

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPELÍCULAS
BIODEGRADABLES A BASE DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES COMO CÁSCARA DE CHOCHO
(LUPINUS MUTABILIS) Y ALMIDÓN DE YUCA (MANIHOT
ESCULENTA)**

**DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF BIODEGRADABLE
BIOFILMS BASED ON AGRO-INDUSTRIAL RESIDUES SUCH AS
CHOCHO (LUPINUS MUTABILIS) HUSK AND CASSAVA STARCH
(MANIHOT ESCULENTA)**

Mayra Paredes Escobar

Universidad Técnica de Ambato (UTA)

Nelly Flores Tapia

Universidad Técnica de Ambato (UTA)

Aldás Miguel

Departamento de Ciencias de los Alimentos y Biotecnología

Milena Peñafiel

Universidad Técnica de Ambato (UTA)

Carlos Moreno

Universidad Técnica de Ambato (UTA)

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22483

Desarrollo y caracterización de biopelículas biodegradables a base de residuos agroindustriales como cáscara de chocho (*LUPINUS MUTABILIS*) y almidón de yuca (*MANIHOT ESCULENTA*)

Mayra Paredes Escobar¹ml.paredes@uta.edu.ec<https://orcid.org/0000-0001-9320-9177>Biosynergia Research Group, Food and
Biotechnology Faculty, Universidad Técnica de
Ambato (UTA), Ecuador**Nelly Flores Tapia**nellyflorestapia@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-0851-8117>Research and Development Directorate, Food
and Biotechnology Faculty, Grupo de
Investigación G+ Biofood & Engineering,
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ecuador**Aldás Miguel**miguel.aldas@epn.edu.ec<https://orcid.org/0000-0003-3491-6618>Centro de Investigaciones Aplicadas a
Polímeros, Departamento de Ciencias de los
Alimentos y Biotecnología, Escuela Politécnica
Nacional, Ecuador**Milena Peñafiel**mile-lis2011@hotmail.comFood and Biotechnology Faculty, Universidad
Técnica de Ambato (UTA), Ecuador**Carlos Moreno**cs.moreno@uta.edu.ec<https://orcid.org/0000-0003-0238-6886>Biosynergia Research Group, Food and
Biotechnology Faculty, Universidad Técnica de
Ambato (UTA), Ecuador

¹ Autor principalCorrespondencia: nellyflorestapia@gmail.com

RESUMEN

La contaminación ambiental generada por plásticos de un solo uso constituye un desafío global que impulsa el desarrollo de materiales biodegradables basados en recursos renovables. En este estudio se desarrollaron y caracterizaron biopelículas biodegradables mediante la técnica de *casting*, empleando harina de cáscara de chocho (*Lupinus mutabilis*) y almidón de yuca (*Manihot esculenta*), subproductos agroindustriales abundantes en Ecuador. Se aplicó un diseño experimental factorial con el objetivo de optimizar la formulación y evaluar la influencia de los componentes sobre las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de biodegradabilidad del material. Las biopelículas obtenidas presentaron espesores entre 0.15 y 0.43 mm, contenidos de humedad de 12.83–24.85% y solubilidades en agua comprendidas entre 21.94 y 48.66%. La permeabilidad al vapor de agua se situó en el orden de 10^{-7} g·mm/cm²·h·Pa, valores significativamente superiores a los del polietileno de baja densidad (LDPE) utilizado como control (3.15×10^{-12} g·mm/cm²·h·Pa), reflejando la naturaleza hidrofílica de la matriz biopolimérica. Entre las formulaciones evaluadas, el tratamiento T3 evidenció el mejor compromiso entre propiedades, mostrando una menor permeabilidad al vapor de agua en comparación con las demás formulaciones. Desde el punto de vista mecánico, las biopelículas alcanzaron resistencias máximas a la tracción de hasta 6.02 N y deformaciones máximas de 3.99 mm, valores adecuados para aplicaciones que no requieren alta carga estructural. Los ensayos de integridad en simulantes alimentarios (agua destilada y aceite de oliva) demostraron una mayor estabilidad estructural y baja permeabilidad en medios grasos, mientras que en medio acuoso se observó una pérdida progresiva de integridad. Las pruebas de biodegradabilidad en suelo evidenciaron una degradación significativa del material en un periodo de 28 días. Con base en su comportamiento mecánico, estabilidad en medios lipídicos y rápida biodegradación, se propone el uso potencial de estas biopelículas como material biodegradable para separadores entre láminas de queso mozzarella. En conjunto, los resultados indican que, particularmente la formulación T3, estas biopelículas representan una alternativa técnica y ambientalmente viable a los plásticos convencionales, contribuyendo a la economía circular mediante la valorización de residuos agroindustriales y el desarrollo de materiales sostenibles de origen local.

Palabras clave: Biofilms, *Lupinus mutabilis*, cassava starch, mechanical properties, by-product valorization



Development and characterization of biodegradable biofilms based on agro-industrial residues such as chocho (*LUPINUS MUTABILIS*) husk and cassava starch (*MANIHOT ESCULENTA*)

ABSTRACT

The increasing environmental burden caused by single-use plastics has intensified the search for biodegradable materials derived from renewable resources. In this study, biodegradable biopolymer films were developed and characterized using the casting technique, incorporating *Lupinus mutabilis* (chocho) pod flour and cassava (*Manihot esculenta*) starch, two abundant agro-industrial by-products in Ecuador. A factorial experimental design was applied to optimize the film formulation and to evaluate the influence of the biopolymeric components on the physicochemical, mechanical, and biodegradation properties of the resulting materials. The obtained films exhibited thicknesses ranging from 0.15 to 0.43 mm, moisture contents between 12.83 and 24.85%, and water solubility values of 21.94–48.66%. Water vapor permeability (WVP) was in the order of $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{mm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, which is several orders of magnitude higher than that of low-density polyethylene (LDPE) used as a reference material ($3.15 \times 10^{-12} \text{ g}\cdot\text{mm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$), reflecting the inherently hydrophilic nature of the biopolymer matrix. Among the evaluated formulations, treatment T3 exhibited the most balanced performance, showing reduced WVP compared to the other formulations. Mechanical testing revealed maximum tensile forces of up to 6.02 N and elongation values reaching 3.99 mm, indicating adequate mechanical integrity for low-load packaging applications. Film integrity tests conducted in food simulants (distilled water and olive oil) demonstrated higher structural stability and lower permeability in lipid media, whereas a progressive loss of integrity was observed in aqueous environments. Soil burial biodegradation assays confirmed a significant degradation of the films within 28 days. Based on their mechanical performance, lipid-media stability, and rapid biodegradability, these biopolymer films are proposed as biodegradable separator materials for mozzarella cheese slices. Overall, the results demonstrate that chocho pod flour–cassava starch films, particularly formulation T3, constitute a technically feasible and environmentally sustainable alternative to conventional plastic materials, contributing to circular economy strategies through the valorization of agro-industrial residues.

Keywords: Biopolymer films, *Lupinus mutabilis*, cassava starch, mechanical properties, by-product valorization

Artículo recibido 12 diciembre 2025

Aceptado para publicación: 18 enero 2026



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la generación de residuos plásticos provenientes de envases alimentarios ha intensificado los problemas de contaminación ambiental debido a su baja tasa de degradación y persistencia en los ecosistemas (Perera et al., 2023). Este escenario ha motivado la exploración de alternativas sostenibles basadas en biopolímeros tales como almidones, proteínas y fibras vegetales, los cuales se caracterizan por su alta disponibilidad, bajo costo y biodegradabilidad (Zavareze & Dias, 2022). En este contexto, las biopelículas obtenidas a partir de subproductos agroindustriales se posicionan como una opción prometedora para el desarrollo de materiales de envasado ecológicos.

El chocho genera cáscaras ricas en fibra dietaria, compuestos fenólicos y minerales, las cuales pueden contribuir a la mejora de las propiedades funcionales de las biopelículas (Ichina, 2021). Por su parte, el almidón de yuca se emplea ampliamente debido a su capacidad filmógena, transparencia y biodegradabilidad (López et al., 2023); no obstante, presenta limitaciones asociadas a su baja resistencia mecánica y elevada permeabilidad al vapor de agua. La incorporación de fibras provenientes de la cáscara de chocho podría mejorar estos parámetros, aunque plantea desafíos relacionados con la compatibilidad interfacial y el equilibrio entre flexibilidad, solubilidad y biodegradabilidad. En consecuencia, el objetivo del presente estudio fue caracterizar una biopelícula degradable elaborada a partir de cáscara de chocho y reforzada con almidón de yuca, destinada a aplicaciones en el sector alimentario, mediante la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de biodegradación, como una alternativa sostenible frente a los envases plásticos convencionales.

Los recortes industriales de cuero (“wet blue leather, WBL”) y las cáscaras de huevo provenientes de residuos alimentarios han sido ampliamente estudiados como rellenos sostenibles y de bajo costo para matrices poliméricas y otros sistemas, principalmente con el propósito de incrementar la rigidez y la estabilidad térmica, al mismo tiempo que se promueve la valorización de residuos.

Tipos de composites y aplicaciones objetivo

- Wet blue leather (WBL): Se ha incorporado en matrices como PLA, PA12, TPU, TPE, PBAT, PBS, caucho natural, PP reciclado, PVB y otros sistemas, orientados a aplicaciones estructurales, productos con apariencia tipo cuero y elastómeros (Nanni et al., 2021; Ambrósio et al., 2011; Moses et al., 2017).



- Cáscara de huevo: Se ha utilizado en termoplásticos (LDPE, PP, PVC, epóxicos, GFRP), películas de almidón, materiales de cambio de fase a base de PEG, metales, cerámicos y bioimplantes híbridos (Vandeginste, 2021; Admase et al., 2025; Aribia et al., 2024; Gbadeyan et al., 2020; Sunardi et al., 2023; Perera et al., 2025; Shukla et al., 2024; Shin et al., 2020; Skórczewska et al., 2022).

- Existen además aplicaciones en el ámbito de la construcción y materiales cementicios para virutas de WBL (Canhada et al., 2023) y para CaCO_3 derivado de cáscara de huevo (Vandeginste, 2021; Sunardi et al., 2023).

- Los composites con WBL se producen comúnmente mediante mezclado en fundido (extrusores de doble tornillo o mezcladores internos), seguido de moldeo por inyección o compresión. Sus propiedades están fuertemente influenciadas por la relación de aspecto de las fibras de cuero y la compatibilidad con la matriz (Nanni et al., 2021; Raksaksri & Phunpeng, 2022; Nazir et al., 2024).

La cáscara de huevo suele someterse a lavado, secado y molienda (y en algunos casos calcinación o carbonización), para luego ser incorporada por mezclado en fundido o por moldeo por colada (casting). La reducción del tamaño de partícula y los tratamientos superficiales mejoran la dispersión y los incrementos en las propiedades mecánicas (Vandeginste, 2021; Sunardi et al., 2023; Perera et al., 2025; Shin et al., 2020; Skórczewska et al., 2022).

Ambos rellenos contribuyen a la reducción de residuos peligrosos o voluminosos y disminuyen el uso de CaCO_3 mineral virgen (Nanni et al., 2021; Vandeginste, 2021; Sunardi et al., 2023; Canhada et al., 2023).

Las cáscaras de huevo aportan estabilidad térmica, propiedades barrera y, en algunos sistemas, capacidad de almacenamiento de energía por cambio de fase (Admase et al., 2025; Aribia et al., 2024; Skórczewska et al., 2022).

El WBL y el polvo de cuero pueden encapsularse de manera segura en matrices poliméricas o cementicias, limitando la lixiviación de cromo y generando materiales funcionales (Canhada et al., 2023; Moses et al., 2017).

Los composites basados en residuos de cuero wet blue y polvo de cáscara de huevo muestran de manera consistente un incremento en la rigidez y, con frecuencia, mejoras en la resistencia mecánica y la estabilidad térmica, a costa de una reducción en la ductilidad cuando la adhesión interfacial no se

encuentra optimizada. La selección de la matriz, el tamaño y la relación de aspecto de las partículas, así como la modificación superficial, son factores críticos para ajustar el desempeño del material, permitiendo que estos rellenos derivados de residuos contribuyan al desarrollo de materiales sostenibles de grado ingenieril.

METODOLOGÍA

Obtención de la cascara de chocho y almidón de yuca

La cáscara, de chocho desamargado, y pulverizada se adquirió en Sigchos, Cotopaxi, Ecuador, mientras que el almidón de yuca se obtuvo en mercados de Ambato.

Caracterización de la cáscara de chocho y almidón de yuca

- Índice de solubilidad en agua, absorción de agua y poder de hinchamiento:
- Los ensayos se realizaron siguiendo la metodología propuesta por Ichina (2021). Se pesaron 1,25 g de muestra seca, a los que se adicionaron 30 mL de agua destilada previamente calentada a 60 °C. La suspensión se agitó de manera constante y se incubó en un baño termostatzado a 60 °C durante 30 min, con el fin de promover la hidratación y el hinchamiento del material. Posteriormente, la mezcla se centrifugó a 4900 rpm durante 30 min, separándose la fracción gelificada del sobrenadante. Finalmente, se cuantificaron la fracción insoluble y el gel formado para el cálculo del índice de solubilidad en agua, la absorción de agua y el poder de hinchamiento.
- *pH*: Según INEN-ISO 1842 (INEN, 2013), se preparó una disolución de 5 g de muestra en 25 mL de agua, agitando hasta homogeneizar y midiendo con pH-metro calibrado a 25 °C.
- *Humedad*: Se pesaron 5 g de muestra y se determinó en balanza de humedad infrarroja (Mettler Toledo, 2023).
- *Contenido de ceniza*: Se pesaron 3 g de muestra y se incineró a 550 °C en mufla (AOAC, 2019).
- *Viscosidad*: Se disolvieron 25 g de cada muestra en 500 mL de agua, se hirvió 10 min, se enfrió a 25 °C y se midió con viscosímetro (Brookfield Engineering, 2021).
- *Entalpía y temperatura de gelatinización*: Se analizaron 5–10 mg de muestra en DSC (Mettler Toledo, 2024), registrando el pico endotérmico y calculando ΔH .



Formulación y desarrollo de la biopelícula

Se mezcló cáscara de chocho, almidón de yuca, glicerol y agua según el diseño experimental. Se homogenizó y calentó hasta gelatinización (80 °C), se enfrió a 60 °C y se incorporó glicerol, hasta homogeneizar. Por casting, se vertieron ~20 g de mezcla en cajas Petri y se secaron a 60 °C durante 12–24 h (Urgilés, 2021).

Diseño Experimental

Se aplicó un diseño factorial de tres factores y dos niveles (Moreno et al., 2024), variando concentraciones de cáscara de chocho, almidón de yuca y glicerol, manteniendo ácido acético (0,5 %) y agua (80 %) constantes, como control se utilizaron bolsas de plástico de polietileno comercial de espesor 0,03 mm. Se utilizó un análisis estadístico ANOVA para determinar si los factores tuvieron un efecto significativo en las propiedades de la biopelícula.

Tabla 1. Diseño experimental factorial para la formulación de biopelículas

Tratamiento	A: Cáscara de Chocho (%)	B: Almidón de yuca (%)	C: Glicerina (%)
T1	3,5	2,5	3,5
T2	7	2,5	3,5
T3	3,5	6	3,5
T4	7	6	3,5
T5	3,5	2,5	6,5
T6	7	2,5	6,5
T7	3,5	6	6,5
T8	7	6	6,5

Control = Bolsa de polietileno de baja densidad

Caracterización de las biopelículas

Propiedades fisicoquímicas y funcionales

- *Espesor*: Se midieron muestras de 2,5×2,5 cm con micrómetro (Ichina, 2021) y se calculó el promedio por tratamiento.
- *Humedad*: Se pesó 3 g de biopelícula y se determinó en la balanza de humedad por infrarrojo (Mettler Toledo, 2023).
- *Solubilidad en agua*: Muestras de 4×4 cm se agitaron en agua durante 1 h, filtraron y secaron a 40 °C (Urgilés, 2021).



- *Permeabilidad al vapor de agua*: Se utilizó gel de sílice, desecador a 100% HR y pesaje cada hora durante 6 h; se calculó WVP según ASTM D1653-93 (ASTM International, 2021).
- *Viscosidad*: Se evaluaron soluciones de 3 g de muestra en RVA antes del secado (Perten Instruments, 2011).
- *Entalpía de gelatinización*: Muestras de 5–10 mg se analizaron con DSC, registrando el pico endotérmico y ΔH (Mettler Toledo, 2024).

Propiedades funcionales

- *Color*: Se midió con colorímetro Konica Minolta (2023) en parámetros L^* , a^* , b^* .
- *Transparencia*: Se evaluó por espectrofotometría UV-VIS (200–800 nm) según Moreno et al. (2024).

Propiedades mecánicas y biodegradables

- *Resistencia mecánica*: Ensayo de tracción con analizador de textura Brookfield CT3.
- *Propiedades térmicas*: El análisis DSC se realizó en un equipo TA Instruments, utilizando cápsulas de aluminio y una cápsula vacía como referencia. Se analizaron 30–40 mg de muestra bajo atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 mL/min. Los ensayos se efectuaron desde temperatura ambiente hasta 300 °C, registrándose el flujo de calor en función de la temperatura. A partir de los termogramas se determinaron Tonset, Tend y la entalpía de gelatinización (ΔH) mediante la integración del pico endotérmico, con corrección de línea base y normalización por la masa de la muestra (J/g).
- *Integridad*: Evaluación en simuladores de alimentos (agua destilada y aceite de oliva) siguiendo ASTM D1653-93 (2021) y RTE INEN 100 (2014).
- *Biodegradabilidad*: Se expusieron a aire, agua y entierro en suelo orgánico con seguimiento visual durante 28 días (Urgilés, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la materia prima

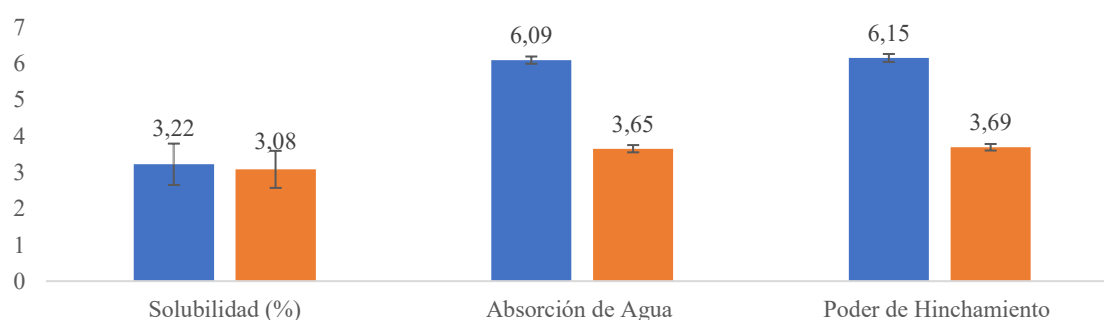
Índice de solubilidad en agua, absorción de agua y poder de hinchamiento

Los resultados presentados en la Figura 1, evidencian que el almidón de yuca exhibió una mayor absorción de agua (6,09 g/g) y mayor poder de hinchamiento (6,15 g/g) en comparación con la cáscara



de chocho (3,65 g/g y 3,69 g/g, respectivamente), diferencias que resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,001$). Este comportamiento se atribuye a la composición estructural del almidón, el cual está constituido típicamente por 20–30 % de amilosa y 70–80 % de amilopectina, siendo esta última responsable de la elevada capacidad de hidratación y expansión granular debido a su estructura altamente ramificada (Chamorro et al., 2025). En contraste, la cáscara de chocho contiene una mayor proporción de fibra insoluble y estructuras lignificadas, las cuales restringen la penetración del agua y limitan los fenómenos de hinchamiento y absorción. Por el contrario, la solubilidad en agua fue similar para ambas matrices (3,22 % en almidón y 3,08 % en cáscara), sin diferencias significativas ($p = 0,390$), lo que indica que este parámetro no constituye un criterio discriminante para diferenciar funcionalmente el comportamiento hidrofílico de ambos materiales.

Figura 1. Análisis gráfico de la solubilidad, absorción de agua y poder de hinchamiento del almidón de yuca y la harina de cáscara de chocho, donde (●) Almidón de yuca y (●) Cáscara de chocho



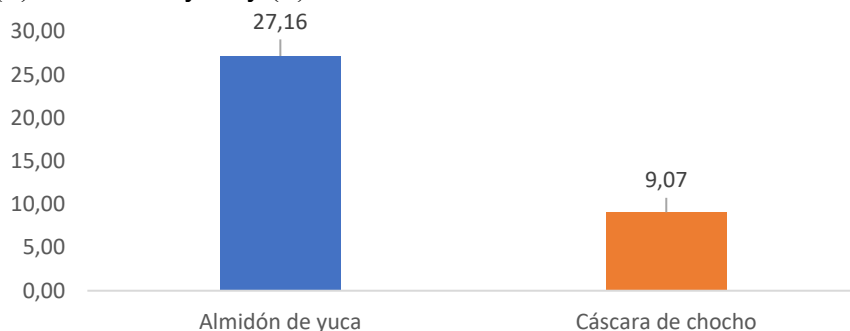
Análisis de pH, humedad, ceniza y viscosidad

El análisis fisicoquímico, presentado en la Tabla 2, mostró que ambos materiales tenían pH ligeramente ácido (almidón 5,56; cáscara 5,33; $p = 0,069$). El contenido de humedad fue mayor en el almidón (12,41 %) que en la cáscara (7,20 %) ($p < 0,01$), mientras que la cáscara presentó más cenizas (2,14 % vs. 0,49 %; $p < 0,001$), reflejando mayor concentración mineral. La viscosidad del almidón fue significativamente mayor, indicando su capacidad para formar geles tras la gelatinización, en contraste con la cáscara, cuya baja viscosidad se asoció a su alto contenido de fibra insoluble y menor porcentaje de polisacáridos que se pueden gelatinizar. El almidón de yuca mostró propiedades funcionales superiores para absorción de agua y formación de gel, mientras que la cáscara de chocho destacó por su aporte mineral y fibroso.

Tabla 2. Análisis de pH, humedad, ceniza y viscosidad del almidón de yuca y la cáscara de chocho.

Parámetro	Almidón de yuca	Cáscara de chocho
pH	5.56 ± 0.16	5.33 ± 0.15
Humedad (%)	12.41 ± 0.22	7.20 ± 1.22
Ceniza (%)	0.49 ± 0.09	2.14 ± 0.08
Viscosidad (cP)	3350.83 ± 977.45	282.67 ± 67.68

Entalpía de gelatinización

Figura 1. Comparación de la entalpía de gelatinización entre el almidón de yuca y la cáscara de chocho, (●) Almidón de yuca y (●) Cáscara de chocho.

Al revisar la Figura 2, la entalpía media de gelatinización del almidón de yuca fue de $27,16 \pm 2,57$ J/g, indicando la energía requerida para desorganizar su estructura cristalina durante la gelatinización. Este valor se encuentra dentro del rango reportado para almidones de tubérculos y raíces tropicales (18–25 J/g, Wang et al., 2015; 20–23 J/g, Oliveira et al., 2018). En contraste, la cáscara de chocho presentó una entalpía significativamente menor, debido a su bajo contenido de almidón, mientras que almidones de maíz y papa muestran valores mayores (25–30 J/g) por diferencias en estructura granular, tamaño de cristal y contenido de amilosa (Sánchez & Martínez, 2017), evidenciando que las propiedades térmicas dependen del origen y procesamiento.

Caracterización de la biopelícula

Las biopelículas evaluadas mediante inspección visual presentaron una morfología homogénea y un comportamiento mecánico maleable, con la presencia de microburbujas aisladas que no comprometieron su integridad estructural. Estas características confirman que la adecuada gelatinización del almidón, junto con la acción plastificante del glicerol, favorece la formación de matrices biopoliméricas

continuas, flexibles y con resistencia mecánica suficiente, en concordancia con lo reportado en estudios previos (Muñoz et al., 2022).

Espesor, humedad, solubilidad y permeabilidad al vapor de agua (PVA)

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de las biopelículas

Tratamiento	Espesor (mm)	Humedad (%)	Solubilidad (%)	Permeabilidad ($\times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{cm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$)
Control	$0,03 \pm 0,01^a$	$0,27 \pm 0,21^a$	$0,03 \pm 0,00^a$	$* 3,15 \text{ E-}12 \pm 0,00^a$
T1	$0,40 \pm 0,08^c$	$16,97 \pm 0,67^d$	$24,40 \pm 0,56^c$	$7,87 \pm 0,19^h$
T2	$0,38 \pm 0,08^c$	$12,83 \pm 0,71^c$	$48,66 \pm 0,61^h$	$6,89 \pm 0,15^f$
T3	$0,15 \pm 0,03^{ab}$	$14,82 \pm 0,31^c$	$21,94 \pm 0,87^b$	$* 6,23 \text{ E-}08 \pm 1,17^b$
T4	$0,43 \pm 0,04^c$	$15,23 \pm 0,91^c$	$31,43 \pm 0,48^d$	$7,19 \pm 0,03^g$
T5	$0,29 \pm 0,09^{bc}$	$24,85 \pm 0,21^g$	$33,26 \pm 0,41^e$	$2,89 \pm 0,14^d$
T6	$0,25 \pm 0,06^{bc}$	$17,36 \pm 0,42^d$	$36,94 \pm 0,82^f$	$2,25 \pm 0,06^c$
T7	$0,3 \pm 0,07^{bc}$	$19,67 \pm 0,75^e$	$22,17 \pm 0,33^b$	$3,34 \pm 0,07^e$
T8	$0,39 \pm 0,09^c$	$21,47 \pm 0,58^f$	$42,43 \pm 0,53^g$	$8,15 \pm 0,10^h$

Nota. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

El análisis del espesor de las biopelículas (Tabla 3) evidenció que la composición de la formulación tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre esta propiedad (prueba de Tukey, $p < 0,05$), observándose valores comprendidos entre 0,15 y 0,43 mm, en contraste con el material de control de polietileno de baja densidad (LDPE), que presentó un espesor significativamente menor (0,03 mm). Las formulaciones T1, T2, T4 y T8 conformaron el grupo con mayores espesores (letra “c”), mientras que el tratamiento T3 generó la biopelícula más delgada ($0,15 \pm 0,03$ mm; grupo “ab”), evidenciando que la variación del espesor no respondió a un efecto lineal simple de los factores evaluados (Ali et al, 2019).

El comportamiento observado sugiere la presencia de interacciones entre la cáscara de chocho (A) y el almidón de yuca (B). En formulaciones con bajo contenido de cáscara de chocho (3,5 %) y bajo plastificante (3,5 %), el incremento del almidón de yuca de 2,5 % (T1) a 6 % (T3) condujo a una reducción marcada del espesor, lo que puede asociarse a una mayor gelatinización y compactación de la matriz polimérica. En contraste, cuando la cáscara de chocho se incrementó a 7 %, el aumento del

almidón de yuca de 2,5 % (T2) a 6 % (T4) produjo un incremento del espesor, posiblemente debido a una mayor contribución de la fracción fibrosa que limita el empaquetamiento eficiente de las cadenas poliméricas. Este comportamiento confirma que el efecto del almidón sobre el espesor depende del nivel de fibra presente en la formulación (de Carvalho, 2021).

Asimismo, el contenido de glicerina (C) mostró una tendencia general a reducir el espesor de las biopelículas, particularmente en formulaciones con bajo o moderado contenido de almidón, lo que puede atribuirse al aumento de la movilidad de las cadenas poliméricas y a una mejor redistribución de la matriz durante el secado. No obstante, este efecto también estuvo condicionado por la interacción con los factores A y B, reforzando la naturaleza multifactorial del sistema (Prashnanth, 2023).

En comparación con el LDPE, las biopelículas presentaron espesores entre 5 y 14 veces superiores, lo cual es característico de materiales obtenidos por *casting* a partir de matrices hidrofílicas. Sin embargo, estos mayores espesores no se tradujeron en una mejora proporcional de las propiedades de barrera al vapor de agua, lo que pone de manifiesto que la permeabilidad está dominada principalmente por la naturaleza química de la matriz y no únicamente por el espesor del material (Ji, et al., 2021). En conjunto, los resultados confirman que el espesor de las biopelículas está fuertemente influenciado por la composición y las interacciones entre almidón, fibra y plastificante, constituyendo un parámetro clave para el diseño de formulaciones con propiedades funcionales controladas.

En relación con las demás propiedades fisicoquímicas presentadas en la Tabla 3, todas las biopelículas mostraron contenidos de humedad significativamente superiores al material de control de polietileno de baja densidad (LDPE), cuyos valores fueron prácticamente despreciables. Las biopelículas presentaron humedades comprendidas entre 12,83 % y 24,85 %, lo que confirma el carácter marcadamente hidrofílico de las matrices basadas en almidón, fibra vegetal y glicerol. En general, las formulaciones con mayor contenido de glicerina tendieron a presentar mayores valores de humedad, evidenciando el efecto plastificante y la elevada afinidad del glicerol por el agua, aunque este comportamiento no fue estrictamente lineal, lo que sugiere la influencia de interacciones entre los componentes de la formulación (Siddhamsittiwat, 2025).

La solubilidad en agua de las biopelículas se ubicó en un rango elevado (21,94–48,66 %), en marcado contraste con el LDPE, cuya solubilidad fue prácticamente nula. Los tratamientos T3 y T7 presentaron



los menores valores de solubilidad, lo que indica una mayor cohesión interna de la matriz biopolimérica y una menor fracción de componentes lixiviables. Por el contrario, los tratamientos T2 y T8 mostraron las mayores solubilidades, comportamiento que puede atribuirse a una mayor proporción de plastificante y a una estructura de red menos compacta, favoreciendo la disolución parcial del material en contacto con el agua. Estos resultados delimitan claramente el uso de las biopelículas en aplicaciones donde la exposición prolongada a medios acuosos debe ser evitada (Li, et al 2024).

En cuanto a las propiedades de barrera, la permeabilidad al vapor de agua de las biopelículas se situó en el orden de 10^{-7} g·mm/cm²·h·Pa, valores varios órdenes de magnitud superiores a los del LDPE, lo que reafirma que la permeabilidad está dominada por la naturaleza química hidrofílica de la matriz más que por el espesor del material. Entre las formulaciones evaluadas, el tratamiento T3 presentó la menor permeabilidad, lo que sugiere una microestructura más compacta y una distribución más eficiente de los componentes poliméricos. No se observó una relación directa entre espesor y permeabilidad, ya que formulaciones más gruesas no necesariamente presentaron mejores propiedades de barrera, confirmando que la organización molecular y las interacciones intermoleculares son factores determinantes en el control de la transferencia de vapor de agua (Del Sommi, 2023).

Viscosidad (RVA)

Los resultados de viscosidad de las soluciones filmógenas mostraron variabilidad, de 52,00 cP en T5 hasta 1 809,33 cP en T3, atribuible a mayores proporciones de almidón y menor plastificante que generan redes más densas. El pico de viscosidad en frío varió poco entre tratamientos (84,67–92,00 cP) y se alcanzó en tiempos similares (9,7–9,9 min), indicando que la fluidez inicial y la cinética del proceso no se vieron afectadas por la composición de las formulaciones.



Tabla 4. Análisis de viscosidad en el RVA de las soluciones filmógenas de los 8 tratamientos

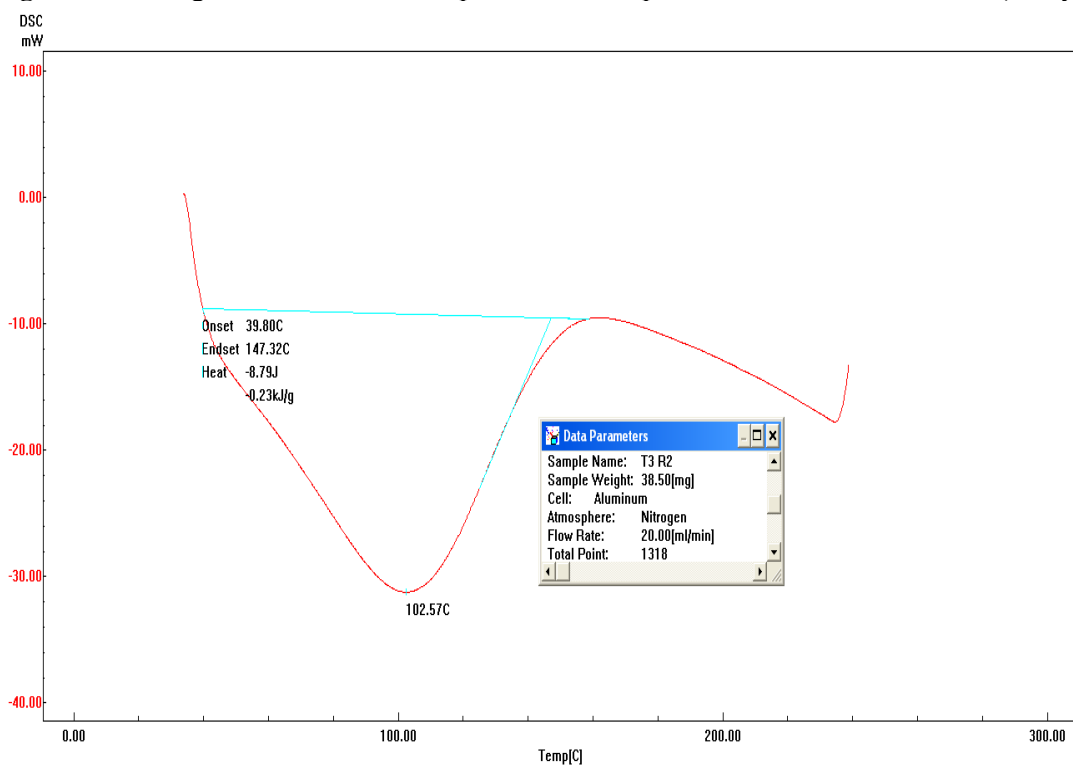
Tratamiento	Viscosidad final (cP)	Pico de viscosidad en frío (cP)	Tiempo en alcanzar el pico (min)
T1	112,00 ± 10,58	87,50 ± 3,54	9,90 ± 0,04
T2	112,67 ± 18,58	90,00 ± 2,65	9,95 ± 0,04
T3	1809,33 ± 466,07	85,67 ± 0,58	9,87 ± 0,12
T4	743,33 ± 219,58	91,33 ± 2,08	9,65 ± 0,50
T5	52,00 ± 17,35	84,67 ± 6,11	9,98 ± 0,04
T6	88,00 ± 34,60	92,00 ± 7,55	9,98 ± 0,04
T7	1464,00 ± 93,95	88,33 ± 0,58	9,98 ± 0,04
T8	1180,67 ± 249,74	86,00 ± 3,46	9,73 ± 0,23

Entalpía de gelatinización (DSC)

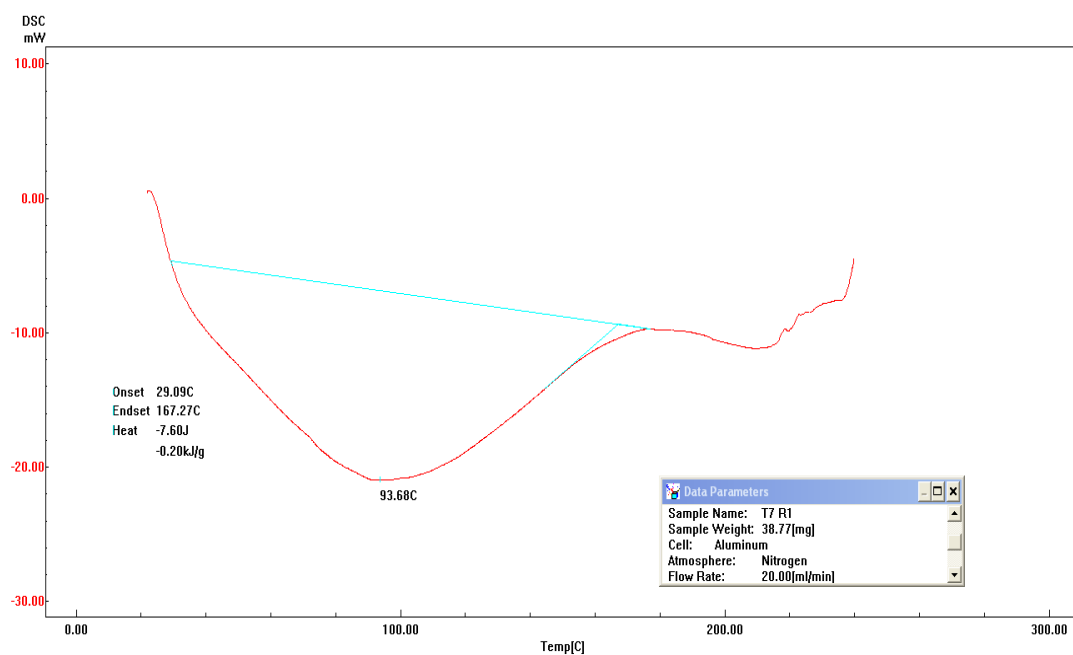
Los tratamientos T3 y T7 presentaron entalpías de gelatinización de $7,20 \pm 2,25$ J/g y $6,44 \pm 1,64$ J/g, respectivamente, tal como se observa en las Figuras 3 y 4, donde ambos tratamientos muestran valores del mismo orden de magnitud y una superposición parcial de las barras de error. El tratamiento T3 evidenció una entalpía ligeramente superior, lo que indica una mayor energía requerida para la disrupción de las regiones cristalinas de la matriz polimérica. Este comportamiento puede atribuirse a su mayor contenido de almidón y menor proporción de plastificante, lo que favorece una red más compacta y un mayor número de interacciones intermoleculares, especialmente enlaces de hidrógeno, incrementando la resistencia térmica del sistema (Zhiguang et al., 2022).



Figura 3. Termogramas DSC de las biopelículas correspondientes a los tratamientos a) T3 y b) T7



a

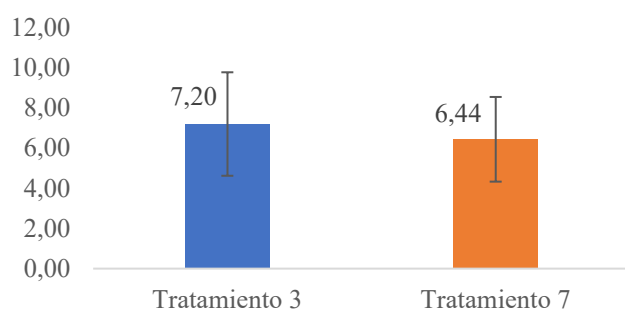


b

Los valores de entalpía obtenidos son inferiores a los reportados para películas con matrices predominantemente proteicas o reforzadas con biopolímeros de alta cristalinidad, las cuales suelen presentar mayor estabilidad térmica debido a interacciones más fuertes entre cadenas (Sabeti et al., 2016;

Muñoz et al., 2022). Estudios recientes han señalado que las biopelículas a base de almidón plastificado presentan entalpías relativamente bajas, asociadas a una menor organización cristalina y a la acción del plastificante, que reduce la energía necesaria para la transición térmica (Abdullah et al., 2022; López et al., 2023). En este contexto, los valores observados para T3 y T7 indican una estabilidad térmica moderada, adecuada para aplicaciones a temperaturas inferiores a 180–200 °C, evitando procesos térmicos severos que puedan inducir degradación del material o pérdida de sus propiedades funcionales (Pulgarín et al., 2022).

Figura 4. Entalpía de gelatinización de los mejores tratamientos

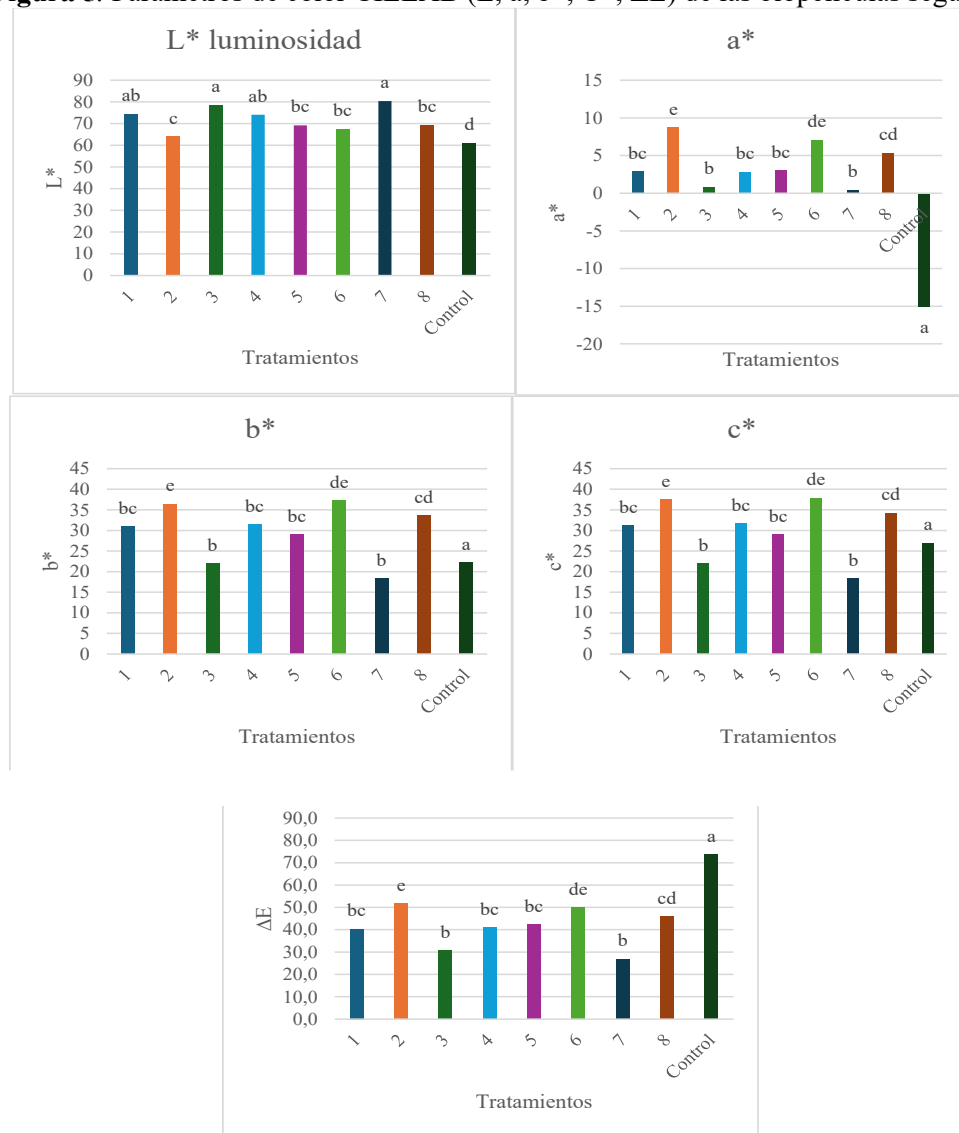


Propiedades ópticas

Colorimetría

La luminosidad (L^*) de las biopelículas varió de 61,77 (LDPE) a 80,37 (T7), siendo más claras con mayor almidón y menor cáscara de chocho, ver Figura 5. Los valores de a^* fueron cercanos a cero con tendencia a verde y b^* predominó el amarillo, aumentando con más cáscara. El croma (C^*) y ΔE confirmaron diferencias perceptibles frente al control. Estos resultados concuerdan con de Figueiredo (2025) y Orsuwan et al. (2017), indicando que la combinación de almidón de yuca y cáscara genera películas más claras y saturadas en amarillo.

Figura 5. Parámetros de color CIELAB (L, a, b*, C*, ΔE) de las biopelículas según tratamiento



Absorbancia, transparencia e integridad

Las biopelículas presentaron transparencia entre 0,51 y 6,16 %T, mientras que el control PEBD alcanzó 80,45 %T, en la Figura 5. La opacidad dependió de la composición y del glicerol, coincidiendo con Moreno et al. (2024). En cuanto a las propiedades mecánicas, el tratamiento T4 mostró mayor resistencia con 6,02 N y menor flexibilidad de 0,26 mm, mientras que T3, T5 y el control fueron más flexibles con aproximadamente 4 mm pero menos rígidos, de acuerdo con Andrade-Mahecha (2012). La evaluación de integridad y permeabilidad reveló valores de permeabilidad al agua entre $6,27 \times 10^{-9}$ y $1,77 \times 10^{-6}$ g·mm/cm²·h·Pa y al aceite entre $1,18 \times 10^{-9}$ y $7,26 \times 10^{-7}$ g·mm/cm²·h·Pa. Los tratamientos con mayor

permeabilidad al agua perdieron integridad, mientras que la mayoría conservó su estructura frente al aceite, según ASTM D1653-93 (2021) y RTE INEN 100 (2014).






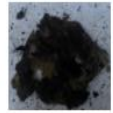

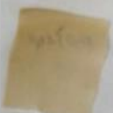





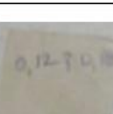










Tabla 5. Análisis de transparencia, textura e integridad en las biopelículas





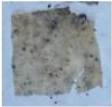

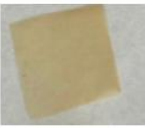










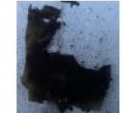
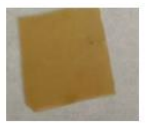











Tratamiento	Transparencia (%)	Textura		Integridad	
		Pico de carga (N)	de Deformación (mm)	Permeabilidad agua (g·mm/cm ² ·h·Pa) ×10 ⁻⁶	Permeabilidad Aceite (g·mm/cm ² ·h·Pa) ×10 ⁻⁷
T1	0,07 ± 0,06 ^{ab}	1,74 ± 0,22 ^{ab}	2,78 ± 0,41 ^{ab}	(1.77065 ± 0.03520) ^h	(1.58379 ± 0.02006) ^g
T2	0,01 ± 0,00 ^a	1,51 ± 0,18 ^{ab}	1,28 ± 0,28 ^{ab}	(1.47071 ± 0.03443) ^g	(7.25965 ± 0.04263) ^h
T3	6,30 ± 4,83 ^e	0,49 ± 0,05 ^a	3,94 ± 0,06 ^b	(1.18777 ± 0.03027) ^e	(0.26258 ± 0.04184) ^b
T4	0,70 ± 0,34 ^{cd}	6,02 ± 3,60 ^c	0,26 ± 0,14 ^a	(1.27036 ± 0.02044) ^d	(0.65449 ± 0.03912) ^c
T5	1,13 ± 1,29 ^{de}	0,39 ± 0,06 ^a	3,24 ± 0,70 ^{ab}	(1.01008 ± 0.02160) ^b	(0.73500 ± 0.03408) ^d
T6	0,50 ± 0,06 ^{cd}	0,82 ± 0,07 ^a	1,26 ± 0,04 ^{ab}	(1.11009 ± 0.02274) ^c	(0.758579 ± 0.02138) ^e
T7	0,61 ± 0,16 ^{cd}	1,86 ± 0,09 ^{ab}	3,90 ± 0,00 ^b	(1.60356 ± 0.02267) ^f	(0.535421 ± 0.03906) ^a
T8	0,16 ± 0,14 ^{bc}	1,18 ± 0,64 ^{ab}	2,51 ± 0,91 ^{ab}	(1.07415 ± 0.01575) ^a	(2.21979 ± 0.03876) ^f
Control	82,57 ± 3,00 ^f	2,68 ± 0,38 ^b	3,99 ± 0,02 ^b	(0.00627 ± 0.01565) ^a	(0.01182 ± 0.02077) ^a

Determinación de la biodegradabilidad de las biopelículas

Las biopelículas elaboradas a partir de cáscara de chocho y almidón de yuca mostraron una degradación progresiva en suelo orgánico, con una pérdida de masa más acelerada en condiciones de mayor humedad y actividad microbiana. Durante las etapas iniciales, las películas conservaron su integridad estructural debido a la resistencia de la matriz biopolimérica; sin embargo, con el tiempo se evidenció un deterioro gradual, en concordancia con lo reportado por Silva et al. (2020). Estos resultados confirman su potencial como materiales biodegradables, adecuados para su disposición en entornos naturales y coherentes con enfoques de sostenibilidad ambiental.

Tabla 6. Biodegradabilidad de películas expuestas al aire, agua y tierra en un rango de 28 días

Tratamiento	Aire		Agua		Tierra	
	Día 1	Día 28	Día 1	Día 28	Día 1	Día 28
1						
2						
3						
4						

5						
6						
7						
8						
Control						

CONCLUSIONES

El estudio confirmó la viabilidad técnica de producir biopelículas biodegradables a partir de harina de cáscara de chocho (*Lupinus mutabilis*) y almidón de yuca (*Manihot esculenta*) mediante *casting*, valorizando subproductos agroindustriales de origen local. La formulación influyó significativamente en la estructura y desempeño del material, evidenciándose que mayores proporciones de almidón y menores contenidos de glicerol favorecieron la formación de redes poliméricas más compactas, con mayor viscosidad y menor permeabilidad al vapor de agua.

Entre las formulaciones evaluadas, T3 presentó el mejor equilibrio entre propiedades fisicoquímicas, reológicas y mecánicas, mostrando una mayor eficiencia como barrera frente al vapor y al aceite, aunque manteniendo el carácter hidrofílico inherente a las matrices basadas en almidón, lo que explica su desempeño inferior al polietileno de baja densidad. Las biopelículas exhibieron propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones de baja exigencia estructural, así como mayor estabilidad en medios grasos que en acuosos, delimitando su campo de uso potencial.

Finalmente, la rápida biodegradación en suelo orgánico confirma el carácter ambientalmente favorable de estos materiales. En conjunto, los resultados posicionan a las biopelículas desarrolladas, particularmente la formulación T3, como una alternativa biodegradable viable para aplicaciones de

contacto indirecto con alimentos, como separadores entre láminas de queso mozzarella, contribuyendo a enfoques de economía circular y abriendo oportunidades para optimizar sus propiedades de barrera en estudios futuros.

Conflictos de intereses: los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Agradecimientos: Los autores agradecen sinceramente a la Dirección de Investigación y Desarrollo y a la Universidad Técnica de Ambato por el valioso apoyo institucional y los recursos proporcionados para la ejecución del presente trabajo. Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Composites Poliméricos Sostenibles a partir de Residuos Agroindustriales y de Cuero Wet-Blue para Aplicaciones Ecológicas”, aprobado mediante la resolución UTA-CONIN-2025-0064-R

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, J., Cai, J., Hafeez, M. A., Wang, Q., Farooq, S., Huang, Q., Tian, W., & Xiao, J. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1000116. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>
- Admase, A., Gesese, T., Fenta, S., & Eshete, B. (2025). Synthesis and characterization of bio-based eco-friendly biofilm composites reinforced with waste eggshell powder. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00398-4>
- Aguiar, S., Estrella, M., & Uvidia, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA - Revista Científica de Investigación, Docencia y Proyección Social*, (27), 05-10. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>
- Ali, A., Ali, S., Yu, L., Liu, H., Khalid, S., Hussain, A., ... & Ying, C. (2019). Preparation and characterization of starch-based composite films reinforced by apricot and walnut shells. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(38), 47978. <https://doi.org/10.1002/app.47978>
- Ambrósio, J., Lucas, A., Otaguro, H., & Costa, L. (2011). Preparation and characterization of poly (vinyl butyral)-leather fiber composites. *Polymer Composites*, 32, 776-785. <https://doi.org/10.1002/pc.21099>
- Aribia, W., Trigui, A., AlShammari, N., & Abdelmoleh, M. (2024). Development of phase change eco-composite materials from eggshell waste. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2380060>



- ASTM International. (2021). ASTM D1653-13(2021): Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Organic Coating Films. <https://www.astm.org/d1653-13r21.html>
- Brookfield Engineering. (2021). Viscometers - Overview of Viscometers Offered by AMETEK Brookfield. <https://www.brookfieldengineering.com/products/viscometers>
- Canhada, J., Paiva, F., Shinohara, G., Okimoto, F., Hiranobe, C., Teixeira, S., Job, A., & Santos, R. (2023). Production of new concrete with leather tannery waste used as partial replacement of the natural sand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25, 944-953. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01586-4>
- Chamorro, A. F., Palencia, M., & Lerma, T. A. (2025). Physicochemical Characterization and Properties of Cassava Starch: A Review. *Polymers*, 17(12), 1663. <https://doi.org/10.3390/polym17121663>
- de Carvalho, G. R., Marques, G. S., de Matos Jorge, L. M., & Jorge, R. M. M. (2021). Effect of the addition of cassava fibers on the properties of cassava starch composite films. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 38(2), 341-349. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00093-7>
- Dei Sommi, A., Lionetto, F., & Maffezzoli, A. (2023). An overview of the measurement of permeability of composite reinforcements. *Polymers*, 15(3), 728. <https://doi.org/10.3390/polym15030728>
- Gbadeyan, O., Adali, S., Bright, G., Sithole, B., & Awogbemi, O. (2020). Studies on the mechanical and absorption properties of achatina fulica snail and eggshells reinforced composite materials. *Composite Structures*, 239, 112043. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112043>
- Ichina, J. (2021). Obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de fréjol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) para envoltura de alimentos. ESPOCH. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16748>
- Ji, M., Li, F., Li, J., Li, J., Zhang, C., Sun, K., & Guo, Z. (2021). Enhanced mechanical properties, water resistance, thermal stability, and biodegradation of the starch-sisal fibre composites with various fillers. *Materials & Design*, 198, 109373. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520309096>
- López, A., Mejía, N., Zavala, A., & Flores, M. R. (2023). Biopolímeros a partir de almidón de yuca (*Manihot esculenta*): una revisión. *RECIENA*, 3(1), 66-72. <https://doi.org/10.47187/h4n9xr52>



Li, T., Li, R., Luo, H., Peng, L., Wang, J., Li, S., ... & Wu, H. (2024). Eggshell powder as a bio-filler for starch and gelatin: Ternary biodegradable composite films manufactured by extrusion compression molding. *Food Hydrocolloids*, 150, 109632.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X23011785>

Mettler Toledo. (2023). Guía práctica para la determinación de la humedad.

https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/moisture-analyzers/moisture-analyzer/ir-moisture-balance.html

Mettler Toledo. (2024). Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Mettler Toledo International Inc.

https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/DSC.html

Moreno, G., Galarza, I., & Sailema, M. (2024). Desarrollo de biopelículas degradables a partir de harina de fruta de pan (*Artocarpus altilis*), como alternativa al uso de plásticos sintéticos convencionales. *Tierra Infinita*, 10, 153-173. <https://doi.org/10.32645/26028131.1312>

de Figueiredo, C. F. V., Mata, M. E. R. M. C., Junior, E. B., Leite Filho, M. T., de Souza, E. M., de Oliveira, S. R., ... & Ribeiro, N. L. (2025). Development and characterization of biodegradable films based on banana starch. *Food Science and Technology*, 45. Muñoz, R., Salaris, M., López, P., & Peponi, L. (2022). Influencia del glicerol en la estructura cristalina y propiedades mecánicas de biopelículas a base de almidón. *Journal of Polymers and Materials Science*, 29(1), 77-86. <https://www.fstjournal.com.br/revista/article/view/565>

INEN (2014). Materiales y artículos plásticos destinados a estar en contacto con los alimentos.

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-100.pdf>

Moses, A., Sumathi, M., & Bright, R. (2017). Preparation and characterization of leather waste polymer composites. <https://doi.org/10.23883/ijrter.2017.3285.nxgre>

Nanni, A., Parisi, M., Colonna, M., & Messori, M. (2021). Thermo-Mechanical and Morphological Properties of Polymer Composites Reinforced by Natural Fibers Derived from Wet Blue Leather Wastes: A Comparative Study. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13111837>

Nazir, M., Mascolo, R., Bouic, P., Hassan, M., Harris, J., Naderizadeh, S., Busfield, J., Zhang, H., Papageorgiou, D., & Bilotti, E. (2024). Upcycling leather waste: The effect of leather type and



- aspect ratio on the performance of thermoplastic polyurethane composites. Sustainable Materials and Technologies. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01221>
- Orsuwan, A., & Sothornvit, R. (2017). Development and characterization of banana flour film incorporated with montmorillonite and banana starch nanoparticles. Carbohydrate polymers, 174, 235-242.
- Andrade-Mahecha, M. M., Moraes, I. C. F., & Helbig, E. (2012). Obtención y caracterización de películas a partir de almidón de achira (*Canna indica* L.). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 65(1), 6439-6450.
- <https://doi.org/10.15446/rfnam.v65n1.37968>
- Perkin Instruments. (2011). Rapid Visco Analyser (RVA) - TecMaster. Perten Instruments.
- https://www.perten.com/Global/Brochures/RVA/RVA-Techmaster%20Spanish_20110901.pdf
- Perera, Y., Naaib, M., Ariyasinghe, N., & Abeykoon, C. (2025). Investigation of the effect of extrusion process parameters and filler loading on the performance of LDPE composites reinforced with eggshell powder. Composites Part C: Open Access.
- <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100561>
- Prashanth, B. M., Gouda, P. S., Manjunatha, T. S., Navaneeth, I. M., & Chethan, K. M. (2023). Effect of glycerin on mechanical properties of a hybrid kenaf-jute polyester composite. Engineering Research Express, 5(2), 025034.
- <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/acd2a7/meta>
- Pulgarín, H. L. C., Caicedo, C., & López, E. F. (2022). Effect of surfactant content on rheological, thermal, morphological and surface properties of thermoplastic starch (TPS) and polylactic acid (PLA) blends. Heliyon, 8(10). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(22\)02121-1](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)02121-1)
- Raksaksri, L., & Phunpeng, V. (2022). Leather-like composite materials prepared from natural rubber and two leather wastes: Wet blue leather and finished leather. Journal of Elastomers & Plastics, 54, 1254 - 1276. <https://doi.org/10.1177/00952443221130472>
- Siddhamsittiwat, A., Ansari, G. A., More, N., Vyavahare, S., & More, A. (2025). Development of eggshell & walnut shell powder reinforced starch composites. Polymer Bulletin, 1-18.
- <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05810-7>



- Skórczewska, K., Lewandowski, K., Szewczykowski, P., Wilczewski, S., Szulc, J., Stopa, P., & Nowakowska, P. (2022). Waste Eggshells as a Natural Filler for the Poly(Vinyl Chloride) Composites. *Polymers*, 14. <https://doi.org/10.3390/polym14204372>
- Shin, L., Dassan, E., Abidin, M., & Anjang, A. (2020). Tensile and Compressive Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer Hybrid Composite with Eggshell Powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 5783-5791. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04561-z>
- Shukla, R., Yadav, M., Madruga, L., Jayaraj, J., Popat, K., Wang, Z., Xi, L., & Prashanth, K. (2024). A novel Ti-eggshell-based composite fabricated by combined additive manufacturing-powder metallurgical routes as bioimplants. *Ceramics International*.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.073>
- Sunardi, S., Ariawan, D., Surojo, E., Prabowo, A., Akbar, H., Cao, B., & Carvalho, H. (2023). Assessment of eggshell-based material as a green-composite filler: Project milestones and future potential as an engineering material. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32.
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0269>
- Urgilés, R. (2021). Obtención de un biopolímero a partir de melloco (*Ullucus tuberosus*) para el uso como embalaje para alimentos. ESPOCH.
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16926>
- Vandeginste, V. (2021). Food waste eggshell valorization through development of new composites: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 29.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00317>
- Zhiguang, C., Junrong, H., Huayin, P., & Keipper, W. (2022). The effects of temperature on starch molecular conformation and hydrogen bonding. *Starch-Stärke*, 74(7-8), 2100288.
<https://doi.org/10.1002/star.202100288>

