

Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

Development of biodegradable films based on a ternary system of cassava starch–polyvinyl alcohol–sodium bentonite for applications in the preservation of tropical fruits

Emilio Pérez Pacheco ¹
Alejandro Ortiz Fernández ²

RESUMEN

La creciente demanda de materiales sostenibles ha impulsado el desarrollo de películas biodegradables para aplicaciones en empaques alimentarios. En este estudio se elaboraron películas termoplásticas mediante el método de colada, utilizando Almidón de Yuca (*Manihot esculenta*), Alcohol Polivinílico (APV) y Bentonita sódica en formulaciones mono y ternarias. Se evaluaron propiedades físicas clave como espesor, opacidad y permeabilidad al vapor de agua (WVP), siguiendo protocolos estandarizados. Los resultados mostraron que las películas ternarias presentaron espesores mayores (125–128 μm) en comparación con las monocomponentes (96–110 μm), lo que refleja una red polimérica más densa y estable. En cuanto a opacidad, las formulaciones con mayor proporción de PVA (F4 y F5) fueron las más transparentes ($L^* = 74.82\text{--}75.55$), lo que refleja la capacidad de este polímero para formar películas claras y homogéneas. Por el contrario, las películas con predominio de almidón (F1 y F3) mostraron los valores más bajos de luminosidad ($L^* = 68.49\text{--}69.23$), asociados a la retrogradación del almidón y a la formación de dominios semicristalinos que incrementan la dispersión de la luz. La WVP se redujo significativamente en las formulaciones ternarias (F4 = 13.25 g y F5 = 14.32 g), en contraste con las películas de almidón y PVA puro (22.29–23.99 g). Este comportamiento se atribuye al efecto sinérgico del APV, que aporta cohesión y homogeneidad, y de la bentonita sódica, que incrementa la tortuosidad en el paso de vapor. En conclusión, las películas ternarias de almidón de yuca–PVA–bentonita exhibieron un equilibrio favorable entre transparencia y propiedades de barrera, consolidándose como candidatas prometedoras para la conservación sostenible de frutas tropicales.

PALABRAS CLAVES: Películas biodegradables, permeabilidad al vapor de agua, propiedades de barrera.

¹ Profesor-Investigador. Programa Educativo de Ingeniería en Materiales. Tecnológico Nacional de México. Campus ITS_Calkiní (ITESCAM). Cuerpo Académico Bioprocesos, eperez@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

² Profesor-Investigador. Programa Educativo de Ingeniería en Materiales. Tecnológico Nacional de México. Campus ITS_Calkiní (ITESCAM). Cuerpo Académico Bioprocesos. Autor para correspondencia: aeortiz@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9689-2124>

Fecha de recepción: 01 de septiembre, 2025.

Fecha de aceptación: 12 de septiembre, 2025.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials has driven the development of biodegradable films for food packaging applications. In this study, thermoplastic films were prepared by the casting method using cassava starch (*Manihot esculenta*), polyvinyl alcohol (PVA), and sodium bentonite in mono- and ternary formulations. Key physical properties such as thickness, opacity, and water vapor permeability (WVP) were evaluated following standardized protocols. The results showed that the ternary films exhibited higher thickness values (125–128 μm) compared to the monocomponent ones (96–110 μm), reflecting the formation of a denser and more stable polymeric network. Regarding opacity, the formulations with a higher proportion of PVA (F4 and F5) were the most transparent ($L^* = 74.82\text{--}75.55$), highlighting the ability of this polymer to form clear and homogeneous films. In contrast, starch-dominant films (F1 and F3) showed the lowest luminosity values ($L^* = 68.49\text{--}69.23$), associated with starch retrogradation and the formation of semicrystalline domains that increase light scattering. WVP was significantly reduced in the ternary formulations ($F4 = 13.25\text{ g}$ and $F5 = 14.32\text{ g}$), in contrast to the starch and pure PVA films (22.29–23.99 g). This behavior is attributed to the synergistic effect of PVA, which provides cohesion and homogeneity, and sodium bentonite, which increases tortuosity in the vapor diffusion path. In conclusion, cassava starch–PVA–sodium bentonite ternary films exhibited a favorable balance between transparency and barrier properties, establishing themselves as promising candidates for the sustainable preservation of tropical fruits.

KEYWORDS: Biodegradable films, water vapor permeability, barrier properties.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación ambiental por el uso excesivo de plásticos derivados del petróleo ha impulsado el desarrollo de materiales biodegradables que puedan sustituirlos en aplicaciones de envasado de alimentos. Entre estos materiales, los almidones naturales destacan por su abundancia, bajo costo y capacidad para formar películas delgadas y continuas [1]. Sin embargo, las películas obtenidas únicamente a partir de almidón suelen presentar limitaciones significativas, como elevada fragilidad mecánica, alta permeabilidad al vapor de agua y tendencia a retrogradar, lo que restringe su aplicación directa en empaques comerciales [2].

En este contexto, la combinación de almidón con polímeros sintéticos biodegradables, como el alcohol polivinílico (APV), ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar sus propiedades físicas y de barrera [3]. El APV, gracias a su naturaleza hidrofílica y capacidad de formar películas transparentes y homogéneas, incrementa la flexibilidad y cohesión de las matrices amiláceas, reduciendo su fragilidad y mejorando la resistencia [4]. Asimismo, la incorporación de nanorrellenos laminares como la bentonita sódica favorece la creación de trayectorias tortuosas para la difusión de vapor de agua, reduciendo significativamente la permeabilidad y mejorando la estabilidad dimensional [5].

Un aspecto relevante en este campo es el estudio de almidones no convencionales [6], como el almidón de yuca (*Manihot esculenta*), que presentan características fisicoquímicas particulares frente

Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

a los almidones de uso común (maíz, trigo, papa). El almidón de yuca (AY) posee alta pureza, bajo contenido de proteínas y lípidos [7], además de una estructura granular que facilita la gelatinización y formación de películas con buenas propiedades mecánicas. Su aprovechamiento no solo permite diversificar la base de materias primas para biopolímeros, sino también generar valor agregado a cultivos locales de regiones tropicales, promoviendo un enfoque de bioeconomía circular.

De esta manera, el desarrollo de sistemas ternarios basados en AY–APV–bentonita representa una alternativa prometedora para la obtención de películas biodegradables con propiedades ajustables de espesor, opacidad y barrera al vapor de agua, con potencial aplicación en el envasado sostenible de frutas tropicales.

JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación por la sostenibilidad y la reducción del uso de plásticos derivados del petróleo ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos y biodegradables, siendo las películas a base de almidón una de las opciones más prometedoras. Tradicionalmente, se han empleado almidones de origen convencional como el de maíz o papa; sin embargo, el estudio de almidones no convencionales, como el de yuca (*Manihot esculenta*), resulta de gran importancia debido a sus propiedades fisicoquímicas particulares y su amplia disponibilidad en regiones tropicales. El almidón de yuca presenta una alta pureza, bajo contenido de lípidos y proteínas, además de una elevada proporción de amilosa y amilopectina que favorecen la formación de películas continuas y con buen desempeño mecánico.

La exploración de este recurso subutilizado no solo diversifica las fuentes de materia prima para la obtención de biopolímeros, sino que también impulsa el aprovechamiento de cultivos locales, generando valor agregado a la cadena agrícola y fomentando el desarrollo regional. En este contexto, la combinación del almidón de yuca con polímeros sintéticos biodegradables como el alcohol polivinílico (APV) y refuerzos laminares como la bentonita sódica permite superar las limitaciones asociadas a la fragilidad y elevada permeabilidad de las películas amiláceas puras, dando lugar a sistemas híbridos con mejores propiedades de barrera, espesor y transparencia.

El estudio de este tipo de formulaciones ternarias no solo contribuye al avance del conocimiento científico sobre materiales compuestos biodegradables, sino que también abre la posibilidad de aplicaciones tecnológicas concretas en el área de empaques alimentarios sostenibles, especialmente en la conservación de frutas tropicales. Con ello, se atienden simultáneamente las demandas de la industria alimentaria y los retos medioambientales globales asociados al uso de plásticos convencionales.

METODOLOGÍA

Materias primas y reactivos

Se utilizó almidón de yuca (*Manihot esculenta*) obtenido de una empresa local; Alcohol Polivinílico (PVA) de grado comercial; glicerol como plastificante (grado alimenticio) y bentonita sódica en polvo. Todos los materiales fueron utilizados sin modificación adicional.

Preparación de películas biodegradables

Las películas se elaboraron mediante el método de colada. Se disolvió Almidón de Yuca (AY) en 100 mL de agua destilada bajo agitación magnética durante 15 minutos. Se incorporó glicerol (3 mL) por goteo, seguido de calentamiento en baño maría a 90 °C durante 20 minutos para inducir la gelatinización. El APV se disolvió previamente en 100 ml de agua destilada a 85 °C hasta su



Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

disolución y posteriormente, se le incorporó la bentonita sódica y se dispersó aplicando ultrasonido durante 15 min. Luego, dicha disolución se mezcló con la del almidón. La mezcla final se vertió en bandejas niveladas (figura 1) y se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas (figura 2).



Figura 1. Colada para la formación de películas.



Figura 2. Película obtenida de Almidón de Yuca.

Formulaciones experimentales

Se prepararon cinco formulaciones:

- **F1:** Almidón de Yuca (100%).
- **F2:** APV (100%).
- **F3:** Almidón de Yuca + Bentonita (9.9:0.1).
- **F4:** Almidón de Yuca + APV + Bentonita Na⁺ (1:8.9:0.1).
- **F5:** Almidón de Yuca + APV + Bentonita Na⁺ (3:6.9:0.1).

Evaluación de propiedades físicas

- **Espesor:** Se midió en tres puntos por película con micrómetro digital (± 0.01 mm).
- **Opacidad:** Se determinó con un espectrofotómetro (colorímetro) portátil serie DS-200.
- **Permeabilidad al Vapor de Agua (WVP, por sus siglas en inglés):** La WVP se evaluó según ASTM E96-96, simplificada por Mc-Hugh y colaboradores en 1993, en la cual indirectamente se obtiene la permeabilidad cuantificando el índice de movimiento de vapor de agua a través de la película mediante los cambios de peso debido a la transferencia de humedad, durante 15 días dentro de un desecador a 25 °C (**figura 3**).



Figura 3. Preparación de las películas para la prueba de permeabilidad.

Análisis estadístico

Se aplicó un diseño factorial completamente aleatorizado para evaluar el efecto combinado de la formulación (concentración de almidón, APV y bentonita sódica) sobre el tiempo de exposición de las películas. Las mediciones de transferencia al vapor de agua se realizaron cada 24 horas durante un periodo de 15 días, permitiendo establecer perfiles de comportamiento para cada formulación. Para comparar diferencias significativas entre pares de formulaciones en momentos específicos, se utilizó la prueba t de Student ($p < 0.05$), enfocada en contrastes directos entre grupos con interés técnico. El análisis se realizó con el software OriginPro 2023, y los resultados se expresaron como medias \pm desviación estándar. Este enfoque permitió identificar interacciones relevantes entre los factores experimentales y validar estadísticamente el desempeño diferencial de las películas en función de su composición, aportando evidencia cuantitativa para la selección de formulaciones con propiedades de barrera.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Espesor de las películas

El análisis de varianza con respecto al espesor de las películas (figura 4) mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las formulaciones. La prueba t indicó que las formulaciones F4 y F5 no difirieron entre sí ($p > 0.05$), por lo que el factor determinante fue la presencia del sistema ternario más que la proporción exacta de AY y APV.

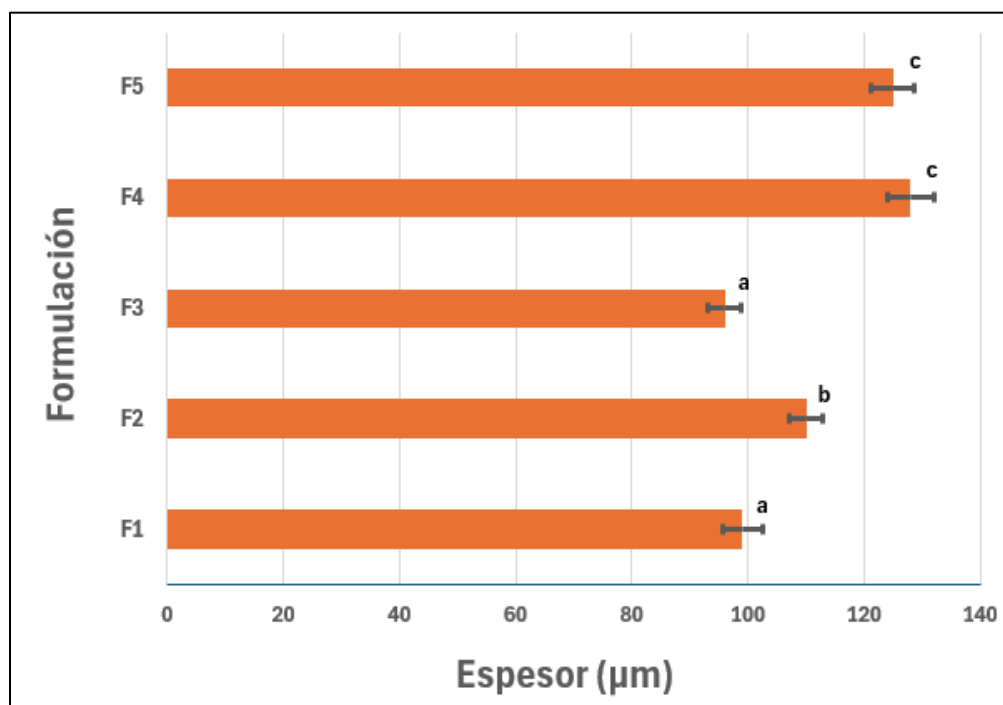


Figura 4. Espesor promedio de las películas.

Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

Los resultados de espesor de las películas oscilaron entre 96 y 128 μm , lo que se alinea con lo reportado en la literatura para biopelículas elaboradas con mezclas de almidón y APV, donde los espesores típicamente varían de 80 a 150 μm dependiendo de la concentración de sólidos y las condiciones de secado [8]. El tipo de plastificante y su concentración tienen influencia en el espesor de la película, densidad, contenido de humedad, solubilidad, la capacidad de hinchamiento y la absorción de agua [9]. Las películas de almidón puro (F1) y almidón con bentonita (F3) presentaron espesores menores (99 y 96 μm , respectivamente), lo cual puede atribuirse a la contracción asociada a la gelatinización y retrogradación del almidón durante el secado, un fenómeno ampliamente descrito en biopolímeros amiláceos [10]. En F3, la bentonita no evitó la reducción de espesor, probablemente debido a una dispersión insuficiente en ausencia de APV; de hecho, estudios previos muestran que la incorporación de arcillas en matrices puras de almidón puede generar heterogeneidades sin reforzar significativamente la estructura [11].

En contraste, las formulaciones ternarias con APV y bentonita (F4 y F5) exhibieron espesores mayores (128 y 125 μm). Este incremento concuerda con lo reportado en la literatura [12], ya que el APV, por su capacidad de formar películas densas y homogéneas, disminuye la contracción al secado y aumenta el espesor final. Además, la presencia de bentonita contribuye a restringir la movilidad de las cadenas poliméricas, reforzando la red y reduciendo la pérdida de volumen [13]. Finalmente, el APV puro (F2) mostró un espesor intermedio (110 μm), consistente con su naturaleza filmógena, aunque sin el efecto sinérgico de la arcilla.

En conjunto, los resultados confirman que la interacción APV–bentonita en una matriz de almidón no solo mejora la estabilidad mecánica y de barrera, sino que también contribuye a generar películas más uniformes y gruesas, aspecto clave para su desempeño en aplicaciones de recubrimiento biodegradable.

Opacidad

En cuanto a la opacidad (figura 5), las formulaciones mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en F4 ($L^* = 75.55$) y F5 ($L^* = 74.82$), con respecto a las demás formulaciones. Esto indica que la transparencia se maximizó en el sistema rico en PVA y bentonita dispersa. No se observaron diferencias significativas entre F1, F2 y F3 ($p > 0.05$), lo cual sugiere que la dominancia del almidón o PVA determina la opacidad más que la interacción con la bentonita.

Los valores de luminosidad (L^*) mostraron diferencias claras según la formulación. En particular, la formulación F4 (75.55 ± 3.32) y F5 (74.82 ± 3.80) los cuales alcanzaron los mayores valores de L^* , lo que indica una mayor transparencia y menor dispersión lumínica. Este comportamiento puede explicarse por la predominancia del APV, polímero reconocido por su capacidad de formar películas homogéneas y claras [14].

La incorporación de bentonita, en este caso, no generó turbidez significativa debido a su baja concentración y a la adecuada dispersión lograda por ultrasonido, lo que concuerda con estudios de [15], donde se observó que la adición controlada de arcillas puede incluso mejorar la uniformidad óptica.

Las películas con mayor contenido de almidón, en contraste, presentaron menor luminosidad: F1 (68.49 ± 4.15) y F3 (69.23 ± 3.60). Esto refleja una mayor opacidad, atribuida a la tendencia del almidón a retrogradar durante el secado, generando dominios semicristalinos que dispersan la luz. En F3, la presencia de bentonita no compensó este efecto, ya que en ausencia de PVA su dispersión en la matriz de almidón fue probablemente heterogénea, lo que incluso puede haber aumentado la turbidez.

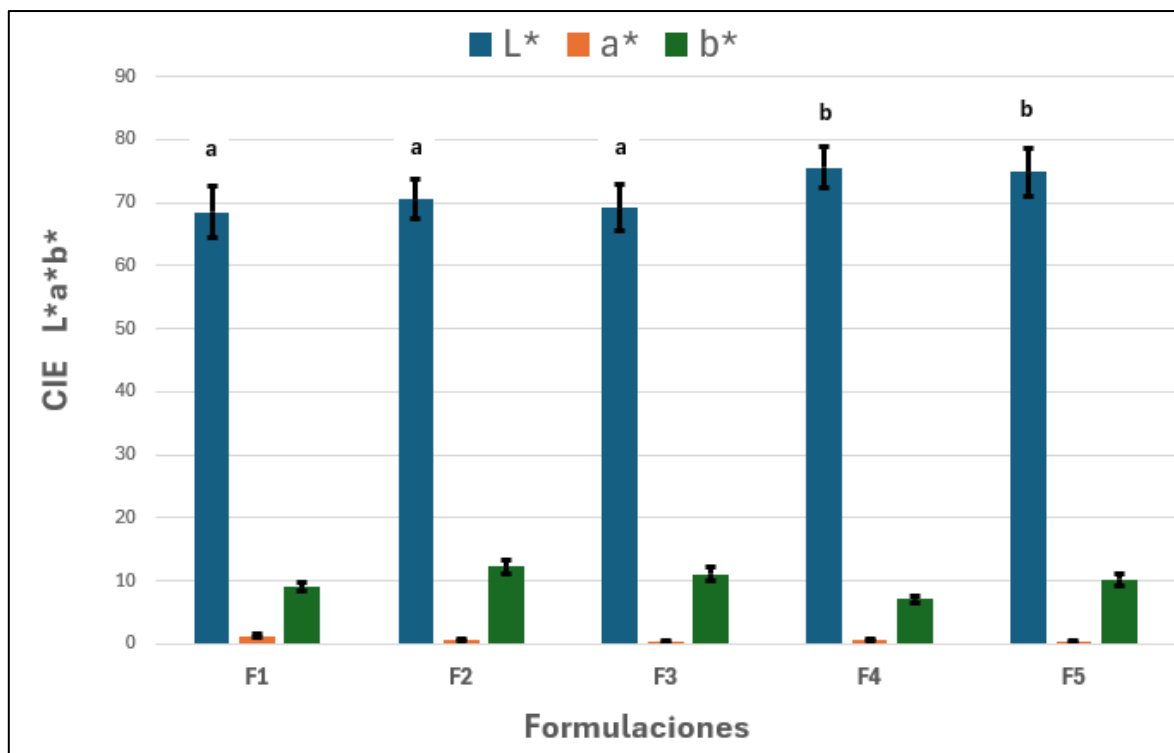


Figura 5. Opacidad de las películas.

Por otro lado, la formulación F2 (70.57 ± 3.23) se ubicó en un rango intermedio, confirmando que el APV genera transparencia, aunque en este caso el mayor valor de b^* (12.28) indica un ligero tono amarillento característico del polímero comercial. En contraste, la película F4, además de la mayor luminosidad, presentó el valor de b^* más bajo (7.10 ± 0.5), lo que sugiere que la combinación de APV con AY y bentonita no solo aumentó la claridad óptica, sino que también redujo la tendencia a tonalidades indeseadas.

Finalmente, desde el punto de vista estadístico, la diferencia en luminosidad entre F4/F5 y F1/F2/F3 fue significativa ($p < 0.05$), confirmando que la proporción de APV en la formulación es el factor más determinante en la transparencia de las películas, mientras que la presencia de almidón incrementa la opacidad. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado en la literatura, que la estructura semicristalina inducida por el almidón afecta directamente la transmisión de luz [16].

Permeabilidad al vapor de agua (WVP)

Los resultados en la WVP (figura 6) mostraron diferencias significativas entre las formulaciones. Las películas de AY puro (F1 = 22.29 g) y APV puro (F2 = 23.99 g) presentaron las mayores pérdidas de masa, indicando alta permeabilidad. Este comportamiento concuerda con lo descrito en la literatura: tanto el almidón como el APV son materiales hidrofílicos con abundantes grupos hidroxilo capaces de absorber agua y facilitar su difusión [17]. En el caso del almidón, además, la retrogradación puede inducir microgrietas que actúan como vías preferenciales de transporte [18].

Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

La adición de bentonita en una matriz de AY (F3 = 16.61 g) redujo moderadamente la permeabilidad, efecto que se atribuye a la naturaleza laminar de la arcilla, que al dispersarse en la matriz polimérica genera trayectorias más tortuosas para el paso de moléculas de vapor [19]. No obstante, la reducción fue limitada por la ausencia de APV, que habría permitido una mejor compatibilidad entre fases y una dispersión más uniforme de la bentonita.

Las formulaciones ternarias (F4 = 13.25 g y F5 = 14.32 g) exhibieron las menores pérdidas de masa, confirmando un efecto sinérgico entre el APV y la bentonita. El APV contribuyó a la cohesión y densificación de la red polimérica, mientras que la bentonita actuó como barrera física al incrementar la tortuosidad de la trayectoria difusiva. Resultados similares han sido reportados en la literatura [20], los cuales mencionan que existen reducciones significativas en la permeabilidad al incorporar montmorillonita en mezclas almidón–APV. Así, la formulación F4, con mayor proporción de APV, demostró ser la más eficiente como barrera, lo que la posiciona como la opción más prometedora para aplicaciones de empaque biodegradable donde la reducción de humedad es crítica.

En conjunto, los resultados indican que la mejora en las propiedades de barrera se debe no solo a la incorporación de un nanorefuerzo laminar, sino también a la proporción de APV, que favorece tanto la dispersión de la bentonita como la compactación de la red polimérica.

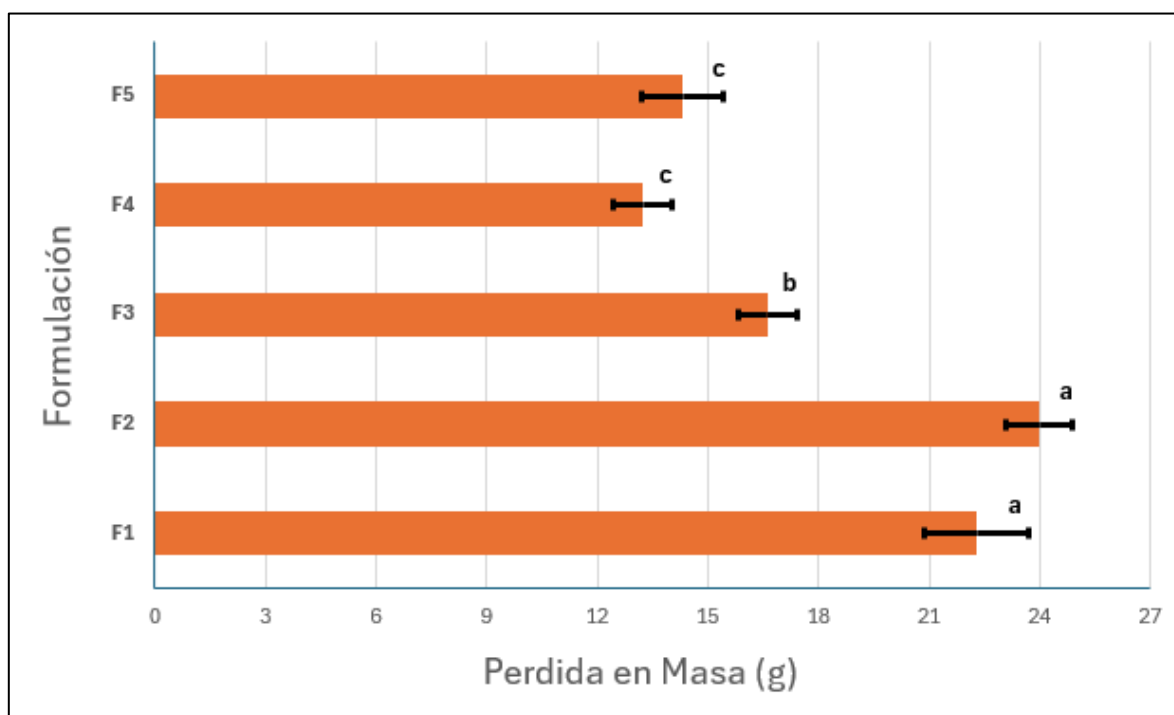


Figura 6. Permeabilidades de las películas.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El estudio demuestra que la composición polimérica ejerce un efecto directo y medible en las propiedades físicas, ópticas y de barrera de las películas biodegradables. La combinación de almidón de yuca (AY), alcohol polivinílico (APV) y bentonita sódica permitió obtener materiales con características superiores a las formulaciones individuales, mostrando un claro efecto sinérgico entre los componentes.

Desarrollo de películas biodegradables basadas en un sistema ternario almidón de yuca–alcohol polivinílico–bentonita sódica para aplicaciones en la conservación de frutas tropicales

En términos de transparencia y opacidad, las formulaciones ricas en APV (F4 y F5) destacaron por sus mayores valores de luminosidad ($L^* = 75.55$ y 74.82 , respectivamente), lo que las hace más adecuadas para aplicaciones donde la visibilidad del producto envasado resulta crítica. Por el contrario, las películas con predominio de almidón (F1 y F3) exhibieron menor luminosidad ($L^* = 68.49$ y 69.23), reflejando una mayor opacidad, útil en empaques que requieren protección frente a la luz. La película de APV puro (F2) se situó en un punto intermedio, confirmando la capacidad intrínseca de este polímero para generar matrices transparentes, aunque con tonalidades amarillentas.

Respecto a la permeabilidad al vapor de agua, la incorporación de bentonita fue determinante para reducir la difusión de humedad. La formulación F4, con predominio de APV, presentó la barrera más eficiente (13.25 g de pérdida de masa), validando que la sinergia PVA–bentonita no solo aumenta el espesor y la estabilidad de la película, sino que también optimiza la resistencia al transporte de vapor.

En conjunto, los resultados confirman que la optimización de películas biodegradables no depende de un único factor, sino de un balance entre composición, interacción molecular y microestructura. El sistema ternario AY–APV–bentonita abre una vía prometedora para el diseño de empaques sostenibles con propiedades ajustables de transparencia y barrera, adaptables a distintos productos y necesidades de conservación, en particular para la protección de frutas tropicales.

REFERENCIAS

- Trejo Cuevas, K., et al., Almidón, una plataforma versátil en la industria de alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 2024. 41(1): p. 59-66.
- Jimenez Rosas, M. and L. López Zamora, Obtención de biocompositos empleando almidón y nanoaditivos para mejorar su rendimiento térmico y mecánico. 2024, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Vera-Cuaces, A.F., W.L. Chávez-Moreira, and B.J. Carrillo-Anchundia, Obtención de polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca. *MQRInvestigar*, 2023. 7(1): p. 2680-2700.
- Valencia, A., C. Rivera, and E.A. Murillo, Estudio de las propiedades de mezclas de alcohol polivinílico–almidón de yuca–sorbitol obtenidas por casting. *Revista Colombiana de materiales*, 2013(4): p. 41-55.
- Anzorena, H.A., et al., Mejora de las características finales de películas biodegradables de almidón, mediante el uso de un diseño multifactorial. *Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, 2024. 4(2).
- Knowles, M.M., M.L. Pabón, and J.E. Carulla, Uso de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y otras fuentes de almidones no convencionales en la alimentación de rumiantes. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 2012. 25(3): p. 488-499.
- Martínez De La Cruz, S. and E. Jiménez Ramos, Obtención y caracterización física y química del almidón de yuca (*Manihot esculentum*) variedad Guayape. 2016.