a 45 °C por 24 horas, completándose el proceso de secado a temperatura ambiente por 48 horas.

Evaluación de transparencia y biodegradabilidad de los biopolímeros

Los tratamientos que mostraron indicios de polimerización y un aspecto parcialmente transparente fueron seleccionados para la evaluación de transparencia y biodegradabilidad.

Transparencia

Para la evaluación del grado de transparencia de los biopolímeros, las muestras fueron seccionadas en filmes de 2,5 cm × 1 cm, obteniéndose cinco réplicas por cada ensayo. Cada filme fue analizado microscópicamente mediante tres observaciones en distintas áreas de la superficie, con el fin de determinar la homogeneidad óptica del material. La transparencia se calificó utilizando una escala de Likert, donde: 1 (totalmente opaco), 2 (ligeramente opaco), 3 (semitransparente), 4 (transparente) y 5 (totalmente transparente) (17).

Biodegradabilidad

Para evaluar la degradación fotoinducida de los biopolímeros, las muestras fueron expuestas a radiación ultravioleta (UV) a una longitud de onda de 365 nm durante un periodo de seis días. Se registró el peso inicial y final de cada muestra con el fin de determinar la variación másica asociada al proceso de degradación (18).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante el software SPSS, versión 27. La comparación de las variables Transparencia (Likert) y Pérdida de Peso (Biodegradabilidad) entre los cinco ensayos independientes (E3, E3.1, E3.2, E3.3, E4). Se efectuó con la prueba Kruskal-Wallis. Las diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) fueron posteriormente evaluadas mediante comparaciones por pares con la corrección de Bonferroni, con el fin de determinar el protocolo óptimo en términos de propiedades ópticas y degradación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos 1 y 2 se buscó la formulación de biopolímeros a partir de resina vegetal. En el ensayo 1, el material obtenido presentó una textura quebradiza y polvorosa, con una coloración verde clara, lo que indica una polimerización incompleta y baja cohesión estructural. En cambio, el ensayo 2 generó un biopolímero de consistencia pegajosa y tonalidad verde oscura, lo cual demuestra una mayor retención de compuestos resinosos y un proceso de secado menos eficiente (Figura 1).

En el ensayo 3, basado en la extracción de celulosa, se obtuvo un biopolímero de color amarillo intenso, con una masa opaca y sin evidencia de polimerización efectiva. En cuanto a los subensayos 3.1 y 3.2, ambos presentaron una textura blanda y húmeda, y conservaron una tonalidad amarilla incluso después de 24 horas de secado en

estufa, sin alcanzar la formación de una matriz polimérica consolidada. Por el contrario, el subensayo 3.3 mostró los resultados más favorables, revela una estructura más uniforme, color blanquecino, superficie lisa y brillante, y un grado de transparencia comparable al de un biopolímero convencional (Figura 2).

Por último, en el ensayo 4 se obtuvo un film de tonalidad blanquecina con tendencia a la transparencia, caracterizado por una superficie lisa, homogénea y con brillo evidente. Estas propiedades se mantuvieron estables y consistentes tanto bajo condiciones de secado acelerado en estufa como durante el secado a temperatura ambiente (Figura 3).

Los resultados en la evaluación de la transparencia mostraron variaciones entre los diferentes ensayos realizados. Los filmes elaborados a base de resina (ensayos 1 y 2) presentaron una apariencia totalmente opaca, indicando una baja transmisión de luz a través del material.

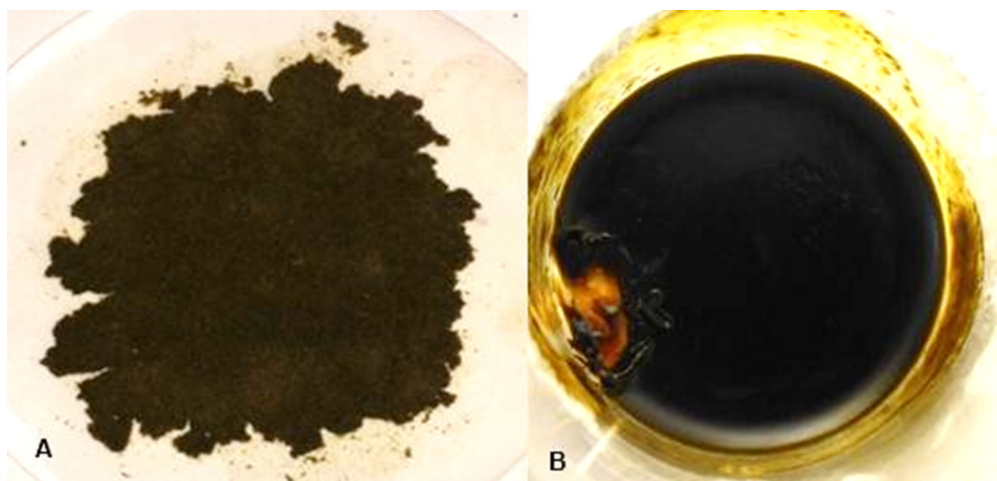


Figura 1. (A) Biopolímero mediante extracción de "Hielo- Agua"; (B) Biopolímero mediante extracción de Soxhlet

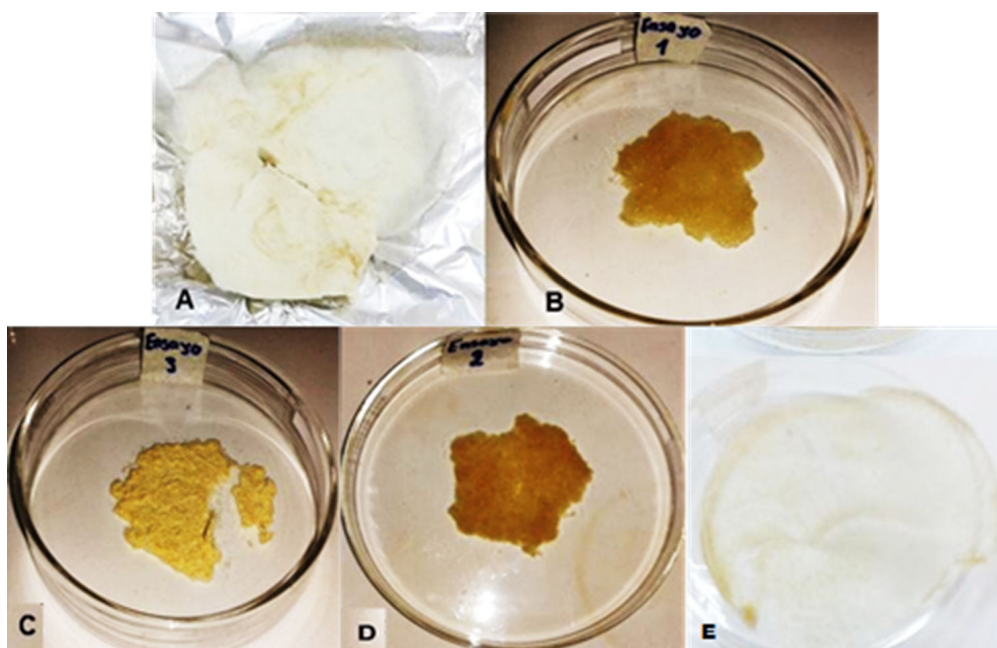


Figura 2. (A) Celulosa extraída, (B) Ensayo 3 Biopolímero de celulosa, (C) Ensayo 3.1: Biopolímero de celulosa con quitosano, (D) Ensayo 3.2: Biopolímero de celulosa con 0,25g almidón, (E) Ensayo 3.3 Biopolímero de celulosa con 0,50g almidón

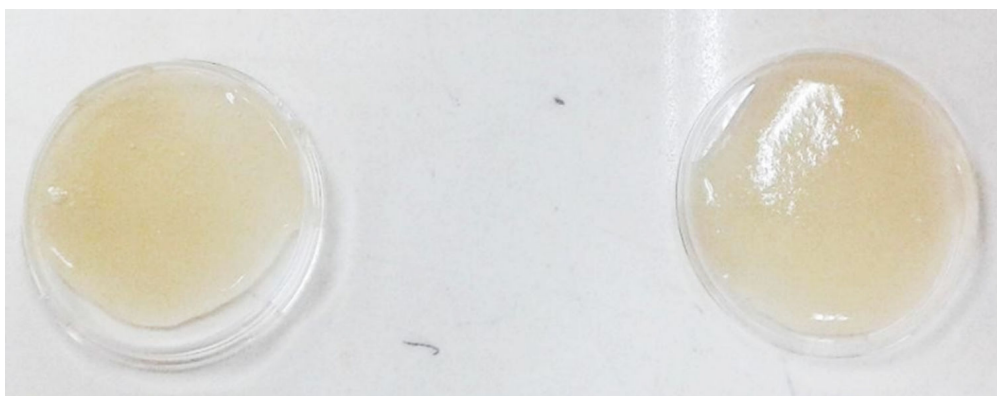


Figura 3. Biopolímero de celulosa + almidón

De forma similar, el biopolímero obtenido únicamente con celulosa (ensayo 3) y la mezcla de celulosa con quitosano (ensayo 3.1) mostraron también una transparencia nula, lo que evidencia un aspecto compacto y sin paso visible de luz. El ensayo 3.2 mezclado con 0,25 g de almidón alcanzó una escala de ligeramente opaco. En contraste, el ensayo 3.3 con 0,50 g de almidón generó un efecto positivo sobre la propiedad óptica del material, alcanzó un grado de transparencia elevado, lo que permitió calificarlo como transparente en la escala de Likert. Asimismo, la muestra correspondiente al ensayo 4, compuesta por celulosa y almidón, mostró características visuales similares, con una superficie homogénea y transparente. La prueba de Kruskal-Wallis evidencia diferencias estadísticamente significativas en los valores de transparencia de los biopolímeros entre los distintos ensayos ($H = 74,000$; $gl = 4$; $p < 0,001$). Estos resultados evidencian variaciones en el grado de transparencia según el tipo de ensayo realizado (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de los ensayos mediante la prueba de Kruskal-Wallis

Resumen de prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	
N total	75
Estadístico de prueba	74,000 ^a
Grado de libertad	4
Sig. asintótica (prueba bilateral)	<0,001

^a $p < 0,05$ existen diferencias significativas en la transparencia entre los ensayos

Tabla 2. Comparación de los ensayos mediante la prueba de Kruskal-Wallis

Comparaciones por parejas de Ensayo					
Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
E3-E3.1	,000	7,398	,000	1,000	1,000
E3-E3.2	-22,500	7,398	-3,041	,002	,024
E3-E3.3	-45,000	7,398	-6,083	,000	,000
E3-E4	-45,000	7,398	-6,083	,000	,000
E3.1-E3.2	-22,500	7,398	-3,041	,002	,024
E3.1-E3.3	-45,000	7,398	-6,083	,000	,000
E3.1-E4	-45,000	7,398	-6,083	,000	,000
E3.2-E3.3	-22,500	7,398	-3,041	,002	,024
E3.2-E4	-22,500	7,398	-3,041	,002	,024
E3.3-E4	,000	7,398	,000	1,000	1,000

El nivel de significación es de ,050.

Las comparaciones por parejas mostraron que las condiciones de ensayo E3.3 y E4 indujeron los mayores cambios significativos en la transparencia del biopolímero en comparación con E3 y E3.1 (p -ajustado 0,000), indicando que estas son las condiciones más efectivas para modificar esta propiedad óptica. No obstante, la transparencia resultante de E3.3 y E4 fue estadísticamente idéntica entre sí (p -ajustado = 1,000). De manera similar, las condiciones E3 y E3.1 también resultaron en una transparencia equivalente (p -ajustado = 1,000). El análisis de los datos (Tabla 2) confirmó la alta influencia de las condiciones de ensayo E3.3, E4 y E3.2 en la transparencia final del biopolímero.

La pérdida total de peso (biodegradabilidad) después de 6 días de exposición a rayos UV se comparó entre los cinco ensayos independientes (E3, E3.1, E3.2, E3.3, E4). El análisis global arrojó un resultado estadísticamente significativo de $H(4) = 19,075$, con una significación asintótica de $p < 0,001$. Este resultado indica que existen diferencias significativas en la mediana de la pérdida de peso (biodegradabilidad) entre las condiciones de ensayo aplicadas al biopolímero, lo cual muestra un efecto significativo en la biodegradabilidad del material expuesto a radiación UV (Tabla 3).

El ensayo 1 y 2 resultaron en materiales con texturas quebradizas y pegajosas respectivamente, ilustran los desafíos en el control de la polimerización para alcanzar las características ideales de un biopolímero funcional.

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para la Pérdida Total de Peso del Biopolímero

Estadísticos de prueba ^{a,b}	
	PERDIDA TOTAL
H de Kruskal-Wallis	19,075
gl	4
Sig. asin.	,001

*p < 0,05 existen diferencias significativas en la biodegradabilidad entre los ensayos

Un biopolímero óptimo debe exhibir no solo una integridad estructural adecuada (evitando la fragilidad del ensayo 1), sino también propiedades superficiales no adhesivas y una estabilidad dimensional (a diferencia de la pegajosidad del ensayo 2) (19). Estas propiedades están intrínsecamente ligadas al grado de polimerización y reticulación. La fragilidad y la coloración oscura del ensayo 1 se correlacionan con una polimerización incompleta o un bajo peso molecular, lo que compromete la resistencia mecánica y la tenacidad del material (20).

Los resultados de los ensayos de extracción y procesamiento de celulosa revelan una dependencia con las condiciones de formulación para obtener características que se consideren parte de un biopolímero. El ensayo 3, al obtener una masa opaca de color amarillo intenso y sin evidencia de polimerización efectiva, representa un fracaso en el proceso de aislamiento. La opacidad en biopolímeros celulósicos suele deberse a la presencia de impurezas (como lignina o hemicelulosa residuales) o a un alto grado de agregación de fibras (microfibras o nanofibras) que causan una dispersión de la luz significativa (21).

En los sub-ensayos 3.1 y 3.2, la persistencia de una textura blanda y húmeda después de 24 horas de secado sugiere una alta higroscopicidad, asociada a una estructura polimérica desordenada incapaz de consolidar una matriz estable. La celulosa, componente principal del biopolímero, se caracteriza por su capacidad de formar enlaces de hidrógeno intra- e intercatenarios, los cuales son determinantes para mantener la cohesión y rigidez estructural. Sin embargo, cuando la red polimérica presenta un arreglo más amorfo, la cantidad o estabilidad de dichos enlaces disminuye, lo cual favorece la penetración y retención de agua entre las cadenas. Este comportamiento explica la textura húmeda observada, lo cual indica una menor cristalización de la matriz celulósica y, por tanto, una menor estabilidad estructural del material obtenido (22).

El sub-ensayo 3.3, por el contrario, logró las características más prometedoras: estructura uniforme, color blanquecino, superficie lisa y brillante, y un grado de transparencia comparable al de un biopolímero convencional. Este resultado favorable indica que el proceso de extracción y/o formación de la película alcanzó una alta pureza de celulosa (blanquecino) y un arreglo estructural homogéneo. La transparencia en la celulosa se maximiza cuando las fibras se dispersan a nivel nanométrico (nanocelulosa) o cuando se logra una estructura amorfa uniforme que minimiza la dispersión de la luz visible (23). El éxito del sub-

ensayo 3.3 al obtener una matriz lisa, uniforme y transparente sugiere una estructura molecular que equilibra la integridad para su aplicación con una bioaccesibilidad potencial para su degradación final (24).

El ensayo 4 representa un éxito significativo en la optimización de la formulación del biopolímero, del cual se obtuvo un film con características ópticas y morfológicas ideales: tonalidad blanquecina con tendencia a la transparencia, superficie lisa, homogénea y con brillo evidente, propiedades que son altamente deseables en bioplásticos de alto rendimiento, como los derivados de celulosa, para aplicaciones de empaque (25). La estabilidad y consistencia de estas propiedades, incluso bajo condiciones de secado acelerado en estufa y secado ambiente, es particularmente relevante, ya que demuestra un control superior de la humedad residual y evita la migración de aditivos o la retrogradación de la matriz polimérica, factores que suelen comprometer la calidad del producto final y su desempeño a largo plazo (26).

Los resultados revelan que la transparencia del film biopolimérico está fuertemente influenciada por la formulación, con diferencias significativas entre los ensayos < 0,001. Las formulaciones puras de celulosa (E3) y celulosa-quitosano (E3.1) resultaron totalmente opacas, sugiriendo una alta cristalinidad o agregación molecular que dispersa la luz (27). Por el contrario, la incorporación de almidón a niveles óptimos (E3.3 con 0,50 g y E4) demostró un efecto positivo y estadísticamente idéntico (p-ajustado = 1,000) al lograr un grado de transparencia elevado y una superficie homogénea. Este hallazgo se alinea con la investigación actual en biopolímeros, donde la adición de polisacáridos o plastificantes bien dispersos es clave para reducir la rugosidad superficial y la heterogeneidad de la matriz, de modo que mejora la transmisión de luz y se acerca a las propiedades ópticas del plástico convencional (28). El logro de la transparencia en estos films, que además debido a sus componentes (celulosa - almidón) son biodegradables, representan un paso importante hacia la creación de envases sostenibles que puedan competir en funcionalidad con los materiales convencionales (29).

El análisis de la pérdida total de peso (biodegradabilidad) tras 6 días de exposición a la radiación UV demostró una diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones ensayadas (p < 0,001), indicando que la composición del biopolímero afecta críticamente su estabilidad. La radiación UV actúa como un catalizador de la foto-degradación, que inicia la escisión de las cadenas poliméricas de polisacáridos como la celulosa y el almidón (30). Las variaciones observadas en la mediana de la pérdida de peso confirman que los componentes específicos (E3, E3.1, E3.2, E3.3, E4) modulan la susceptibilidad del film a la degradación. Para el desarrollo sostenible, es vital que las formulaciones equilibren una biodegradabilidad rápida con una estabilidad funcional adecuada bajo exposición solar (31).

CONCLUSIONES

- La opacidad total observada en los filmes elaborados únicamente a base de resina (ensayos 1 y 2) sugiere la formación de una estructura polimérica altamente desordenada. Este hallazgo descarta la utilidad de esta matriz para aplicaciones en la industria de los bioplásticos que requieran transparencia.
- La transparencia del biopolímero celulósico-amiláceo está fuertemente determinada por su formulación, específicamente la incorporación de almidón a niveles óptimos (ensayos E3.3 y E4) demostró ser el factor más eficaz para alcanzar grados de transparencia competitivos con otros biopolímeros del mercado.
- La composición del biopolímero resultó ser clave en su susceptibilidad a la degradación por radiación UV. La exposición confirmó que el mecanismo de fotodegradación se ve modulado por la presencia de distintos aditivos (quitosano y almidón) en las formulaciones.
- Basado en la evaluación de las propiedades ópticas, las formulaciones E3.3 (celulosa con 0,50 g de almidón) y E4 (celulosa y almidón) se postulan como las más adecuadas y prometedoras para la elaboración de biopolímeros. Estas representan una opción viable para la producción de productos de un solo uso, como platos, vasos y sorbetes.

BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez Sandoval P, Arévalo MI. Los materiales biodegradables, una alternativa a la contaminación de los polímeros sintéticos. Revista de la Escuela de Ingenierías y Tecnologías Unimonserrate [Internet]. 18 de febrero de 2021 [citado 2 de noviembre de 2025];(1):29-37. DOI: <http://doi.org/10.29151/reit.n1a3>
- Wu J, Wang J, Zeng Y, Sun X, Yuan Q, Liu L, et al. Biodegradation: the best solution to the world problem of discarded polymers. Bioresour Bioprocess [Internet]. 1 de diciembre de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];11(1). DOI: <http://doi.org/10.1186/s40643-024-00793-1>
- Dallaev R, Papež N, Allaham MM, Holcman V. Biodegradable polymers: properties, applications, and environmental impact. Polymers (Basel) [Internet]. 1 de julio de 2025 [citado 2 de noviembre de 2025];17(14). DOI: <http://doi.org/10.3390/polym17141981>
- Renneboog R. Química de polímeros [Internet]. 2024. p. 1-10. Available from: <https://www.ebsco.com/research-starters/engineering/polymer-chemistry#full-article>
- Kaur R, Pathak L, Vyas P. Biobased polymers of plant and microbial origin and their applications - a review. Biotechnology for Sustainable Materials [Internet]. 11 de octubre de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];1(1). DOI: <http://doi.org/10.1186/s44316-024-00014-x>
- Vroman I, Tighzert L. Biodegradable polymers. Materials [Internet]. 25 de febrero de 2009 [citado 2 de noviembre de 2025];2(1996-1944):307-44. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma2020307>
- Hernández Silva ML, Guzmán Martínez B. Biopolymers used in the manufacture of food packaging. Revista Publicaciones e investigación [Internet]. 19 de agosto de 2009 [citado 17 de octubre de 2025];3(1900-6608):1900-6608. Available from: <https://diainet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8660003>
- Shah S, Kumar A. Production and characterization of polyhydroxyalkanoates from industrial waste using soil bacterial isolates. Brazilian Journal Microbiology [Internet]. 15 de febrero de 2021 [citado 2 de noviembre de 2025];52:715-26. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42770-021-00452-z/Published>
- Mendoza Reyes O. Fabricación y caracterización física de biopolímeros a base de algas [Internet]. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas; 2024 [citado 17 de octubre de 2025]. Available from: <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/5257/Oswaldo%20Reyes.pdf?sequence=1>
- Altamirano Caicedo MA. Estudio de la cadena productiva de uvilla (*Physalis peruviana* L.) en la Sierra Norte del Ecuador [Internet]. Universidad de San Francisco de Quito; 2010 [citado 17 de octubre de 2025]. Available from: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/950/1/95220.pdf>
- Escalante M, Santos I, Rojas LB, Lárez Velásquez C. Aprovechamiento de desechos orgánicos: 1. Extracción y caracterización del aceite de semillas de naranja colectadas en expendios ambulantes de jugos. Journal Redalyc [Internet]. 3 de diciembre de 2012 [citado 17 de octubre de 2025];7(3):181-6. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/933/93325703004.pdf>
- Tituaña Pulluquiti IG, Córdova Guambo IV, Tobar Jácome MC, Lascano Sumbana AV. Estudio del proceso de obtención de extractos de plantas medicinales. Revista Caribeña de Ciencias Sociales [Internet]. Mayo de 2018;1-28. Available from: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/05/extractos-plantas-medicinales.html>
- Durán García ME, Ruiz Navas RA. Diseño de equipos de contacto sólido-líquido a elevadas presiones en el procesamiento de la biomasa. Revista Ciencia y Tecnología [Internet]. 2015 [citado 2 de noviembre de 2025];15(1850-0870):25-40. Available from: https://www.researchgate.net/publication/311881251_Diseño_de_equipos_de_contacto_sólido-líquido_a_elevadas_presiones_en_el_procesamiento_de_la_biomasa
- Canché-Escamilla G, De Los Santos-Hernández JM, Andrade-Canto S, Gómez-Cruz R. Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano. Revista Información Tecnológica [Internet]. 2005 [citado 2 de noviembre de 2025];16(1):83-8. DOI: <http://doi.org/10.4067/s0718-07642005000100012>
- Castillo R, Escobar E, Fernández D, Gutiérrez R, Morcillo J, Núñez N, et al. Bioplástico a base de la cáscara del plátano. Revista de Iniciación Científica [Internet]. Agosto de 2015 [citado 2 de noviembre de 2025];1. Available from: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/346/339>
- Sánchez Vásquez VL, Chenche López OM. Obtención y caracterización de quitosano a partir de residuos de

- cangrejo rojo (*Procambarus clarkii*). Reincisol [Internet]. 10 de octubre de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];3(6):3166-79. DOI: [http://doi.org/10.59282/reincisol.v3\(6\)3166-3179](http://doi.org/10.59282/reincisol.v3(6)3166-3179)
17. Matas A. Diseño del formato de escalas tipo Likert: Un estado de la cuestión. *Revista Electrónica de Investigación Educativa* [Internet]. 2018 [citado 2 de noviembre de 2025];20(1):38-47. DOI: <http://doi.org/10.24320/redie.2018.20.1.1347>
 18. San Andrés M, Chércoles R, De la Roja J, Gómez M. Factores responsables de la degradación química de los polímeros. In: Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados. Factores responsables de la: Restauración [Internet]. 2006 [citado 2 de noviembre de 2025];283-307. Available from: <https://www.cultura.gob.es/dam/jcr:d7cb6b8e-3c5f-41d4-8726-6894ea9ea575/factrespxir-einasof.pdf>
 19. Coreño-Alonso J, Méndez-Bautista MT. Relationship between structure and properties of polymers. *Educación Química* [Internet]. 2010 [citado 2 de noviembre de 2025];21(4):291-9. DOI: [http://doi.org/10.1016/s0187-893x\(18\)30098-3](http://doi.org/10.1016/s0187-893x(18)30098-3)
 20. McKean LW. Introduction to Plastics and Polymers. In: *Fatigue and Tribological properties of plastics and elastomers* [Internet]. Elsevier; 2010 [citado 2 de noviembre de 2025]. p. 39-50. DOI: <http://doi.org/10.1016/b978-0-08-096450-8.00003-x>
 21. Alvarado-Rojas M, Castro-Brenes J. Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza. *Revista Redalyc* [Internet]. 21 de marzo de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];37(2215-3241):162-71. Available from: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v37n4/699878907014.pdf>
 22. Morán MT, Piñero DC. Redefiniendo la celulosa. La rama verde de los nuevos materiales. *Revista Centro de estudios en Diseño y Comunicación* [Internet]. Marzo de 2025 [citado 2 de noviembre de 2025]; (1668-0227):69-84. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10145048>
 23. Pérez-Rodríguez ÁT, Batista-Zaldívar MA, Velásquez-Infante JC, García-Arias JM. Acetato de celulosa del bagazo de la caña de azúcar: plastificación y evaluación de propiedades. *Ciencias Holguín* [Internet]. marzo de 2014 [citado 2 de noviembre de 2025];XX(1027-2127):1-10. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181529931001.pdf>
 24. Rodríguez-Alba E, Bernal Dubón AE, Gaitán López HE, Godoy CAK, Salguero Mérida JB, Toledo Hernández EM, et al. La Ciencia de los polímeros biodegradables [Internet]. 2013 mar [citado 2 de noviembre de 2025]. Available from: https://www.ugto.mx/investigaciony-posgrado/veranos/images/2021/docs/Monografia_Dr_Martinez_Richa_et_al_La_ciencia_de_los_polimeros.pdf
 25. Pérez-Rodríguez AT, Batista-Zaldívar MA, Velásquez-Infante JC, García-Arias JM, et al. Acetato de celulosa del bagazo de la caña de azúcar: plastificación y evaluación de propiedades. *Ciencias Holguín. Ciencias Holguín* [Internet]. 2014;XX(1):1-10. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181529931001>
 26. Flores-Córdova MA, Uribe-Cruz G, Salas-Salazar N, Sáenz-Mendoza A, Calderón-Loera R. Efecto de la temperatura de secado en las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua de películas de almidón de maíz. *Revista Iberoamericana de Polímeros* [Internet]. enero de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];25:1-14. Available from: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2024/06/2024-25-1-1-14.pdf>
 27. Avérous L, Pollet E. Environmental silicate nanobiocomposites. *Green energy and technology* [Internet]. 2012 [citado 2 de noviembre de 2025];50. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4108-2>
 28. Rhim JW, Park HM, Ha CS. Bio-nanocomposites for food packaging applications [Internet]. Vol. 38, *Progress in Polymer Science*. Elsevier Ltd; 2013 [citado 2 de noviembre de 2025]. p. 1629-52. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>
 29. Tajeddin B. Cellulose-Based polymers for packaging applications. *lignocellulosic polymer composites* [Internet]. 2015 [citado 2 de noviembre de 2025]; 1:477-98. Available from: https://www.researchgate.net/publication/278318257_Cellulose-Based_Polymers_for_Packaging_Applications
 30. Afshar S V., Boldrin A, Astrup TF, Daugaard AE, Hartmann NB. Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review. *J Clean Prod* [Internet]. 1 de enero de 2024 [citado 2 de noviembre de 2025];434. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140000>
 31. Singh B, Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym Degrad Stab* [Internet]. marzo de 2008 [citado 2 de noviembre de 2025];93(3):561-84. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2007.11.008>