

Producción de películas comestibles a base de harina de almendra de mango mediante la optimización de variables de proceso de extrusión termoplástica

Production of edible films based on mango kernel flour through optimization of thermoplastic extrusion process variables

Aguilar-Palazuelos, E.¹, Sánchez-Chilero, M.A.¹, Fitch-Vargas, P.R.², Limón-Valenzuela, V.¹, Calderón-Castro, A.¹, Ruiz-Armenta, X.A.¹, Gutiérrez-Dorado, R.¹, López-Díaz, A.¹, Galán-Rodríguez, L.³, Gómez-Favela, M.A.^{1*}

¹Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México. ²Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México. ³Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México

RESUMEN

La semilla de mango es un subproducto con alto contenido de almidón de limitado aprovechamiento en la industria de jugos y conservas, generando un incremento en residuos orgánicos que puede ser empleado en la elaboración de biopolímeros. El objetivo del trabajo fue determinar la combinación óptima de porcentaje de glicerol (%G) y velocidad de tornillo (VT) para obtener un material termoplástico adecuado en la elaboración de una película comestible (PC) con buenas propiedades mecánicas y de barrera. Como materia prima se utilizó harina de almendra de mango. Se empleó un diseño central compuesto rotatable con dos factores: %G=15–25 % y VT=120–220 rpm, con cinco niveles, obteniendo 13 tratamientos, para la obtención de material termoplástico. Las PC's se elaboraron mediante casting y se les evaluaron índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), permeabilidad al vapor de agua (PVA), fuerza de ruptura (FR) y permeabilidad al dióxido de carbono (PCO₂). La optimización se realizó mediante el método numérico de deseabilidad usando metodología de superficie de respuesta. El análisis de regresión y varianza mostró que la mejor combinación de proceso fue %G=19 % y VT=150 rpm. Con estos parámetros se predijeron valores de IAA: 4.17 g gel/g muestra, ISA: 17.99 %, PVA: 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR: 14.13 N y PCO₂: 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. La PC obtenida presenta potencial para su aplicación en frutos, lo cual contribuiría al mantenimiento de la calidad postcosecha y extensión de vida de anaquel.

Palabras clave: Almendra de mango, Optimización, Películas, PVA, PCO₂, Deseabilidad

ABSTRACT

Mango seed is a starch-rich by-product with limited utilization in the juice and canning industries, leading to increased organic waste generation; however, it can be exploited for the production of biopolymers. The objective of this study was to determine the optimal combination of glycerol concentration (%G) and screw speed (SS) to obtain a suitable thermoplastic material for the development of an edible film (EF) with favorable mechanical and barrier properties. Mango kernel flour was used as the raw material. A rotatable central composite design with two factors was applied: %G=15–25 % and SS=120–220 rpm, at five levels, resulting in 13 treatments for thermoplastic material production. The EF were produced by the casting method and evaluated for water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), water vapor permeability (WVP), breaking strength (BS), and carbon dioxide permeability (CO₂P). The optimization was carried out using the numerical desirability method employing response surface methodology. Regression and analysis of variance indicated that the optimal processing conditions were %G=19 % and SS=150 rpm. Under these conditions, the predicted values were: WAI: 4.17 g gel/g sample, WSI: 17.99 %, WVP: 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, BS: 14.13 N, and CO₂P: 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. The resulting edible film shows potential for application on fruits, contributing to the maintenance of postharvest quality and the extension of shelf life.

KEYWORDS: Mango kernel, Optimization, Films, WVP, CO₂P, Desirability

*Autor de correspondencia: Mario Armando Gómez Favela

Email: mario.gomez.fcqb@uas.edu.mx

ORCID ID: [0000-0002-5408-4129](https://orcid.org/0000-0002-5408-4129)

Registro ORCID Autores: LM: [0000-0003-3874-1448](https://orcid.org/0000-0003-3874-1448); RM: [0000-0002-0922-8082](https://orcid.org/0000-0002-0922-8082); CC: [0000-0001-6652-5705](https://orcid.org/0000-0001-6652-5705);

LD: [0009-0002-4135-6321](https://orcid.org/0009-0002-4135-6321); FM: [0000-0003-4097-4726](https://orcid.org/0000-0003-4097-4726); GD: [0000-0002-3192-1588](https://orcid.org/0000-0002-3192-1588); SC: [0000-0002-2192-2333](https://orcid.org/0000-0002-2192-2333);

AP: [0000-0002-3805-8422](https://orcid.org/0000-0002-3805-8422); GR: [0009-0000-1276-3070](https://orcid.org/0009-0000-1276-3070);

Revista online: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/index>

Enviado: Noviembre 2025

Aceptado: Enero 2026

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente demanda de alimentos que conserven en la mayor medida posible sus atributos sensoriales ha impulsado mejoras continuas en las tecnologías de procesamiento de alimentos, con el propósito de garantizar su conservación sin comprometer la calidad ni la vida útil. Esto ha favorecido una amplia investigación sobre películas y recubrimientos comestibles (Aguilar-Palazuelos *et al.*, 2025; Calderón-Castro *et al.*, 2024).

Una película comestible y biodegradable se define como una capa delgada de material comestible y biodegradable que puede formarse directamente sobre un producto alimenticio como recubrimiento, o bien preformarse como una película independiente, la cual puede colocarse entre componentes alimentarios o utilizarse como material de envoltura. Sus propiedades funcionales permiten controlar la migración de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aromas y lípidos; incorporar ingredientes funcionales (por ejemplo, antioxidantes, antimicrobianos y saborizantes) en el sistema; y/o mejorar la resistencia mecánica y las propiedades de manipulación del producto alimenticio (Jeevahan y Chandrasekaran, 2019).

Las películas comestibles pueden producirse mediante diferentes técnicas, tales como inmersión (dipping), aspersión (spraying), colado (casting) y extrusión. El método de inmersión consiste en sumergir el alimento en la solución formadora de película durante un periodo específico, seguido de una etapa de secado (Guzmán *et al.*, 2015). Las películas generadas por aspersión se aplican como capas más delgadas y uniformes en comparación con la inmersión, siendo este método más adecuado cuando se busca proteger el alimento o aplicar múltiples capas de recubrimiento (Solís-Rivera, 2016). El método de casting es el más empleado, y puede realizarse controlando el espesor de la película o simplemente vertiendo la solución formadora sobre una placa o molde; este procedimiento requiere colocar la solución en recipientes nivelados antes del secado (Borbolla-Jiménez *et al.*, 2023).

El proceso de extrusión, como método para la producción de películas comestibles, presenta la limitante del espesor relativamente elevado del material obtenido, lo que lo hace poco adecuado como película comestible tradicional y más apropiado como material de empaque; además, su manipulación puede resultar más compleja. Sin embargo, la extrusión puede utilizarse para modificar la matriz de almidón destinada a aplicaciones de recubrimiento, mejorando las propiedades filmógenas y el desempeño en su aplicación (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

La semilla de mango es un subproducto subutilizado generado por las industrias procesadoras de jugos y frutas en conserva; comúnmente se desecha, contribuyendo al incremento en el volumen de residuos orgánicos (Sánchez-Chilero *et al.*, 2025). La semilla de mango puede ser una fuente potencial de ingredientes funcionales debido a su contenido de grasas y proteínas de buena calidad. Aunque el contenido proteico es relativamente bajo, contiene la mayoría de los aminoácidos esenciales, destacando leucina, valina y lisina (Chaparro-Acuña *et al.*, 2015).

El componente principal de la semilla de mango es el almidón (aproximadamente 60 %), seguido de lípidos (9–13 %) y proteínas (6–9 %). Estos compuestos se encuentran entre los biopolímeros más utilizados para el desarrollo de películas comestibles debido a sus buenas propiedades de barrera; no obstante, presentan limitaciones bajo ciertas condiciones de humedad relativa. Para mejorar la hidrofobicidad, se han incorporado lípidos en algunas formulaciones, obteniendo resultados favorables (Gomez-Caturla *et al.*, 2022). El almidón de semilla de mango se ha utilizado para el desarrollo de películas comestibles tanto de forma aislada como combinado con gomas (Nawab *et al.*, 2016, 2017), así como reforzado con nanocristales de almidón (Silva *et al.*, 2019).

El objetivo de este estudio fue identificar la combinación óptima de porcentaje de glicerol y velocidad de tornillo para obtener un material termoplástico adecuado para el desarrollo de una película comestible con buenas propiedades mecánicas y de barrera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de mango fueron utilizadas como materia prima, obtenidas de la planta deshidratadora de mango DAMAYA ubicada en El Saladito, Elota, Sinaloa, México. Las semillas se lavaron para eliminar la pulpa residual, se abrieron manualmente con un cuchillo para extraer las almendras, y se sometieron a secado solar durante 24 h. Posteriormente, las almendras secas se molieron utilizando un molino de martillos para obtener harina de almendra de mango, la cual fue envasada en bolsas de polietileno y almacenada a 4 °C hasta su uso.

PREPARACIÓN DE PELÍCULAS COMESTIBLES

La elaboración de las películas comestibles se llevó a cabo en dos etapas. La primera consistió en la extrusión de la harina de almendra de mango para permitir la gelatinización del almidón y promover la formación de una red polimérica adecuada para la estructura de la película. La segunda etapa implicó el moldeo por vertido (casting).

EXTRUSIÓN DE LA HARINA DE ALMENDRA DE MANGO

Para el proceso de extrusión, 250 g de harina de almendra de mango se mezclaron con glicerol (%G=15–25 %) y agua para alcanzar un contenido final de humedad del 20 %. La mezcla se dejó en reposo durante 12 h a 4 °C para asegurar una distribución uniforme de humedad en toda la muestra. Posteriormente, el material fue temperado durante 1 h previo a la extrusión, con el fin de evitar la adherencia al barril del extrusor. La temperatura de extrusión se mantuvo constante en 89 °C, mientras que la velocidad del tornillo (VT) se varió de 120 a 220 rpm (Tabla 1). El extrudido obtenido de cada tratamiento fue colectado en recipientes cilíndricos con agua (relación 1:4) para evitar la retrogradación. Este material fue empleado posteriormente para la elaboración de las películas comestibles.

FORMACIÓN DE LAS PELÍCULAS

Las películas comestibles se produjeron mediante el método de moldeo por vertido. Una formulación compuesta por harina de almendra de mango extrudida y agua fue calentada en una placa

calefactora hasta alcanzar 70 °C. Luego, se vertieron 30 g de la formulación en cajas Petri y se secaron en una estufa a 45 °C durante 2 h. Una vez secas, las películas se retiraron del molde y se almacenaron en un desecador con una solución saturada de $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (JT Baker®, Center Valley, EUA) para mantener una humedad relativa del 53 %. Posteriormente, las películas comestibles fueron sometidas a análisis fisicoquímicos, mecánicos y estructurales.

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) / ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA)

El IAA se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Ngobese *et al.* (2017). Una porción de 2 g de película comestible se pesó en un tubo de centrifuga de polipropileno (W_1). Se añadieron 10 mL de agua desionizada y se agitó la suspensión. La mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente durante 2 h y posteriormente se centrifugó a $3500 \times g$ durante 30 min. El sobrenadante fue decantado y el residuo remanente se pesó (W_2). El IAA se calculó utilizando la ecuación 1:

$$IAA = \frac{W_1 - W_2}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

El sobrenadante se decantó y se transfirió a una cápsula de aluminio previamente pesada, posteriormente se secó a 100 °C durante 4 horas y se pesó nuevamente (W_2). El ISA se calculó utilizando la ecuación 2:

$$ISA = \frac{W_2}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2)$$

Las pruebas se realizaron por triplicado tanto para el IAA como para el ISA.

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

La PVA se determinó gravimétricamente a 25 °C según la metodología descrita por Fitch-Vargas *et al.* (2016). Se utilizó cloruro de calcio granular como desecante. Se emplearon muestras de película con un espesor aproximado de 50 μm . Se registró el diámetro de los recipientes y se añadieron 15 g de

Tabla 1. Diseño experimental con los valores de las variables de proceso (%G y VT) y los resultados de las variables de respuesta evaluadas

Variables de proceso			Variables de respuesta				
Tratamiento	%G	VT	IAA	ISA	PVA	FR	PCO ₂
1	16.5	135	3.75	17.21	3.74E-11	10.83	8.86E-06
2	23.5	135	4.73	19.89	3.74E-11	8.22	6.03E-06
3	16.5	205	5.11	19.71	3.54E-11	9.73	7.76E-06
4	23.5	205	3.91	16.68	4.71E-11	6.69	2.06E-06
5	15	170	4.33	19.26	3.91E-11	14.66	1.05E-05
6	25	170	4.13	18.85	4.65E-11	8.66	5.85E-06
7	20	120	4.00	17.20	3.83E-11	7.94	6.27E-06
8	20	220	4.92	16.66	3.81E-11	7.59	4.48E-06
9	20	170	4.28	18.19	3.74E-11	14.35	2.72E-06
10	20	170	4.48	18.56	3.66E-11	15.23	3.95E-06
11	20	170	4.40	18.40	3.53E-11	15.08	3.39E-06
12	20	170	4.44	17.95	3.82E-11	14.71	3.526E-06
13	20	170	4.35	18.07	3.65E-11	14.59	3.15E-06

%G = Porcentaje de glicerol (%); VT = Velocidad de tornillo (rpm); IAA = Índice de absorción de agua (g gel/g muestra); ISA = Índice de solubilidad en agua (%); PVA = Permeabilidad al vapor de agua (g·m/Pa·s·m); FR = Fuerza de ruptura (N); PCO₂ = Permeabilidad al CO₂ (mL·cm/h·cm²·cmHg)

cloruro de calcio granular a cada uno. Las muestras de película se colocaron sobre el borde superior de cada recipiente, se sellaron con Parafilm®, y se registró el peso total.

Posteriormente, los recipientes con las películas montadas se colocaron en un desecador que contenía una solución saturada de cloruro de sodio, proporcionando una humedad relativa del 75 %. La ganancia de masa del cloruro de calcio se registró cada 12

horas durante 4 días, utilizando cinco réplicas. Con los datos obtenidos se construyó una gráfica de ganancia de peso en función del tiempo y de la masa, a partir de la cual se determinó la pendiente (Mp/t) (ASTM Estándar E96-95).

La PVA se determinó a partir del valor de la pendiente utilizando la ecuación 3:

$$PVA = \frac{(Mp)(E)}{(A)(t)(\Delta p)} \quad (3)$$

Donde: Mp: masa de humedad absorbida (g); E: espesor de la película (m); A: área de superficie expuesta de la película (m²); t: tiempo (s); Δp: diferencia de presión a través de la película (Pa). La prueba de la determinación de PVA fue realizada por triplicado.

FUERZA DE RUPTURA (FR)

La FR de las películas se evaluó siguiendo la metodología reportada por Calderón-Castro *et al.* (2018), utilizando un analizador universal de textura (INSTRON 3342, Norwood, MA, USA). Se registró la fuerza máxima requerida para romper las películas. Se analizaron veinte réplicas de cada muestra y los resultados se expresaron en newtons (N). La prueba fue realizada en 15 muestras y se reportó un promedio.

PERMEABILIDAD AL DIÓXIDO DE CARBONO (PCO₂)

Para determinar la permeabilidad al CO₂ se empleó el método reportado por Calderón-Castro (2019), utilizando cal sodada y cloruro de calcio como agentes desecantes, dispuestos en recipientes de vidrio que fueron sellados con las muestras de película y colocados en un desecador saturado con CO₂. Las muestras fueron pesadas cada 2 h durante 48 h, registrándose los valores de masa para construir una regresión lineal y obtener la pendiente. Ésta pendiente se utilizó para calcular la transmisión de CO₂ a través de la muestra de película dividiéndola entre el área expuesta. Finalmente, el valor de PCO₂ se determinó utilizando la ecuación 4:

$$PCO_2 = \frac{Tr}{p} \times E \quad (4)$$

Donde: PCO₂: permeabilidad al CO₂; Tr: transmisión de CO₂; p: presión del desecador (76 cm Hg); E: espesor medio de la película. La prueba de PCO₂ fue realizada por triplicado.

OPTIMIZACIÓN

La optimización de la formulación de la película comestible se llevó a cabo mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) utilizando el método numérico de deseabilidad. El objetivo fue determinar la mejor combinación de variables (%G y VT) para producir una película comestible a base de harina de almendra de mango con los valores más bajos posibles de IAA, ISA, PVA y PCO₂, junto con los valores más altos de FR.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE DATOS

Se aplicó un Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) con dos factores [porcentaje de glicerol (%G) = 15–25 %; velocidad de tornillo (VT) = 120–220 rpm]. Las variables de respuesta evaluadas fueron IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂. El objetivo fue obtener los valores más bajos posibles para IAA, ISA, PVA y PCO₂, maximizando al mismo tiempo FR.

Los datos experimentales de cada respuesta se sometieron a ANOVA y análisis de regresión lineal para obtener los modelos matemáticos y generar los gráficos de contorno y superficies de respuesta mediante el software Design-Expert versión 7.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta las diferentes combinaciones de variables de proceso para la producción de películas comestibles a partir de harina de almendra de mango, junto con los valores experimentales de las variables de respuesta obtenidos para cada combinación.

De manera similar, la Tabla 2 muestra el análisis de varianza y los modelos estadísticos para las respuestas IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂. Los datos revelaron un modelo de regresión significativo con valores de R² ajustado ≥ 0.8505, coeficiente de variación (CV) < 14.83 %, valores de p en la prueba F < 0.01 y sin falta de ajuste

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) y modelo estadístico de las variables evaluadas (IAA, ISA, PVA, FR, PCO₂) en películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango mediante el proceso de extrusión-moldeo (extrusion-casting)

Coefficiente	IAA	ISA	PVA	FR	PCO ₂
Intercepto					
β_0	4.37	18.23	3.8708x10 ⁻¹¹	14.79	3.348x10 ⁻⁶
Lineal					
β_1	-0.062 ^{NS}	-0.11 ^{NS}	2.766x10 ^{-12***}	-1.77***	-1.897x10 ^{-6***}
β_2	0.23***	-0.18**	9.299x10 ^{-13NS}	-0.39 ^{NS}	-9.493x10 ^{-7***}
Interacción					
$\beta_1\beta_2$	-0.55***	-1.43***	2.911x10 ^{-12***}	NS	NS
Cuadrático					
β_1^2	NS	0.51***	2.643x10 ^{-12***}	-1.78***	2.271x10 ^{-6***}
β_2^2	NS	-0.56***	NS	-3.72***	8.609x10 ^{-7**}
P_{modelo}	<0.0001	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0001
R^2	0.9140	0.9602	0.9003	0.9742	0.9381
R^2_{ajustada}	0.8853	0.9317	0.8505	0.9613	0.9071
CV(%)	0.44	2.51	3.74	5.85	14.83
Falta de ajuste	0.0927	0.3111	0.2087	0.0569	0.076

*Significativo (p = 0.05–0.10); **Significativo (p = 0.01–0.05); ***Significativo (p < 0.01); NS = No significativo. β_0 = Intercepto; Lineal: β_1 = Contenido de glicerol (%G), β_2 = Velocidad de tornillo (VT); Interacción: $\beta_1\beta_2$ = %G–VT; Cuadrático: β_1^2 = (%G)², β_2^2 = (VT)²

MODELOS DE PREDICCIÓN

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA)

La capacidad de absorción de agua se refiere a la cantidad de agua retenida por el almidón. Las propiedades de absorción de agua en películas comestibles a base de almidón son indeseables, ya que inducen cambios en las propiedades funcionales y estructurales del material (Calderón-Castro, 2019). La Figura 1A ilustra el efecto del %G y la VT sobre el IAA de las películas comestibles. En dicha figura, los valores más bajos de IAA se observaron con bajos %G combinados con bajas VT, así como con altos %G combinados con alta VT. Los valores oscilaron entre 3.75 y 5.11 %.

El modelo de regresión para el IAA de películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango fue (5):

$$IAA = +4.37 - 0.62 * \%G + 0.23 * VT - 0.55 * \%G * VT \quad (5)$$

El modelo de regresión explicó el 91.40 % de la variación total en los valores de IAA (p < 0.0001). Tanto el término lineal de VT como la interacción entre %G y VT (%G × VT) tuvieron un efecto significativo (p = 0.0008 y p < 0.0001, respectivamente) sobre el IAA de las películas comestibles. El modelo matemático no presentó falta de ajuste (p = 0.0927), obtuvo un R² mayor a 0.8 y un coeficiente de variación (CV) inferior al 10 %, lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

El glicerol es una molécula de bajo peso molecular y altamente higroscópica, lo que aumenta su efectividad como plastificante en comparación con otras moléculas como el sorbitol. En este

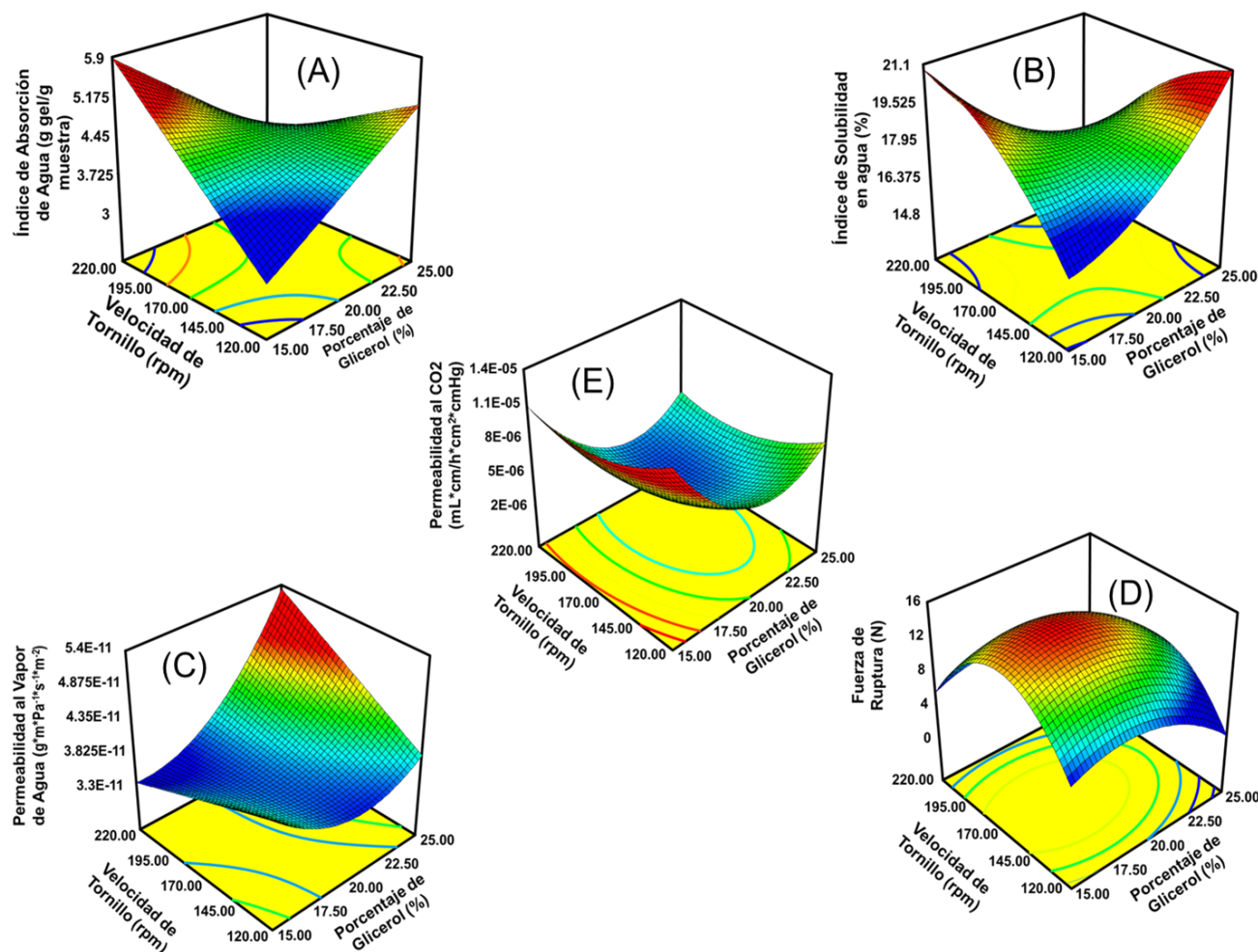


Figura 1. Gráficos de superficie de respuesta que muestran el efecto de los factores (%G y VT) sobre las variables de respuesta: (A) Índice de Absorción en Agua, (B) Índice de Solubilidad en Agua, (C) Permeabilidad al Vapor de Agua, (D) Fuerza de Ruptura y (E) Permeabilidad al CO₂ en películas comestibles elaboradas con harina de almendra de mango

estudio, se observó que incrementar el %G manteniendo una VT baja conllevó a valores más altos de IAA, al igual que mantener un %G bajo con una VT elevada. Este comportamiento puede atribuirse al esfuerzo mecánico y de corte ejercido por el tornillo del extrusor, que promueve la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, permitiendo la incorporación de agua al gránulo de almidón, favorecida por la afinidad del glicerol hacia el agua. No obstante, la zona de interés (valores bajos de IAA) se observó tanto con bajos valores de VT como de %G. Adicionalmente, altas concentraciones de glicerol actúan como lubricante, protegiendo al almidón de una degradación excesiva

por fuerzas de corte durante la extrusión (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA)

Se observó un efecto significativo de la interacción entre %G y VT ($\%G \times VT$) ($p < 0.0001$), así como de los términos cuadráticos de %G y VT ($p < 0.01$) sobre el ISA. El modelo de regresión para ISA fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (6):

$$ISA = +18.23 - 0.11 * \%G - 0.18 * VT - 1.43 * \%G * VT + 0.51 * \%G^2 - 0.56 * VT^2 \quad (6)$$

El modelo de regresión para el ISA de las películas comestibles explicó el 96.02% de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores obtenidos del ISA. La Figura 1B ilustra la relación entre el %G y la VT sobre el ISA de las películas comestibles. Se observó un comportamiento similar al encontrado para el IAA, con dos zonas de valores mínimos de ISA: una en bajo %G y baja VT, y otra en alto %G y alta VT. Los valores de ISA oscilaron entre 16.66 y 19.89 %. El modelo matemático para ISA no presentó falta de ajuste ($p = 0.3111$), con un R^2 ajustado de 0.9317 y un coeficiente de variación (CV) inferior al 10 % (CV = 1.53 %), lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

Se observa un efecto de interacción de la velocidad del tornillo con el contenido de glicerol; a bajos contenidos de glicerol se presentó un incremento del ISA al incrementar VT; sin embargo, a altos %G se observó una disminución del ISA al incrementar VT, un incremento en ISA en materiales extrudidos, elaborados a partir de almidón, se debe principalmente a un incremento en la modificación de la estructura del almidón provocada por procesos de gelatinización y/o dextrinización, lo cual en el presente trabajo se vio favorecido a altas VT y bajos %G, sin embargo, al incrementar el %G, suceden 2 cosas: primero un incremento en ISA debido a que el glicerol es soluble en agua, esto observado principalmente a bajos VT. Por otro lado, el exceso de glicerol no permite que haya una modificación del gránulo de almidón impidiendo ser gelatinizado disminuyendo así su solubilidad lo cual se ve favorecido al incrementar VT ya que esto reduce el tiempo de residencia y con ello la modificación del almidón (Wang et al., 2024).

La solubilidad en agua es un parámetro clave para materiales biodegradables elaborados a partir de biopolímeros sensibles al agua. Las aplicaciones potenciales de películas basadas en almidón pueden requerir insolubilidad en agua para mejorar la integridad del producto y la resistencia a la humedad en materiales de empaque biodegradables. El glicerol reduce las interacciones entre las moléculas del polímero e incrementa su solubilidad, otorgando a las cadenas poliméricas mayor afinidad por el agua. En este estudio, el aumento del %G condujo a

mayores valores de ISA, probablemente debido a la interacción del glicerol con la matriz polimérica, lo cual incrementa el espaciamiento entre cadenas y facilita la difusión de agua, elevando así los valores de ISA (Fitch-Vargas et al., 2016). Vázquez-Ontiveros (2021) reportó un incremento en la solubilidad con mayor contenido de glicerol en películas comestibles a base de almidón, atribuyendo este comportamiento a la naturaleza hidrofílica del glicerol y su interacción con el almidón. Saberi et al. (2016) señalaron que un mayor %G aumentó la solubilidad de películas comestibles elaboradas con almidón de chícharo y goma guar, debido a la disminución de la densidad de la red polimérica causada por la ruptura de puentes de hidrógeno.

El índice de solubilidad depende del origen del almidón y de la sustitución de grupos funcionales si el almidón es modificado (Basiak et al., 2017). Calderón-Castro et al. (2018) reportaron que mayores temperaturas de extrusión combinadas con bajo contenido de glicerol incrementaron la solubilidad de películas comestibles a base de almidón de maíz, observándose los valores más bajos de solubilidad con alto contenido de glicerol y bajas temperaturas de extrusión. Dichos autores atribuyeron el aumento de solubilidad a la gelatinización del almidón, lo cual interrumpe la estructura granular e incrementa la absorción y solubilidad; mientras que un alto contenido de glicerol actuó como lubricante, manteniendo la integridad de los gránulos y reduciendo la severidad del proceso. En el presente estudio se observó un efecto opuesto del contenido de glicerol: el ISA incrementó con mayor %G, pero cuando la VT también aumentó, el ISA disminuyó, probablemente debido al efecto lubricante y protector del glicerol frente al esfuerzo mecánico inducido por una alta VT.

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

El término lineal del %G tuvo un efecto significativo ($p < 0.01$) sobre la PVA de las películas comestibles. De manera similar, la interacción entre %G y VT ($\%G \times VT$), así como el término cuadrático del %G ($\%G^2$), mostraron efectos significativos ($p < 0.01$) sobre la PVA. El término lineal de VT no mostró un efecto

significativo ($p > 0.1$) sobre la PVA; sin embargo, se mantuvo en el modelo de regresión para mejorar el ajuste a los valores observados. El modelo de regresión para la PVA de las películas comestibles fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (7):

$$PVA = +3.708E - 011 + 2.766E - 012 * \%G + 9.299E - 013 * VT + 2.911E - 012 * \%G * VT + 2.643E - 012 * \%G^2 \quad (7)$$

El modelo de regresión para PVA de las películas comestibles explicó el 90.03 % de la variación total ($p = 0.0005$) en los valores de PVA. La Figura 1C muestra la relación entre el %G y la VT sobre la PVA de las películas comestibles. En dicha figura, los valores más bajos de PVA se observaron con un %G aproximadamente entre 17–22 %, independientemente de la VT dentro del intervalo evaluado (120–220 rpm). Los valores de PVA variaron de 3.53×10^{-11} a 4.71×10^{-11} g·m/Pa·s·m. El modelo matemático presentó un coeficiente de variación (CV) de 3.74 %, un R^2 ajustado de 0.8505 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.2087$), lo que indica que el modelo es adecuado y reproducible.

La PVA mide la difusión de moléculas a través de la sección transversal de la película y proporciona una estimación de sus propiedades barrera. En productos alimentarios, la transferencia de humedad debe minimizarse para controlar la pérdida de agua hacia el entorno, de modo que valores bajos de PVA son deseables. Sin embargo, la PVA de las películas comestibles está influenciada por diversos factores, incluyendo la naturaleza del material formador de película, el tipo de plastificante, los aditivos y el proceso de elaboración de la película (Torres-León *et al.*, 2018). La Figura 1C muestra que un incremento en %G aumenta la PVA, comportamiento también reportado por Vázquez-Ontiveros (2021) y Calderón-Castro *et al.* (2018) en películas comestibles a base de almidón de maíz obtenidas por extrusión-moldeo, así como por Nawab *et al.* (2016) en películas elaboradas con almidón de semilla de mango. Este comportamiento puede explicarse debido a que el glicerol es una molécula de bajo peso molecular y altamente higroscópica, lo cual incrementa su

efectividad como plastificante en comparación con moléculas como el sorbitol. Por tanto, mayores contenidos de %G conducen a un incremento en el contenido de humedad de la película, y mediante el efecto plastificante, aumentan el volumen libre y la movilidad de las cadenas, reduciendo la rigidez y mejorando el movimiento molecular, permitiendo una mayor difusión de vapor de agua a través de la estructura de la película (Nawab *et al.*, 2016).

Por otro lado, en el presente estudio, los valores de PVA incrementaron al incrementar la VT cuando se utilizaron %G altos. Una velocidad de tornillo más alta mejora la interacción y la mezcla del almidón y el glicerol. Esto conduce a una matriz polimérica más homogénea y compacta, sin embargo, en el punto de mayor %G generó una plastificación excesiva provocando una red polimérica con espacios grandes y una gran cantidad de grupos [OH] expuestos lo cual provocó una mayor afinidad con el agua incrementando los valores de PVA. Mientras que a bajos %G y alta VT la PVA disminuyó pudiendo en este caso a que al presentar bajo %G este fue integrado de mejor manera y de forma homogénea en la matriz formando una red compacta entre el plastificante y los componentes de la película lo que hizo que hubiera menos espacios por donde pudiera permear el vapor de agua a través de la película (Huntrakul *et al.*, 2020).

FUERZA DE RUPTURA (FR)

El término lineal del %G tuvo un efecto significativo ($p < 0.0001$) sobre la FR de las películas comestibles. De manera similar, los términos cuadráticos de %G ($\%G^2$) y VT (VT^2) mostraron efectos significativos ($p < 0.01$) dentro del modelo. El término lineal de VT no presentó un efecto significativo ($p > 0.1$) sobre la FR; sin embargo, se mantuvo en el modelo matemático para mejorar el ajuste a los valores observados. El modelo de regresión para la FR de las películas comestibles elaboradas con harina de almendra de mango fue de tipo cuadrático y presentó las siguientes expresiones (8):

$$FR = +14.79 - 1.77 * \%G - 0.39 * VT - 1.78 * \%G^2 - 3.72 * VT^2 \quad (8)$$

El modelo de regresión para la FR de las películas comestibles explicó el 97.42 % de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores de FR. La Figura 1D ilustra la relación entre %G y VT sobre la FR de las películas comestibles. En dicha figura se observa que los valores más altos de FR se obtuvieron a bajos e intermedios contenidos de %G (15–21 %) y velocidades de tornillo intermedias (160–180 rpm). Los valores de FR oscilaron entre 6.69 y 15.23 N. Este modelo matemático se considera adecuado y reproducible, ya que presentó un coeficiente de variación (CV) de 5.85 %, un R^2 ajustado de 0.9613 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.0569$).

Fitch-Vargas *et al.* (2016) produjeron películas comestibles a base de almidón de maíz, variando la temperatura de extrusión, la proporción de plastificante (sorbitol:glicerol) y la velocidad de tornillo. Reportaron que la velocidad de tornillo no tuvo un efecto significativo sobre la FR; sin embargo, en el presente estudio la VT mostró un efecto significativo sobre los valores de FR. Esta diferencia podría atribuirse al intervalo de VT empleado, ya que la velocidad máxima utilizada en el estudio de Fitch-Vargas *et al.* (2016) fue menor que la mínima utilizada en el presente trabajo. Adicionalmente, las diferencias pueden deberse a la presencia de otros componentes en el material, ya que este estudio se realizó empleando harina integral de almendra de mango.

Calderón-Castro *et al.* (2018) prepararon películas comestibles a base de almidón de maíz y reportaron una disminución en la FR con el incremento del contenido de glicerol a una velocidad de tornillo intermedia de 170 rpm. Un comportamiento similar fue reportado por Farahnaky *et al.* (2013) para películas de almidón de trigo indicando que las películas se vuelven más frágiles a concentraciones elevadas de glicerol. En el presente estudio, la FR también disminuyó con el aumento de glicerol, probablemente debido al efecto plastificante del mismo sobre el almidón, ya que puede penetrar los gránulos de almidón y alterar los enlaces de hidrógeno internos bajo condiciones de alta temperatura, presión y cizalla, debido a su polaridad y reducido tamaño molecular (Calderón-Castro *et al.*, 2018).

Al analizar el efecto de la VT sobre los valores de FR (Figura 1D) podemos observar que conforme se aumenta la VT también

aumenta el valor de FR; sin embargo, al llegar a VT altas la FR disminuye. Esto puede deberse a que, a mayor velocidad del tornillo, la energía de cizallamiento y la tasa de producción aumentan, pero el tiempo de residencia disminuye. Esto puede resultar en una menor gelatinización del almidón y una mezcla menos homogénea si el tiempo es insuficiente. Una mezcla heterogénea o una plastificación incompleta tienden a producir películas más frágiles, lo que se traduce en una menor fuerza de ruptura o resistencia a la tracción.

Una mayor velocidad de rotación del tornillo generalmente incrementa la fuerza de cizalla y la disipación de energía mecánica, lo que a su vez eleva la temperatura del material dentro del extrusor. Este aumento de temperatura y cizalla puede mejorar la gelatinización del almidón y la mezcla con el glicerol (plastificante), creando una matriz polimérica más homogénea y compacta. Como resultado, las películas pueden presentar una mayor fuerza de ruptura (resistencia a la tracción), ya que la estructura molecular está mejor interconectada. Sin embargo, velocidades excesivamente altas pueden degradar los componentes del material (especialmente proteínas y almidón) debido al exceso de calor y estrés mecánico, lo que podría llevar a una disminución de la fuerza de ruptura y otras propiedades mecánicas si la integridad de la cadena polimérica se ve comprometida. Por otro lado, velocidades de tornillo muy bajas pueden resultar en una mezcla incompleta, una gelatinización deficiente y una matriz heterogénea, lo que también afectaría negativamente a la fuerza de ruptura de la película final (Bangar *et al.*, 2021).

PERMEABILIDAD AL DIÓXIDO DE CARBONO (PCO_2)

Los términos lineales de %G y VT tuvieron efectos significativos ($p < 0.01$) sobre la PCO_2 de las películas comestibles. Asimismo, los términos cuadráticos de %G ($\%G^2$) y VT (VT^2) mostraron efectos significativos ($p < 0.0001$ y $p < 0.05$, respectivamente) sobre la PCO_2 . El modelo de regresión para la PCO_2 de las películas comestibles formuladas con harina de almendra de

mango fue de naturaleza cuadrática y presentó las siguientes expresiones (9):

$$PCO_2 = +3.348E - 006 - 1.897E - 006 * \%G - 9.493E - 007 * VT + 2.271E - 006 * \%G^2 + 8.609E007 * VT^2 \quad (9)$$

El modelo de regresión para la PCO_2 explicó el 93.81 % de la variación total ($p < 0.0001$) en los valores de PCO_2 . La Figura 1E ilustra la relación entre %G y VT sobre la PCO_2 de las películas comestibles. En ella se observa que los valores más bajos de PCO_2 se presentan en un intervalo de %G aproximadamente entre 20–23 % y velocidades de tornillo intermedias a altas (160–220 rpm). Los valores de PCO_2 oscilaron entre 2.05×10^{-6} y 1.05×10^{-5} mL·cm/h·cm²·cmHg. El modelo matemático presentó un coeficiente de variación (CV) de 14.83 %, un R^2 ajustado de 0.9071 y ausencia de falta de ajuste ($p = 0.0761$). El valor de CV mayor al 10 % pudiera deberse a la metodología empleada y al número de muestra utilizada, así como a la naturaleza y la homogeneidad de los componentes de la película.

La naturaleza del polímero —como su estructura química, cristalinidad, longitud de cadena, densidad, peso molecular y grado de polimerización— son factores clave que afectan la difusión de gases. El desarrollo de películas biodegradables con permeabilidad selectiva a gases puede ser altamente prometedor para controlar el intercambio respiratorio y mejorar la conservación de alimentos frescos o mínimamente procesados susceptibles a la oxidación. La atmósfera modificada generada por el recubrimiento retiene físicamente CO_2 dentro del fruto o vegetal y sella parcialmente los poros, reduciendo la velocidad de intercambio y transferencia de gases (Calderón-Castro, 2019).

Calderón-Castro (2019) desarrolló películas comestibles basadas en almidón modificado mediante acetilación y succinatización, y reportó que el aumento en el contenido de glicerol en la formulación disminuyó la PCO_2 . Este efecto fue atribuido a que el glicerol incrementa el volumen libre dentro de la matriz polimérica al reducir las fuerzas intermoleculares, facilitando así la difusión del gas a través de la película, ya que la permeabilidad depende

en gran medida de la interacción entre el gas permeante y la matriz polimérica. En el presente estudio, los valores más bajos de PCO_2 se encontraron en valores intermedios de %G y VT.

OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN

El gráfico de deseabilidad global (D) (Figura 2) muestra los valores máximos predichos de D en la zona roja para cada respuesta (IAA, ISA, PVA, FR, PCO_2), de donde se seleccionó un valor óptimo ($D = 0.73$), correspondiente a las condiciones de %G y VT que resultaron en valores mínimos de IAA, ISA, PVA y PCO_2 , y valores máximos de FR. Los valores de deseabilidad individual para cada respuesta asociados con el D máximo seleccionado fueron: dIAA = 0.69, dISA = 0.59, dWVP = 0.90, dFR = 0.87, d PCO_2 = 0.67 (Figura 3). Las variables del proceso asociadas con la máxima deseabilidad global fueron: %G = 19 % y VT = 150 rpm. La deseabilidad global (D) obtenida en este estudio se encuentra dentro del rango aceptable ($0.6 < D < 0.8$), de acuerdo con De la Vara y Domínguez (2002).

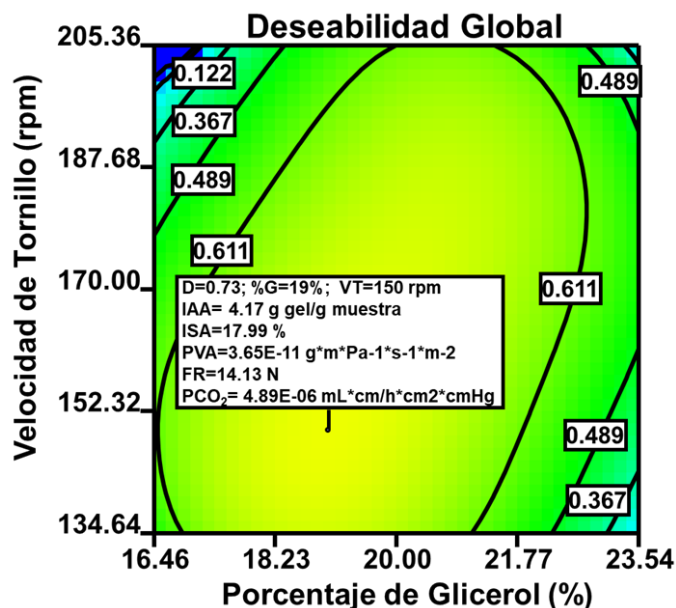


Figura 2. Gráfico de deseabilidad global ($D = 0.73$) para obtener la combinación óptima de las variables de procesamiento (%G = 19 % / VT = 150 rpm) y los valores predichos para las variables de respuesta.

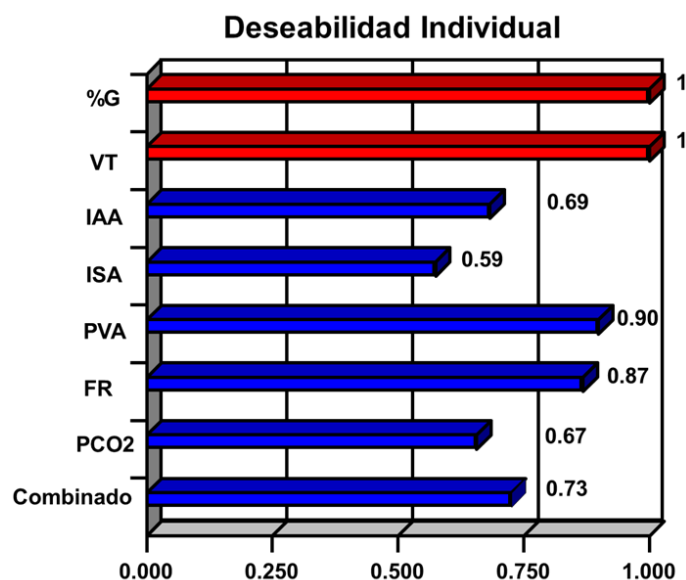


Figura 3. Valores de deseabilidad individual de las variables de respuesta IAA, ISA, PVA, FR y PCO₂ para las películas comestibles elaboradas a partir de harina de almendra de mango.

Los valores predichos, obtenidos de las variables de respuestas bajo las condiciones óptimas de %G y VT, calculados mediante los modelos de predicción para cada variable respuesta, fueron: IAA = 4.17 g gel/g muestra, ISA = 17.99 %, PVA = 3.65×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR = 14.13 N, PCO₂ = 4.89×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg. Para validar los modelos empleados, la formulación de harina de almendra de mango se extruyó utilizando los valores óptimos de %G y VT determinados. Posteriormente, se prepararon y caracterizaron películas comestibles bajo estas condiciones óptimas para verificar los valores predichos. Los valores promedio obtenidos para las películas óptimas fueron: IAA = 4.15 g gel/g muestra, ISA = 17.82 %, PVA = 3.58×10^{-11} g·m/Pa·s·m, FR = 14.21 N, PCO₂ = 4.78×10^{-6} mL·cm/h·cm²·cmHg.

La comparación entre los valores experimentales y los predichos por los modelos matemáticos mostró que no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$). Por tanto, el modelo utilizado se confirmó experimentalmente como adecuado para determinar la concentración óptima de glicerol y la velocidad de tornillo en la producción de películas comestibles a base de harina de almendra de mango con buenas propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de barrera.

CONCLUSIONES

La almendra de mango es un material viable para la producción de películas y recubrimientos comestibles. La metodología de superficie de respuesta demostró ser una herramienta útil para obtener películas comestibles a base de harina de almendra de mango con buenas propiedades mecánicas y de barrera. Las películas producidas bajo condiciones óptimas podrían contribuir a mantener la calidad de los frutos y prolongar su vida útil, además de añadir valor a los subproductos derivados del mango. Sin embargo, es necesario realizar análisis adicionales para confirmar los beneficios de estas películas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la participación y el apoyo del IAI Javier Gutiérrez García en la elaboración y evaluación de las películas comestibles. Asimismo, se agradece a la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa por brindar las instalaciones necesarias para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Aguilar-Palazuelos, E., Fitch-Vargas, P. R., Delgado-Nieblas, C. I., López-Díaz, A., Gastélum-Ávila, A., Sánchez-Chilero, M. A., Limón-Valenzuela, V., Camacho-Hernández, I. L., Ruiz-Armenta, X. A., & Calderón-Castro, A. (2025). Edible films based on corn starch and gelatin obtained by the combination of extrusion and casting process: characterization and applications. *Food Biophysics*, 20, 2. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09891-1>
- Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V., & Rusu, A. V. (2021). Funcionalidad y aplicabilidad de las películas a base de almidón: un enfoque ecológico. *Foods*, 10 (9), 2181. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2017). Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98,

- 348–356.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.122>
- Borbolla-Jiménez, F. V., Peña-Coronado, S. I., Farah, S. J., Jiménez-Valdés, M. T., Pineda-Pérez, E., Romero-Montero, A., Del Prado-Audelo, M. L., Bernal-Chávez, S. A., Magaña, J. J., & Leyva-Gómez, G. (2023). Films for wound healing fabricated using a solvent casting technique. *Pharmaceutics*, 15(7), 1914. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071914>
- Calderón-Castro, A., Vega-García, M. O., Zazueta-Morales, J. J., Fitch-Vargas, P. R., Carrillo-López, A., Gutiérrez-Dorado, R., Limón-Valenzuela, V., & Aguilar-Palazuelos, E. (2018). Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 905-914. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2997-6>
- Calderón-Castro, A. (2019). Modificación química de almidón de maíz (*Zea mays* L.) por acetilación y succinación empleando el proceso de extrusión: Estudio del efecto de grado de sustitución, sobre las propiedades funcionales en películas comestibles. Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Calderón-Castro, A., Ahumada-Meza, J.A., Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Fitch-Vargas, P. R., Delgado-Nieblas, C. I., López-Díaz, A., Camacho-Hernández, I. L., Ruiz-Armenta, X. A., & Jacobo-Valenzuela, N. (2024). Desarrollo y optimización de películas comestibles de almidón de maíz incorporando aceite esencial de citronela y nanopartículas de calcio. *QUIBIOUAS Revista De Ciencias Químico Biológicas*, 2, 47-57. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/article/view/841>
- Chaparro-Acuña, S. P., Lara-Sandoval, A. E., Sandoval-Amador, A., Sosa-Saurique, S. J., Martínez-Zambrano, J. J., & González, J. H. (2015). Caracterización funcional de la almendra de las semillas de mango (*Mangifera indica* L.). *Ciencia en Desarrollo*, 6(1), 67-75. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v6n1/v6n1a09.pdf>
- De la Vara, S. R., & Domínguez, D. J. (2002). Métodos de superficie de respuesta; un estudio comparativo. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, 9(1), 47-65.
- Farahnaky, A., Saberi, B., & Majzoobi, M. (2013). Effect of glycerol on physical and mechanical properties of wheat starch edible films. *Journal of Texture Studies*, 44, 176–186. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12007>
- Fitch-Vargas, P. R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., Vega-García, M. O., Valdez-Morales, J.E., Martínez-Bustos, F., & Jacobo-Valenzuela, N. (2016). Physicochemical and microstructural characterization of corn starch edible films obtained by a combination of extrusion technology and casting technique. *Journal of Food Science*, 81(9), E2224-2232. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.13416>
- Gomez-Caturla, J., Ivorra-Martinez, J., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., Garcia-Garcia, D., Dominici, F., Puglia, D., & Torre, L. (2022). Improvement of the barrier and mechanical properties of environmentally friendly mango kernel flour/glycerol films by varying the particle size of mango kernel flour. *Industrial Crops & Products*, 188, 115668. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115668>
- Guzmán, L. E., Acevedo, D., Romero, L., & Estrada, J. (2015). Elaboración de una película comestible a base de colágeno incorporado con nisina como agente antimicrobiano. *Información Tecnológica*, 26(3), 17-24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300004>
- Huntrakul, K., Yoksan, R., Sane, A., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Effects of pea protein on properties of cassava starch edible films produced by blown-film extrusion for oil packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100480>

- Jeevahan, J., & Chandrasekaran, M. (2019). Nanoedible films for food packaging: a review. *Journal of Materials Science*, 54, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03742-y>
- Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., & Hasnain, A. (2016). Biodegradable film from mango kernel starch: Effect of plasticizers on physical, barrier, and mechanical properties. *Starch/Stärke*, 68, 919-928. <https://doi.org/10.1002/star.201500349>
- Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., Lufti, Z., & Hasnain, A. (2017). Mango kernel starch-gum composite films: Physical, mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 869-876. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.054>
- Ngobese, N. Z., Workneh, T. S., Alimi, B. A., & Tesfay, S. (2017). Nutrient composition and starch characteristics of eight European potato cultivars cultivated in South Africa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 55, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.11.002>
- Saberi, B., Thakur, R., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Optimization of physical and optical properties of biodegradable edible films based on pea starch and guar gum. *Industrial Crops and Products*, 86, 342-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.015>
- Sánchez-Chilero, M. A., Aguilar-Palazuelos, E., Gutiérrez-Dorado, R., Rodríguez-González, F.J., Gastélum-Ávila, A., Fitch-Vargas, P.R., Zazueta-Morales, J. J., Calderón-Castro, A., Camacho-Hernández, I. L., & Gómez-Favela, M. A. (2025). Optimization of cellulose extraction from mango seed tegument: a sustainable approach for biopolymer applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(24), 30963-30976. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06892-z>
- Silva, A. P. M., Oliveira, A. V., Pontes, S. M. A., Pereira, A. L. S., Souza-Filho, M. M., Rosa, M. F., & Azeredo, H. M. C. (2019). Mango kernel starch films as affected by starch nanocrystals and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 211, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.013>
- Solís-Rivera, S. I. (2016). Elaboración y caracterización de películas comestibles elaboradas con hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC). Tesis Licenciatura en Química de Alimentos. Universidad Autónoma del Estado de México, México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65172>
- Torres-León, C., Vicente, A. A., Flores-López, M. L., Rojas, R., Serna-Cock, L., Alvarez-Pérez, O. B., & Aguilar, C. N. (2018). Edible films and coating based on mango (var. Ataulfo) by-products to improve gas transfer rate of peach. *LWT-Food Science and Technology*, 97, 624-631. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.057>
- Vázquez-Ontiveros, M. E. (2021). Elaboración y caracterización de películas comestibles a base de almidón modificado por extrusión, adicionado con aceite esencial de orégano (*Origanum vulgare*) para el control de rancidez oxidativa en cacahuete (*Arachis hypogae*). Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Wang, K., Tan, C., Tao, H., Yuan, F., Guo, L., & Cui, B. (2024). Effect of different screw speeds on the structure and properties of starch straws. *Carbohydrate Polymers*, 328, 121701. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121701>