

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE SECADO EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, MECÁNICAS Y DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA DE PELÍCULAS DE ALMIDÓN DE MAÍZ

María Antonia Flores-Córdova¹, Gabriela Uribe-Cruz^{1,3}, Nora Aideé Salas-Salazar¹, Alma Iveth Sáenz-Mendoza², Rogelio Calderón-Loera³, Paul Baruk Zamudio Flores^{3,*}

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Chihuahua, Extensión Cuauhtémoc, Barrio de la presa s/n, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, México, C.P. 31510. mafloresc@uach.mx.

²Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Av. Benjamín Franklin número 4650, Zona PRONAF alfa, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Cuauhtémoc, Fisiología y Tecnología de alimentos de la Zona Templada. Avenida Río Conchos s/n, Parque Industrial, Apartado postal 781, C.P. 31570, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Teléfono: 625 5812920, 21 y 70, Extensión: 111.

*Autor para correspondencia: pzamudio@ciad.mx

Recibido: Octubre 2023 ; Aceptado: Enero 2024

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el efecto del tiempo y temperatura de secado ($T_{ambiente} = 144$ h a 25 °C; $T_{3h} = 3$ h a 60 °C; $T_{7h} = 7$ h a 60 °C) en las propiedades fisicoquímicas (grosor, color, humedad, solubilidad e hinchamiento), mecánicas (tensión a la fractura = TF; porcentaje de elongación = %E; módulo de elasticidad = ME) y en la permeabilidad al vapor de agua (PVA) en películas de almidón de maíz. Se observó que el tiempo de secado T_{3h} (temperatura de 60 °C durante 3 h) disminuyó la TF (de 12 a 8 MPa) y el ME (de 447 a 231 MPa); mientras esta disminución fue menor durante el secado T_{7h} (60 °C por 7 h) (TF = 12 a 11 MPa). En estas condiciones se observaron incrementos significativos en el %E (de 24 a 33%) y ME (de 447 a 598 MPa). Por lo que se deduce que el tiempo y la temperatura de secado son variables que influyen significativamente las propiedades mecánicas y en la PVA de películas de almidón.

Palabras clave: Fuentes convencionales de almidón; Solución formadora de película; Propiedades reológicas; Caracterización fisicoquímica.

ABSTRACT

In the present study, the effect of drying time and temperature ($T_{ambiente} = 144$ h at 25 °C; $T_{3h} = 3$ h at 60 °C; $T_{7h} = 7$ h at 60 °C) on the physicochemical (thickness, color, humidity, solubility and swelling), mechanical (fracture stress = TF; elongation percentage = %E; elastic modulus = ME) and in water vapor permeability (PVA) properties in corn starch films were evaluated. It was observed that the drying time T_{3h} (temperature of 60 °C for 3 h) decreased the TF (from 12 to 8 MPa) and ME (from 447 to 231 MPa); while this decrease was smaller during drying T_{7h} (60 °C for 7 h) (TF = 12 to 11 MPa). Under these conditions, significant increases in %E (from 24 to 33%) and ME (from 447 to 598 MPa) were observed. Therefore, it is deduced that drying time and temperature are variables that significantly influence the mechanical properties and the PVA of starch films.

Keywords: Conventional sources of starch; Filmogenic solution; Rheological properties; Physicochemical characterization.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a los actuales problemas de contaminación ambiental ocasionados por el uso indiscriminado de materiales plásticos sintéticos no degradables (generados alrededor del mundo) y para cumplir con la jerarquía de cero desperdicios, se está investigando la factible aplicación de empaques biodegradables o que procedan de fuentes naturales en diversos alimentos y productos hortofrutícolas [1]. Dentro de las fuentes naturales, el almidón de maíz es uno de los biopolímeros degradables de mayor abundancia ya que es obtenido de fuentes renovables, aunado a que presenta propiedades termoplásticas, una mayor relación superficie-volumen, estructura densa, biocompatibilidad, biodegradabilidad y mayor fuerza enlazante, las cuales se consideran propiedades adecuadas como materiales de empaque para diversas aplicaciones en la agricultura y en la industria alimentaria [2].

Las propiedades termoplásticas otorgan al almidón la posibilidad de utilizarse en la elaboración de películas y cubiertas de empaques biodegradables para alimentos [3-6]. A nivel laboratorio, uno de los métodos mayormente utilizados para la elaboración de películas de almidón, consiste en el “casting” o también conocido como “vaciado en placa”, para lo cual, primeramente, es necesario obtener la solución formadora de película (SFP) y posteriormente aplicar calor o temperatura de secado para la formación de la película [7-10]. Comercialmente, el almidón de maíz es una de las principales materias primas o fuente vegetal de utilización a nivel global (aproximadamente el 65% del suministro de almidón) debido a su relativo bajo costo, facilidad de disposición y sostenibilidad con el medio ambiente, por lo que se considera un material adecuado y disponible para la elaboración de películas degradables [11-13].

Como se mencionó anteriormente, una variable importante para la formación de las películas de almidón a partir de la SFP, son las condiciones de secado, las cuales se consideran prioritarias para formar la película o la cubierta en el caso de que se requiera como material de embalaje en alimentos [14, 15]. Por su parte, Reis et al. [16] modelaron curvas de secado de soluciones filmógenas a temperaturas de 25, 30, 35, 40 y 45 °C, a diferentes concentraciones de almidón y glicerol, obteniendo que el contenido de humedad crítico varió en función de la concentración de almidón y la temperatura aplicada durante el secado de las SFP. Estos investigadores también reportaron que la concentración de glicerol no influyó en ninguno de los parámetros analizados. En general, las películas degradables de almidón son susceptibles a sufrir cambios en sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de barrera en función de la temperatura con la cual son secadas a partir de la SFP. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo consistió en evaluar el efecto de la

temperatura y el tiempo de secado en las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua de películas de almidón de maíz.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Reología de las soluciones formadoras de película (SFP)

Se realizaron SFP con almidón de maíz comercial utilizando 4% de almidón, 2% glicerol, y agua para preparar 100 g totales. La SFP se dejó enfriar y se sometió a agitación en placa a temperatura ambiente (25 ± 5 °C). Para evaluar su comportamiento reológico mediante pruebas de corte, se utilizó la metodología descrita por Zamudio-Flores et al. [10], utilizando un reómetro AR1500ex (TA Instruments, Ltd., New Castle, DE, EUA). Se utilizó una geometría de acero inoxidable de 60 mm de diámetro y un gap de 500 μm. Las pruebas reológicas se realizaron a velocidades de corte desde 5 hasta 500 s⁻¹. Los comportamientos de flujo se analizaron mediante el empleo del modelo de la ley de potencia:

$$\sigma = k \gamma^n \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo cortante (Pa), γ es la velocidad de corte (s⁻¹), k es el índice de consistencia (Pa·sⁿ), y n (adimensional) es el índice de comportamiento de flujo. La determinación se realizó al menos por triplicado para cada una de las formulaciones, esto con la finalidad de para caracterizar el comportamiento reológico de las SFP y determinar las variables n y k .

2.2 Elaboración de las películas

Para la elaboración de las películas se utilizó el método descrito por Zamudio-Flores et al. [17] con modificaciones. La solución formadora de película (SFP) se realizó en una placa de calentamiento Corning (Modelo PC-620D, EUA), iniciando a una temperatura de 24 °C y calentando progresivamente a una temperatura de 85 °C. La temperatura se mantuvo 15 min con una velocidad de 400 rpm. Después, la SFP se enfrió a 70 °C y se adicionó el plastificante a una concentración de 1.8 g por cada 90 g de solución, continuando con la agitación por 15 min a 400 rpm. Las películas se prepararon por “casting” (vaciado en placa), depositando las suspensiones gelatinizadas en cajas Petri de poliestireno (P100), y se secaron a temperatura ambiente (25 ± 5 °C) por 48 h. Las películas formadas se desprendieron y se acondicionaron en desecadores con una solución saturada de NaBr (HR = 50 ± 5%) por 24 h. Finalmente, las películas se almacenaron en bolsas herméticas (Ziploc®, Johnson y Sons, Inc., Racine, WI, EUA) hasta su posterior caracterización.

2.3 Contenido de humedad, solubilidad e hinchamiento de las películas

Para la determinación de estas variables se utilizó la metodología descrita por Homez-Jara et [18] con modificaciones, estas consistieron en que el tiempo de agitación para la determinación de solubilidad se redujo de un tiempo de 24 horas de agitación constante a 1 min de agitación y 59 min en reposo, los tiempos de secado se redujeron a 2 h. Se determinó el contenido de humedad, solubilidad e hinchamiento, utilizando piezas de 2×2 cm de cada muestra. Para determinar el contenido de humedad de las muestras, se colocaron en charolas de aluminio a peso constante, se pesaron (P_0) y se llevaron a 105 °C durante 2 h para determinar el contenido de humedad, posteriormente, las muestras se llevaron a enfriar en un desecador para tomar su peso (P_1), determinando el contenido de humedad a partir de la fórmula:

$$\text{Contenido de humedad} = \left[\frac{(P_0 - P_1)}{P_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

Para la determinación de la solubilidad, la muestra se adicionó a un vaso de precipitado con 50 mL de agua destilada, permaneciendo en agitación constante (250 rpm) en una placa de calentamiento y agitación controlada (Thermo Scientific Modelo Cimarec+, EUA) durante 1 min a 25 °C, posteriormente se mantuvieron en reposo durante 59 min. El porcentaje de materia soluble (%) solubilidad se calculó mediante la fórmula:

$$\% \text{ Solubilidad} = \left[\frac{(P_1 - P_3)}{P_1} \right] \times 100 \quad (3)$$

Para determinar el poder de hinchamiento en las muestras, se recuperó la muestra en un colador con un filtro de cafetera para tomar el peso húmedo de las muestras (P_2), finalmente, cada muestra se llevó a una estufa a 105 °C durante 2 h para su secado y obtener su peso final (P_3).

$$\% \text{ Poder de hinchamiento} = \left[\frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \right] \times 100 \quad (4)$$

2.4 Determinación del grosor

El grosor de cada película se midió mediante un micrómetro digital Mitutoyo (Modelo Digimatic 293-340, Kanagawa, Japón) con una precisión de 0,001 mm contemplando 10 puntos aleatorios y considerando el área total de la película. El grosor promedio representativo de cada formulación se determinó a partir de cinco películas. Los valores se reportaron como promedios \pm error estándar.

2.5 Evaluación de color

Para evaluar el color de la superficie de las películas, se utilizó un colorímetro Minolta CR-300 (Minolta, Osaka, Japón), calibrado con un mosaico de calibración de transmitancia cero CM-A100.

Para lo cual se tomaron cinco medidas en posiciones aleatorias en la película utilizando la escala CIELAB (L^* , a^* , b^*) de acuerdo con la metodología reportada por Abedinia et [19].

2.6 Determinación de la permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La PVA se determinó empleando el método gravimétrico estándar de la ASTM E-96-80 [20]. Con tal propósito, las películas se cortaron en forma circular con un diámetro de 9 cm, se acondicionaron en un desecador con una humedad relativa de 52% provista por una solución salina saturada de NaBr (25 ± 3 °C, 48 h); posteriormente se colocaron cuidadosamente sobre la parte superior de las celdas de prueba. En el interior de las celdas se colocó sílica gel para generar una humedad relativa $\approx 0\%$; cada celda se colocó en un desecador, el cual contenía una solución saturada de NaCl el cual generó una humedad relativa de 60%. Se registraron los cambios de peso de las celdas cada hora durante al menos 7 h. Se realizó un análisis de regresión lineal de los datos registrados de la ganancia de peso en función del tiempo para calcular la velocidad (también llamado coeficiente) de transmisión de vapor de agua (VTVA o CTVA). Todas las pruebas se realizaron a una temperatura de 25 ± 3 °C por cuadruplicado para cada formulación.

Para su cálculo se utilizará la siguiente ecuación:

$$WVP = \frac{W \times x}{t \times A \times \Delta P} \quad (5)$$

Donde W corresponde al incremento de peso de la sílica gel (g), x es el grosor de la película (m), t es el tiempo transcurrido (s), A es el área de permeación de la película (m^2), y ΔP es la diferencia de presión entre las superficies de la película (en Pa).

2.7 Determinación de las propiedades mecánicas

Las pruebas mecánicas consistieron en la determinación de la tensión a la fractura (TF), porcentaje de elongación (%E) y el módulo de elasticidad de acuerdo con el método ASTM-882-95a utilizando la metodología descrita por Zamudio-Flores et al. [17] empleando diez tiras ($60 \times 10 mm^2$) para cada formulación; el espesor se midió en 10 puntos aleatorios a lo largo de cada tira usando un micrómetro (Mitutoyo, Kobe, Japón). El promedio del espesor se utilizó para determinar el área de sección transversal sobre la cual se ejerció la fuerza de tensión. Las películas se sometieron a una prueba de tensión a la fractura en un texturómetro TAXT-Plus (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), con el software Exponent lite (versión 4.0) con una celda de carga de 30 kg y una separación entre las mordazas de 4 cm. Las pruebas de tensión se realizaron a una velocidad de deformación de $20 mm min^{-1}$. La TF se calculó por la división de la fuerza máxima sobre la muestra durante la fractura entre el área transversal ($A =$ grosor promedio \times ancho). El %E se determinó

como el porcentaje del cambio (deformación de Cauchy). El ME se determinó de la pendiente obtenida del comportamiento lineal de la curva de esfuerzo-deformación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Reología de las soluciones formadoras de película (SFP)

Las curvas de flujo de las soluciones formadoras de película (SFP) se observan en la Figura 1. En la Figura 1a se observa la dependencia del esfuerzo cortante *vs* la velocidad de corte, y claramente se visualiza que la viscosidad aparente disminuye cuando incrementa la velocidad de corte (Figura 1b). De acuerdo con el modelo reológico de la ley de Potencia determinamos que la SFP presentó valores del índice de consistencia (*k*) e índice de comportamiento de flujo (*n*) de $0,747 \pm 0,058$ y $0,592 \pm 0,022$, respectivamente. De acuerdo con dicho modelo, el ajuste (R^2) de todas las SFP fue superior al 0,990, esto indicó que el comportamiento de las SFP puede ser claramente descrito mediante el empleo de dicha ley. Los valores de $n < 1$, evidenciaron un comportamiento no-Newtoniano del tipo corte adelgazante, conocido como comportamiento “psedoplástico”, el cual ya ha sido previamente reportado en la literatura científica en SFP de almidones nativos y oxidados de avena (con valores de $n \approx 0,45-0,300$ y $k \approx 4,10-19,8 \text{ Pa} \times \text{s}^n$) [10]. El comportamiento pseudoplástico se produce cuando el esfuerzo aplicado desorganiza el arreglo de las macromoléculas dentro una matriz estructural [10, 21].

En relación a la caracterización reológica de las SFP, algunos investigadores han publicado que esta determinación se considera fundamental para conocer la viscosidad de estas soluciones antes de que se conviertan en películas y proporciona una mayor comprensión de la relación estructura-función en los materiales poliméricos [10, 22, 23]. Se ha reportado que una alta viscosidad de las SFP dificultaría la eliminación de burbujas de aire, y esto repercutiría en la técnica de vaciado en placa [24, 25]. El efecto del plastificante (glicerol) sobre las propiedades fisicoquímicas de las películas después del secado, es aún un tema polémico, por demás interesante. En un estudio realizado por Reis et [16], mencionan que la temperatura evaluada de 25, 30, 35, 40 y 45 C influye en los parámetros de velocidad de secado, ya que a la mayor temperatura se presentó una mayor transferencia de calor del aire al material y, en consecuencia, un aumento de la velocidad de migración del agua desde el interior a la superficie del producto.

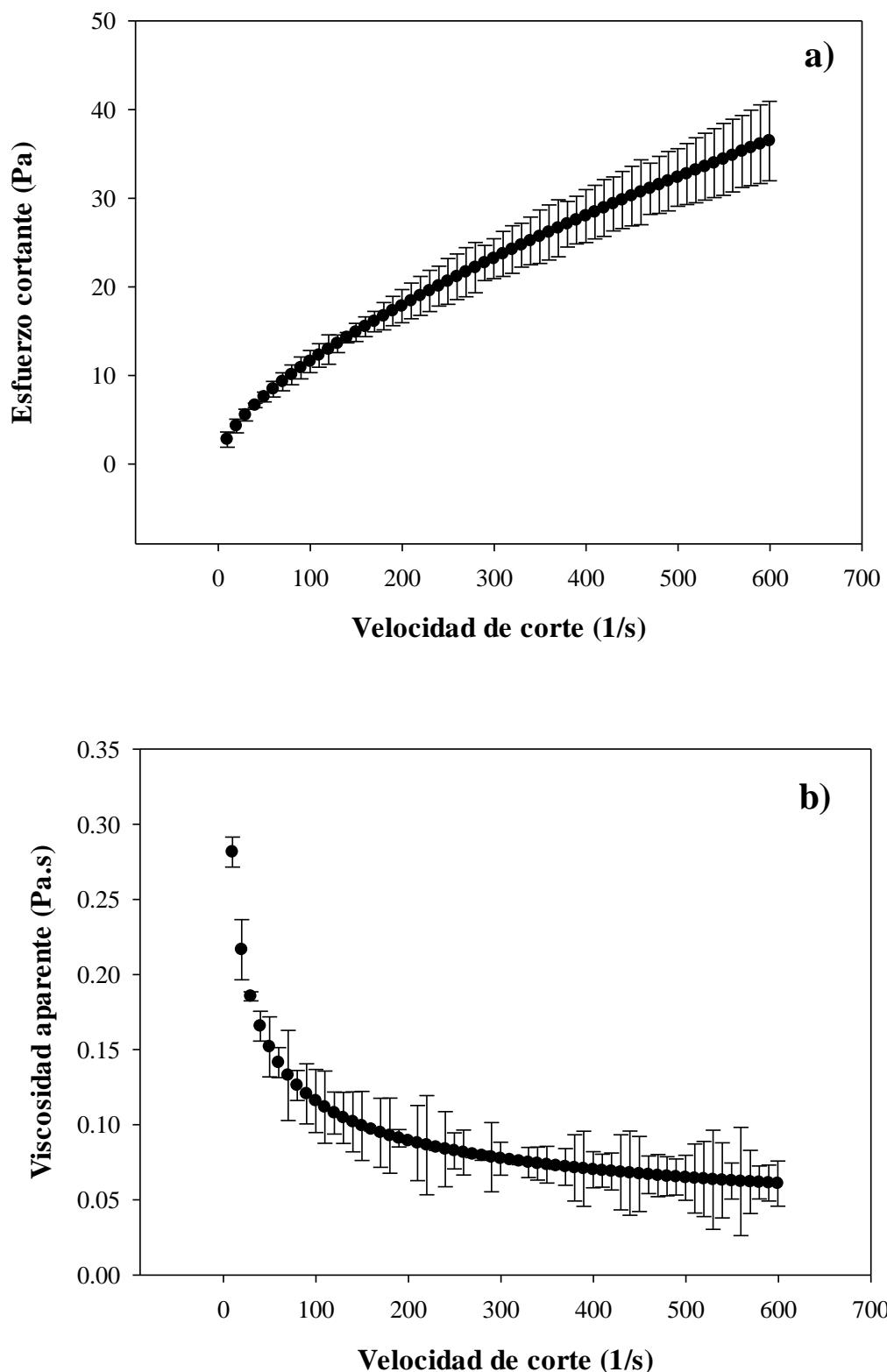


Figura 1. Curvas del comportamiento de flujo de las soluciones formadoras de película (SFP). a) Velocidad de corte vs esfuerzo cortante y b) Velocidad de corte vs viscosidad aparente. Valores promedio de al menos tres repeticiones ($n > 3$) \pm barras de error estándar.

3.2 Contenido de humedad, solubilidad e hinchamiento de las películas

En la Tabla 1 se pueden observar que las variables del contenido de humedad, solubilidad y poder de hinchamiento de las películas de maíz presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos; sin embargo, en las variables de solubilidad y poder de hinchamiento, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos T_{amb} y T_{7h} y entre T_{amb} y T_{3h} , respectivamente. Por lo que se considera que las películas secadas a 60 °C durante 3 h, incrementaron su contenido de humedad y solubilidad en agua a diferencia de las películas secadas a temperatura ambiente (T_{amb}). Algunos autores mencionan que la integración del glicerol como plastificante favorece la solubilidad debido a la interacción con el agua mediante la unión de enlaces de hidrógeno [26]. Además, el poder de hinchamiento se ve reflejado por la relación de los polímeros y grupos éster de acuerdo con lo mencionado por Basiak et al. [27].

Tabla 1. Evaluación del contenido de humedad, solubilidad y poder de hinchamiento de las películas secadas a temperatura ambiente (T_{amb}) y durante 3 h (T_{3h}) y 7 h (T_{7h}) a 60 °C*.

Película	Humedad (%)	Solubilidad (%)	Poder de hinchamiento (%)
T_{amb}	$13,24 \pm 0,79^b$	$16,79 \pm 0,31^b$	$260,12 \pm 51,68^b$
T_{3h}	$18,84 \pm 0,29^a$	$19,55 \pm 0,56^a$	$189,17 \pm 20,34^b$
T_{7h}	$11,11 \pm 0,82^c$	$16,87 \pm 0,61^b$	$371,98 \pm 11,80^a$

*Media aritmética de al menos tres determinaciones ($n \geq 3$) ± error estándar. Valores promedio con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

3.4 Evaluación de color

Los resultados obtenidos en las variables de color no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) con excepción de °hue en el tratamiento de T_{3h} . Se observó que en las películas secadas a temperatura ambiente (T_{amb}) como en las que se sometieron al tratamiento con aplicación de calor a 60 °C y el tiempo de secado, no se presentaron cambios en la opacidad o transparencia. De acuerdo algunos autores, el grosor influye en la opacidad de las películas, por lo que el grosor que se obtuvo en este trabajo fue el adecuado en la transparencia obtenida, proporcionando una adecuada transmisión de luz [27]. Además, el contenido de glicerol aplicado influye en la transparencia, debido a que en este estado tiene mayor capacidad de retener agua en su estructura lo cual facilita el paso de la luz [28].

Tabla 2. Evaluación de color en las películas*.

Película	L*	a	b	Croma	°hue
T _{amb}	96,96 ± 0,15 ^a	-0,09 ± 0,02 ^c	2,23 ± 0,12 ^b	2,19 ± 0,13 ^b	90,97 ± 0,58 ^b
T _{3h}	96,09 ± 0,29 ^a	-0,34 ± 0,02 ^a	2,67 ± 0,09 ^a	2,67 ± 0,10 ^a	97,07 ± 0,37 ^a
T _{7h}	96,28 ± 0,21 ^a	-0,23 ± 0,02 ^b	2,57 ± 0,11 ^a	2,59 ± 0,11 ^a	91,59 ± 2,82 ^b

*Media aritmética de al menos tres determinaciones ($n \geq 3$) ± error estándar. Valores promedio con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

3.5 Determinación de las propiedades mecánicas y grosor

Los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas presentan diferencias significativas ($p > 0,05$), siendo el tratamiento de T_{amb} el que presentó la mayor resistencia a la tensión máxima a la fractura (TF) y el % de elongación corresponde a T_{3h} y el módulo de elasticidad ME se presenta en el T_{7h}. Se observa que, el tipo de almidón tiene efecto significativo en la TF, el cual varía de acuerdo con la aplicación de la temperatura aplicada a las películas, lo que indica que a temperatura ambiente las películas tienden a ser menos quebradizas. El porcentaje de elongación fue más alto en el tratamiento a 60 °C durante 3 h, probablemente esto puede deberse al reordenamiento de las cadenas de almidón que causan el incremento en la flexibilidad, al ser tan poco el tiempo de secado la elongación sufrió este aumento. Sin embargo, el módulo de elasticidad fue mayor con la aplicación de la temperatura de 60 °C durante 7 h. Por lo que el plastificante utilizado a mayor temperatura y menor duración en horas el porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad aumentan. A mayor cantidad de plastificante utilizado para la obtención de todas las películas, la resistencia a la tensión disminuye mientras que el porcentaje de elongación aumenta.

Tabla 3. Determinación de las propiedades mecánicas y grosor de las películas.

Película	Propiedad mecánica			Grosor (mm)
	TF	%E	ME	
T _{amb}	12,22 ± 1,18 ^a	24,13 ± 2,78 ^b	446,96 ± 74,88 ^a	0,108 ± 0,001 ^a
T _{3h}	8,42 ± 1,33 ^b	50,34 ± 4,86 ^a	230,78 ± 45,05 ^b	0,106 ± 0,001 ^b
T _{7h}	11,28 ± 1,29 ^a	32,58 ± 5,39 ^b	597,58 ± 103,10 ^a	0,102 ± 0,004 ^{a,b}

*Media aritmética de al menos tres determinaciones ($n \geq 3$) ± error estándar. Valores promedio con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

3.6 Evaluación de la permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La determinación de la PVA es una de las principales propiedades de barrera que determinan la factible funcionalidad que pueden tener las películas como empaques degradables [29, 30]. En la Figura 2 se observa que la mayor permeabilidad al agua la obtuvo el tratamiento con la aplicación de la temperatura de 60 °C durante 7 h (películas T_{7h}); mientras que la menor permeabilidad se observó en los tratamientos con 3 h y temperatura ambiente es decir, en las películas T_{3h} y T_{amb}, respectivamente. El comportamiento observado podría relacionarse con los cambios estructurales que ocurren cuando se aplica determinada temperatura, la cual pudiera generar una matriz de mayor rigidez y por lo tanto, quebradiza o con poros y grietas que facilitan la permeabilidad del vapor de agua. Algunos autores como Zhang et al. [31] mencionan que en las películas elaboradas de polímeros, la PVA de un material de empaque depende de diversos factores, tales como la integridad de la matriz de la película, la relación entre las regiones cristalinas y amorfas, la movilidad de la cadena de polímero y la resistencia de las interacciones entre las cadenas de polímeros.

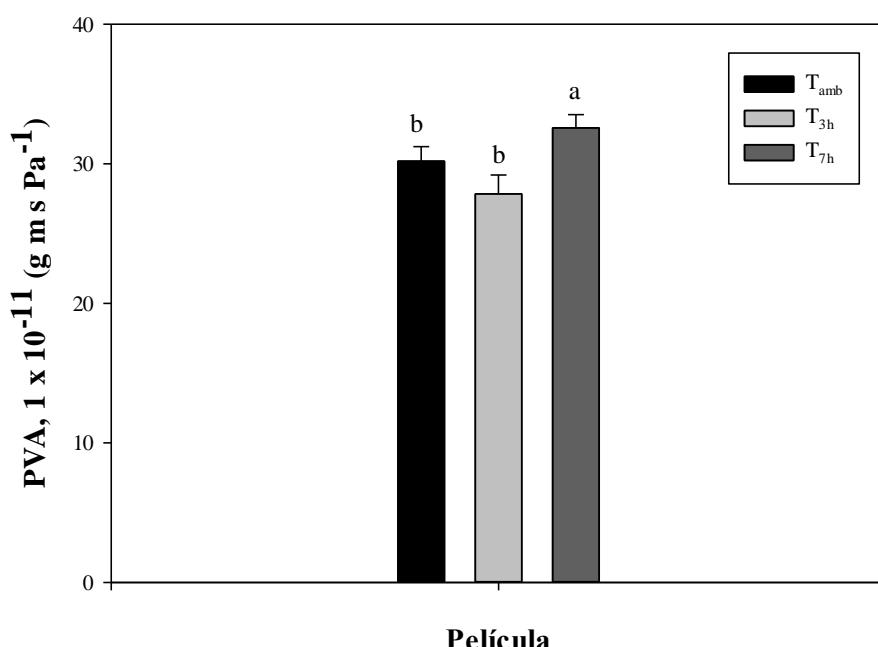


Figura 2. Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad al vapor de agua (PVA) de las películas. Valores promedio de al menos tres repeticiones ($n > 3$) \pm barras de error estándar. Promedios con letras iguales no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

4. CONCLUSIONES

Las películas elaboradas con almidón de maíz presentaron mayor porcentaje humedad y solubilidad con el efecto de secado a la temperatura de 60 °C por 3 h. Se observó que el tiempo de secado a la temperatura de 60 °C durante 3 h disminuyó la TF (de ≈ 12 a 8 MPa) y el ME (de ≈ 447 a 231 MPa); mientras esta disminución fue menor durante el secado de 60 °C por 7 h (TF = 12 a 11 MPa). En estas condiciones se observaron incrementos significativos en el %E (de 24 a 33%) y ME (de 447 a 598 MPa). Por lo que el tiempo y las temperaturas aplicadas tienen una influencia en el comportamiento de la elaboración de películas de almidón de maíz.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las asistencias técnicas del Ing. Arturo Ramos Martínez y de la M.C. Irma Graciela Flores Cortés. El presente estudio es un producto del Grupo de Investigación (GI) en Carbohidratos, Empaques y Alimentos Funcionales (CEAF) del CIAD-Cuauhtémoc, Chihuahua, México, liderado por el Dr. Paul Baruk Zamudio Flores.

6. REFERENCIAS

1. Kumar, A., Hasan, M., Mangaraj, S., Pravitha, M., Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2022). [Trends in edible packaging films and its prospective future in food: a review](#). *Applied Food Research*, 2(1), 100118.
2. Gamage, A., Liyanapathirana, A., Manamperi, A., Gunathilake, C., Mani, S., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). [Applications of starch biopolymers for a sustainable modern agriculture](#). *Sustainability*, 14(10), 6085.
3. Pedreiro, S., Figueirinha, A., Silva, A. S., & Ramos, F. (2021). [Bioactive edible films and coatings based in gums and starch: Phenolic enrichment and foods application](#). *Coatings*, 11(11), 1393.
4. Niranjana Prabhu, T., & Prashantha, K. (2018). [A review on present status and future challenges of starch based polymer films and their composites in food packaging applications](#). *Polymer Composites*, 39(7), 2499-2522.
5. Sadeghizadeh-Yazdi, J., Habibi, M., Kamali, A. A., & Banaei, M. (2019). [Application of edible and biodegradable starch-based films in food packaging: A systematic review and meta-analysis](#). *Current Research in Nutrition and Food Science*, 7(3), 624-637.

6. Versino, F., Lopez, O. V., Garcia, M. A., & Zaritzky, N. E. (2016). [Starch-based films and food coatings: An overview](#). *Starch-Stärke*, 68(11-12), 1026-1037.
7. Da Silva, D. C., Lopes, I. A., Da Silva, L. J. S., Lima, M. F., Barros Filho, A. K. D., Villa-Vélez, H. A., & Santana, A. A. (2019). [Physical properties of films based on pectin and babassu coconut mesocarp](#). *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 419-428.
8. Mironescu, M., Lazea-Stoyanova, A., Barbinta-Patrascu, M. E., Virchea, L. I., Rexhepi, D., Mathe, E., & Georgescu, C. (2021). [Green design of novel starch-based packaging materials sustaining human and environmental health](#). *Polymers*, 13(8), 1190.
9. Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., & Vuong, Q. V. (2019). [Starch-based films: Major factors affecting their properties](#). *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1079-1089.
10. Zamudio-Flores, P. B., García-Amezquita, L. E., Ramos-Martínez, A., Gallegos, J. M. T., Bello-Pérez, L. A., & Salgado-Delgado, R. (2013). [Soluciones formadoras de película a base de almidón oxidado de avena mezcladas con quitosano: caracterización reológica y propiedades mecánicas de sus películas](#). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(6), 293-304.
11. Li, L., Chen, H., Wang, M., Lv, X., Zhao, Y., & Xia, L. (2018). [Development and characterization of irradiated-corn-starch films](#). *Carbohydrate Polymers*, 194, 395-400.
12. Šárka, E., & Dvořáček, V. (2017). [New processing and applications of waxy starch \(a review\)](#). *Journal of Food Engineering*, 206, 77-87.
13. Wang, B., Yu, B., Yuan, C., Guo, L., Liu, P., Gao, W., Cui, B. & Abd El-Aty, A. M. (2022). [An overview on plasticized biodegradable corn starch-based films: The physicochemical properties and gelatinization process](#). *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2569-2579.
14. Jonhed, A., Andersson, C., & Järnström, L. (2008). [Effects of film forming and hydrophobic properties of starches on surface sized packaging paper](#). *Packaging Technology and Science*, 21(3), 123-135.
15. Mallick, N., Pal, D., Soni, A. B., & Shankar, R. (2021). [Effect of drying temperature and addition of plasticizer & cross-linker on the properties and stability of corn starch/polyvinyl alcohol/rice husk based bio-composite films](#). *Materials Today: Proceedings*, 44, 3106-3109.
16. Reis, R. C., Côrrea, P. C., Devilla, I. A., Santos, E. S., Ascheri, D. P., Servulo, A. C. O., & Medeiros e Souza, A. B. (2013). [Drying of yam starch \(*Discorea* ssp.\) and glycerol](#).

- [filmogenic solutions at different temperatures](#). *LWT-Food Science and Technology*, 50(2), 651-656.
17. Zamudio-Flores, P. B., Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J. D. J., Tirado-Gallegos, J. M., Bello-Pérez, L. A., Rubio-Ríos, A., & Cárdenas-Feliz, R. G. (2015). [Caracterización fisicoquímica, mecánica y estructural de películas de almidones oxidados de avena y plátano adicionadas con betalaínas](#). *Agrociencia*, 49(5), 483-498.
18. Homez-Jara, A., Daza, L. D., Aguirre, D. M., Muñoz, J. A., Solanilla, J. F., & Váquiro, H. A. (2018). [Characterization of chitosan edible films obtained with various polymer concentrations and drying temperatures](#). *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 1233-1240.
19. Abedinia, A., Nafchi, A. M., Sharifi, M., Ghalambor, P., Oladzadabbasabadi, N., Ariffin, F., & Huda, N. (2020). [Poultry gelatin: Characteristics, developments, challenges, and future outlooks as a sustainable alternative for mammalian gelatin](#). *Trends in Food Science & Technology*, 104, 14-26.
20. ASTM E 96-80. Standard test methods for water vapor transmission of materials in sheet form. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 1989.
21. Guerra-DellaValle, D., Sánchez-Rivera, M. M., Zamudio-Flores, P. B., Méndez-Montalvo, G., & Bello-Pérez, L. A. (2009). [Effect of chemical modification type on physicochemical and rheological characteristics of banana starch](#). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(2), 197-203.
22. Ji, N., Qiu, C., Xu, Y., Xiong, L., & Sun, Q. (2017). [Differences in rheological behavior between normal and waxy corn starches modified by dry heating with hydrocolloids](#). *Starch-Stärke*, 69(9-10), 1600332.
23. Su, J., Chotineeranat, S., Laoka, B., Chatakanonda, P., Vanichsriratana, W., Sriroth, K., & Piyachomkwan, K. (2018). [Effect of dry heat treatment with xanthan gum on physicochemical properties of different amylose rice starches](#). *Starch-Stärke*, 70(3-4), 1700142.
24. Cuq, B., Aymard, C., CUQ, J. L., & Guilbert, S. (1995). [Edible packaging films based on fish myofibrillar proteins: formulation and functional properties](#). *Journal of Food Science*, 60(6), 1369-1374.
25. Hernandez-Perez, P., Flores-Silva, P. C., Velazquez, G., Morales-Sanchez, E., Rodríguez-Fernández, O., Hernández-Hernández, E., Mendez-Montalvo, G. & Sifuentes-Nieves, I. (2021). [Rheological performance of film-forming solutions made from plasma-modified starches with different amylose/amyllopectin content](#). *Carbohydrate Polymers*, 255, 117349.
26. Isotton, F. S., Bernardo, G. L., Baldasso, C., Rosa, L. M., & Zeni, M. J. I. C. (2015). [The plasticizer effect on preparation and properties of etherified corn starchs films](#). *Industrial Crops and Products*, 76, 717-724.
27. 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.
28. Pardo Cuervo, O. H., & Velasco Mosquera, R. (2012). [Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha](#). *Revista ION*, 25(SPE), 23-29.
29. Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2006). [Effects of controlled storage on thermal, mechanical and barrier properties of plasticized films from different starch sources](#). *Journal of Food Engineering*, 75(4), 453-460.
30. Wan, S., Liu, Q., Yang, D., Guo, P., Gao, Y., Mo, R., & Zhang, Y. (2023). [Characterization of high amylose corn starch-cinnamaldehyde inclusion films for food packaging](#). *Food Chemistry*, 403, 134219.

31. Zhang, J., Zou, F., Tao, H., Gao, W., Guo, L., Cui, B., Yuan, C., Liu, P., Lu, L., Wu, Z. & Fang, Y. (2023). Effects of different sources of cellulose on mechanical and barrier properties of thermoplastic sweet potato starch films. *Industrial Crops and Products*, 194, 116358.