

Estimación de la entalpía de gelatinización en una mezcla de almidón termoplástico

Avellán Rengifo Adriana Cecilia¹ , Yuly Sandibel Zamora Bazurto¹ , Mendoza Palma Angie Nicole¹ , Zambrano Pinto María Verónica¹ , Zambrano Bazurto Cesar Damián¹ , Ricardo José Baquerizo-Crespo^{2,3} , María Antonieta Riera² 

¹Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Carrera de Ingeniería Química, Universidad Técnica de Manabí.

²Departamento de Procesos Químicos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí.

³Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae), Cuba

{aavellan4301, yzamora9217, amendoza1027, mzambrano6704, czambrano4372, ricardo.baquerizo, maria.riera}@utm.edu.ec

DOI: 10.33412/pri.v12.1.2864



Resumen:

Los materiales termoplásticos son productos biobasados, elaborados en la mayoría de los casos con almidón proveniente de tubérculos. La pérdida de la estructura del almidón, afecta la durabilidad del material y es una variable que puede evaluarse con la entalpía de gelatinización del proceso. En este trabajo como parte de una experiencia académica, se estimó analíticamente la entalpía de gelatinización de una mezcla termoplástica, haciendo uso de ecuaciones preestablecidas para determinar las pérdidas de calor durante el proceso, así como las entalpías del sistema. Se estableció un diseño factorial de nivel mezclado con tres factores y dos o tres niveles: temperaturas de secado (55, 65)°C, tres masas de almidón (9,3; 10 y 10,7) g y tres tiempos de secado diferentes para cada temperatura (5400, 6600 y 9000) segundos para 55°C y (4500, 5700 y 7500) para 65°C. Se obtuvo una entalpía de gelatinización de 911,57 kJ/kg y 782,43 kJ/kg para 55°C con 9000 segundos de secado y 65°C con 7500 segundos de secado respectivamente. Estadísticamente se comprobó que tanto la temperatura como el tiempo de secado, influyen en el valor que toma la entalpía de gelatinización.

Palabras claves: Almidón, bioplástico, gelatinización, termoplástico.

Title: Estimation of the gelatinization enthalpy in a thermoplastic starch mixture.

Abstract:

Thermoplastic materials are biobased products, made in most cases with starch from tubers. The loss of the starch structure affects the durability of the material and is a variable that can be evaluated with the enthalpy of gelatinization of the process. In this

work, as part of an academic experience, the enthalpy of gelatinization of a thermoplastic mixture was analytically estimated, making use of pre-established equations to determine the heat losses during the process, as well as the enthalpies of the system. A mixed-level factorial design was established with three factors and two or three levels: drying temperatures (55, 65)°C, three starch masses (9.3; 10 and 10.7) g and three different drying times for each temperature (5400, 6600 and 9000) seconds for 55°C and (4500, 5700 and 7500) for 65°C. A gelatinization enthalpy of 911.57 kJ/kg and 782.43 kJ/kg was obtained for 55°C with 9000 seconds of drying and 65°C with 7500 seconds of drying, respectively. Statistically, it was found that both the temperature and the drying time influence the value taken by the enthalpy of gelatinization.

Key words: Starch, bioplastic, gelatinization, thermoplastic.

Tipo de artículo: Investigación.

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2020.

Fecha de aceptación: 5 de enero de 2021.

1. Introducción

El almidón después de la celulosa, es el polisacárido más abundante en la naturaleza. Es una fuente importante de alimentos para la dieta humana y se encuentra en forma de gránulos en semillas y tubérculos. Está compuesto principalmente por dos poliglucanos: la amilosa y la amilopectina, los cuales contribuyen con las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón [1], [2]. Tiene diversas aplicaciones en la industria alimentaria, particularmente como agente espesante [3], pero también halla lugar en la fabricación de papel, cartón, textil, farmacéutica y adhesivos [4].

Los cultivos de raíces y tubérculos como la yuca, papa y batata, son ricos en almidón [5], aunque también está presente en algunas frutas como la banana y en semillas de cereales como el maíz, arroz, trigo y quinua [6]. Entre los cereales, el maíz es la principal fuente utilizada para el aislamiento del almidón, el cual se logra mediante molienda húmeda o seca, además de las operaciones de sedimentación, filtración y centrifugación [3].

El almidón es un material abundante y biodegradable con interesantes características fisicoquímicas susceptibles de ser explotadas [7]. Esto aunado al interés creciente en reemplazar los plásticos a base de petróleo por materiales biodegradables, ha alentado el desarrollo de productos a partir de fuentes renovables, incluido el uso de mezclas de almidón con plastificante, para obtener un material termoplástico deformable llamado almidón termoplástico (TPS) [8]. Entre los plastificantes más usados destacan el glicerol y el sorbitol, y su adición ayuda a superar la naturaleza frágil del material elaborado [9].

El TPS se considera un biomaterial fácilmente biodegradable y económico, basado en un recurso abundante y renovable, pero con baja temperatura de procesamiento en comparación con otros biopolímeros [10]. Aunque el TPS puede procesarse utilizando técnicas tradicionales de procesamiento de plástico, como lo es el moldeo por inyección y extrusión, tiene entre sus desventajas bajas temperaturas de degradación que dificultan su

procesamiento, malas propiedades mecánicas y alta solubilidad en agua [11], [12]. La fuente de extracción del almidón, la relación amilosa/amilopectina, el tipo de plastificante usado, la adición de material de relleno en la mezcla termoplástica, método de procesamiento, son aspectos que influyen en las propiedades del TPS [13], [14].

El procesamiento del almidón a temperaturas elevadas produce la gelatinización, lo que conduce a cambios relacionados con el ablandamiento en las características de textura del material [15]. La gelatinización ocurre cuando los gránulos de almidón hidratados en agua fría, se someten a calentamiento produciendo un hinchamiento mayor y consecuente rompimiento del gránulo, ocasionando la salida de la amilosa y la amilopectina fuera del grano y la formación de una suspensión viscosa. La temperatura a la cual el grano pierde su estructura se llama temperatura de gelatinización y aunque se produce en un intervalo aproximado de 10°C, varía para cada cereal [16]. Los procesos de molienda en la extracción del almidón [17], el método de secado [18], así como la dosificación del almidón en la mezcla termoplástica [19], afectan la temperatura de gelatinización.

Una propiedad térmica relacionada es la entalpía de gelatinización (ΔH), definida como la energía requerida por los granos del almidón para realizar el proceso de gelatinización [20]. La operación de secado incide en la entalpía de gelatinización, puesto que esta variable disminuye a medida que la cantidad de agua en el material aumenta [21]. Por el contrario, aumenta cuando se incrementan los contenidos de amilopectina y agua en el almidón [22].

Un mayor contenido de estructuras cristalinas en el almidón, exige una mayor cantidad de energía para gelatinizar sus gránulos. Valores más altos para la temperatura y la entalpía de gelatinización, significa que se requiere más tiempo de procesamiento o temperaturas de operación más alta, lo cual incide en los costos energéticos del proceso [23]. El conocimiento sobre la gelatinización del almidón y sus variables relacionadas, es útil para el diseño de secadores que intervengan en procesos industriales derivados de éste, para su optimización [21], o para el establecimiento de condiciones operacionales.

Cajiao et al. [23], midieron el efecto que tiene la gelatinización de harina de yuca sobre las propiedades de una matriz polimérica obtenida a partir de esta. Calcularon el grado de gelatinización comparando la entalpía de gelatinización de la muestra, respecto a la entalpía de una muestra de harina sin gelatinizar. Los resultados indicaron que la entalpía de gelatinización es menor para la muestra de harina gelatinizada, representando así la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de gelatinización. En una investigación similar Pineda et al. [21], usaron calorimetría diferencial de barrido (DSC), para estudiar el proceso de transición de gelatinización del almidón de maíz. El análisis indicó que la cantidad de agua influye sobre la transición de entalpía y se corroboró que la transición del almidón depende de factores extrínsecos durante el proceso. Por su parte Coral et al. [24], al analizar la temperatura de gelatinización de almidones presentes en harinas de maíz, determinaron que la entalpía de gelatinización se relaciona con el almidón gelatinizado presente y

que esta disminuye con el aumento de la humedad y del tamaño del gránulo.

Bajo este contexto, se desarrolló este trabajo en el cual se emplea una metodología analítica para estimar la entalpía de gelatinización de una mezcla de almidón termoplástico. El uso de principios termodinámicas y ecuaciones preestablecidas, servirá de referencia para el aprovechamiento adecuado de los recursos y el establecimiento de las condiciones operacionales en la industrialización del TPS.

2. Materiales y métodos

A continuación, se describe el procedimiento experimental que se llevó a cabo para elaborar el material termoplástico, evaluar las pérdidas de calor y finalmente determinar la entalpía del sistema.

2.1 Elaboración del material termoplástico

Se elaboró una mezcla de almidón termoplástico (TPS), siguiendo lo descrito por García [25], con modificaciones en la cantidad de masa de almidón de maíz y temperatura de secado. La misma consistió en mezclar sobre una placa de calentamiento HACEB-K-074118336 y con agitación constante, 60 mL de agua destilada con la masa de almidón correspondiente hasta su homogenización, cuidando que la temperatura no sobrepasara los 70°C. Manteniendo la agitación, se añadieron 5 mL de glicerina, 3 mL de ácido acético (CH_3COOH) al 3% (v/v) hasta que gelatinizó. La mezcla se extendió sobre una placa de vidrio de 9 x 15 cm (figura 1) y se secó en una estufa Memmert-SN 55 a la temperatura de secado establecida, para finalmente obtener el TPS (figura 2).



Figura 1. Elaboración del material termoplástico.



Figura 2. TPS obtenido.

Para la elaboración del TPS se estableció un diseño factorial de nivel mezclado 3 x 2 (tabla 1), con dos factores: masa de almidón de maíz (MA) y temperatura de secado (TS), tres niveles para MA (9,3; 10; 10,7) g y dos niveles para TS (55, 65) °C.

Tabla 1. Diseño factorial para la mezcla de TPS

TS (°C)	MA (g)
55	9,3
55	10
55	10,7
65	9,3
65	10
65	10,7

Se establecieron tiempos de secado (ts) para el TPS en función de la cantidad de MA presente en la mezcla y la TS (tabla 2). Con un termómetro digital se registró la temperatura de la mezcla antes del secado, para usarla posteriormente en el cálculo de la entalpía de gelatinización. En total fueron 6 unidades experimentales, cada una de las cuales se evaluó por duplicado.

Tabla 2. Tiempo de secado para cada mezcla de TPS

TS (°C)	MA (g)	ts (s)	Ti (°C)
55	9,3	5400	37,4
	9,3	5400	36,9
	10	6600	35,9
	10	6600	36,2
	10,7	9000	37,4
	10,7	9000	35,3
65	9,3	4500	38,7
	9,3	4500	36,4
	10	5700	36,5
	10	5700	35,0
	10,7	7500	37,0
	10,7	7500	37,2

Durante la elaboración se registraron variables relacionadas con el proceso y para el TPS obtenido, se determinó el espesor

del material a fin de evaluar su relación con la cantidad de almidón usada en la mezcla. Para registrar el espesor, se hicieron mediciones en diferentes puntos de material termoplástico con ayuda de un vernier.

2.2 Evaluación de pérdidas de calor

Para determinar las pérdidas de calor, se colocó dentro de la estufa Memmert-SN 55 (usada en la elaboración de la mezcla termoplástica), un vaso de precipitado con 200 mL de agua a una temperatura de 28,2°C durante el tiempo de secado. El voltaje de la estufa es de 115 V y la corriente de 14,4 ampere. Considerando que el secado del almidón termoplástico se realizó en una estufa eléctrica, se empleó la ecuación sugerida por Atkins [26] para determinar el calor cedido (Qced) para equipos eléctricos (1):

$$Q_{ced} = Ivt \quad (1)$$

Donde I es corriente (A), v es voltaje (V) y t es el tiempo (s). El calor absorbido (Qabs) se calculó con la ecuación propuesta por Felder [27] para sistemas abiertos en estado estacionario (2).

$$Q_{abs} = mCpdT \quad (2)$$

En la cual m representa la masa (g), Cp la capacidad calorífica a presión constante (kJ/mol.°C) y dT la variación de la temperatura (°C). Los datos obtenidos para el calor cedido y absorbido, se determinaron las pérdidas (p) que se dieron en la estufa (3).

$$Q_{abs} = - Q_{ced} (1 - p) \quad (3)$$

2.3 Determinación de la entalpía del sistema

La entalpía (4) se calculó utilizando lo señalado por [28]:

$$\Delta H = Q = \sum m_i \Delta h_i \quad (4)$$

En la cual mi es masa del componente i (g) y Δhi es la variación de entalpía específica del componente i (kJ/g). Esta expresión considera la sumatoria de las entalpías para el calentamiento del agua presente en la mezcla termoplástica (ΔH_{H2O,i}), el agua evaporada durante el secado del TPS (ΔH_{H2O,v}), la gelatinización del almidón (ΔH_{gel}) y el secado del almidón termoplástico (ΔH_{TPS}). La masa del agua de calentamiento fue la masa usada en la elaboración de la mezcla termoplástica, la masa de agua evaporada corresponde a la cantidad que se evaporó durante el secado del TPS, determinada a partir del agua colocada en la estufa al calcular las pérdidas de calor y por último la masa del secado, fue la masa final registrada por gravimetría para la mezcla termoplástica. Las entalpías ΔH_{H2O,i}, ΔH_{H2O,v} y ΔH_{TPS}, se determinaron por integración (5) de acuerdo a [27].

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} Cp dT \quad (5)$$

Cp es la capacidad calorífica a presión constante (kJ/mol.°C), dT es la variación de temperatura, Tf y Ti son los límites de integración, para la temperatura final e inicial respectivamente. La

temperatura final fue la establecida para el secado y la inicial fue la medida antes de este. El Cp del agua se tomó de valores tabulados en tablas de propiedades termodinámicas, mientras que para el TPS por tratarse de una mezcla se calculó con (6), según lo descrito por Felder y Rousseau [27].

$$C_{pmezcla} = \sum y_i \cdot C_{pi} \quad (6)$$

yi es la fracción molar del compuesto presente en la mezcla termoplástica, los cuales fueron almidón, glicerina y CH₃COOH. Para el Cp del almidón se trabajó con 8,516 x10⁻⁶ kJ/g°C de acuerdo a lo reportado por [29]. Tanto el Cp de la glicerina como el del CH₃COOH, se determinaron con la regla de Kopp (7) descrita por [27], donde X e Y son los constituyentes glicerina y CH₃COOH respectivamente.

$$C_{pX_2Y} = 2(C_{pa})_X + (C_{pa})_Y \quad (7)$$

2.4 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos con la experimentación, se analizaron estadísticamente con el software R Studio versión 3.5.1.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se dividieron en dos partes, para expresar por una parte los aspectos evaluados en el material termoplástico y, por otro lado, lo correspondiente a las pérdidas de calor y entalpía del sistema.

3.1 Material termoplástico

Las variables relacionadas con el proceso de elaboración del TPS elaborado (tablas 3 y 4) fueron temperatura de secado (TS), tiempo de secado (tS), masa de almidón (MA), masa de agua presente (m_{H2O}), masa total de la mezcla (Mo), masa final (Mf) y espesor (E) del material termoplástico después del secado.

Tabla 3. Variables registradas para la mezcla (T = 55°C)

Temperatura = 55 °C			
tS (s)	5400	6600	9000
MA (g)	9,3	10	10,7
m _{H2O} (g)	31,83± 0,26	32,82± 0,66	36,54± 0,49
Mo (g)	42,98± 0,13	46,44± 0,16	51,27± 1
Mf (g)	11,16± 0,13	13,63± 0,5	14,73± 0,5
E (mm)	1± 0,14	1,69± 0,13	2,8± 0,14

Tabla 4. Variables registradas para la mezcla (T = 65°C)

Temperatura = 55 °C			
tS (s)	4500	5700	7500
MA (g)	9,3	10	10,7
m _{H2O} (g)	32,28± 0,18	34,66± 0,22	34,86± 0,22
Mo (g)	42,7± 0,24	46,8± 0,38	48,92± 0,56
Mf (g)	10,43± 0,42	12,15± 0,16	14,06± 0,34
E (mm)	1,2± 0,14	1,68± 0,04	2,66± 0,2

Se evidenció la formación de una mezcla gelatinosa a medida que aumentó la temperatura del almidón, hasta la formación del TPS por el descenso de la temperatura. Esto sucede debido a que, durante el calentamiento de agua con almidón, sus gránulos se hinchan y estallan, haciendo que la estructura semicristalina se pierda y las moléculas de amilosa más pequeñas comiencen a lixiviar fuera del gránulo, formando una red que contiene agua y aumentan la viscosidad de la mezcla, es decir se gelatiniza. En contraparte durante el enfriamiento o almacenamiento prolongado de la pasta, la estructura semicristalina se recupera parcialmente y el almidón se espesa producto de la retrogradación [30]. En la elaboración de bioplásticos, la gelatinización del almidón favorece el comportamiento mecánico del material, brindando mayor resistencia al esfuerzo de rotura en tensión [31].

En cuanto a la coloración, el TPS obtenido fue transparente para las de menor masa y ligeramente blancas en las demás. La coloración blanca indica que la estructura de las mezclas aún es semicristalina [32]. Se evaluó el efecto que tiene la cantidad de almidón utilizado en la mezcla termoplástica sobre el espesor del material (figura 3), encontrando un p valor de 0,00000015 < α. Los resultados demuestran que la masa del almidón influye en el espesor del TPS, pues a mayor masa del almidón mayor será su espesor, tal como lo indican en una investigación donde se obtuvo bioplástico de almidón de papa [33].

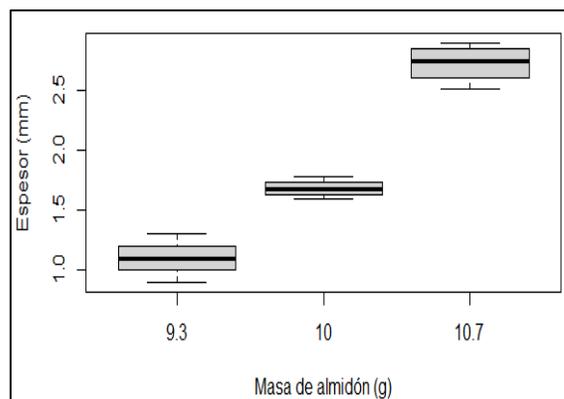


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes para la masa del almidón y el espesor del TPS.

3.2 Pérdidas de calor y entalpía de sistema

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para las pérdidas de calor y entalpía de gelatinización registradas en el proceso de elaboración del TPS.

Tabla 5. Pérdidas de calor del sistema

TS (°C)	tS (s)	Q _{ced} por estufa (kJ)	Q _{abs} (kJ)	ΔH _{reac} (kJ/kg)
55	5400	-8942,4	8942,4	685,45± 7,31
55	6600	-10929,6	10929,6	704,44± 24,01
55	9000	-14904	14904	911,57± 32,44
65	4500	-7452	7452	589,02± 22,92
65	5700	-9439,2	9439,2	660,86± 9,57
65	7500	-12420	12420	782,43± 19,53

El calor cedido es mayor a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de secado, lo cual es razonable puesto que la cantidad de calor transferida debe ser proporcional a la temperatura de operación [34]. La entalpía de gelatinización tomó valores entre 589,02 y 911,57 kJ/kg. Estos resultados son similares a los indicado por Niño *et al.* [35], quienes reportaron entalpías de gelatinización entre 615,2 y 688,7 kJ/kg, al realizar bioplástico de almidón residual esterificado de papa. Valores diferentes encontraron Wisansakkul *et al.* [36], los cuales estuvieron entre 166,45 y 256,95 kJ/kg al desarrollar un bioplástico a partir de almidón de semilla de jaca.

Para identificar posibles diferencias significativas en los resultados obtenidos, se hicieron diagramas de cajas y bigotes para la entalpía en relación a la temperatura y tiempo de secado respectivamente (figuras 4 y 5).

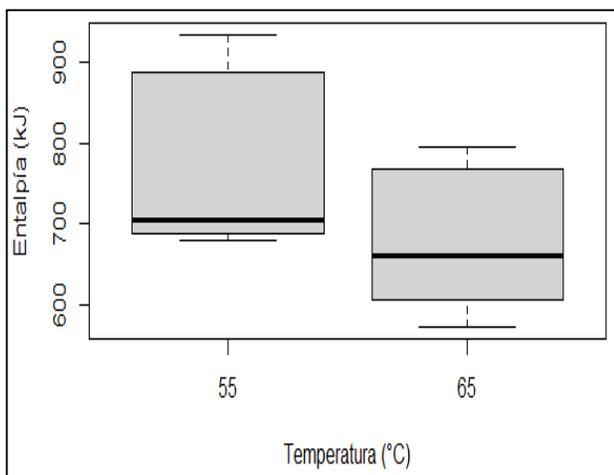


Figura 4. Diagrama de cajas y bigotes para la entalpía de gelatinización en relación a la temperatura de secado.

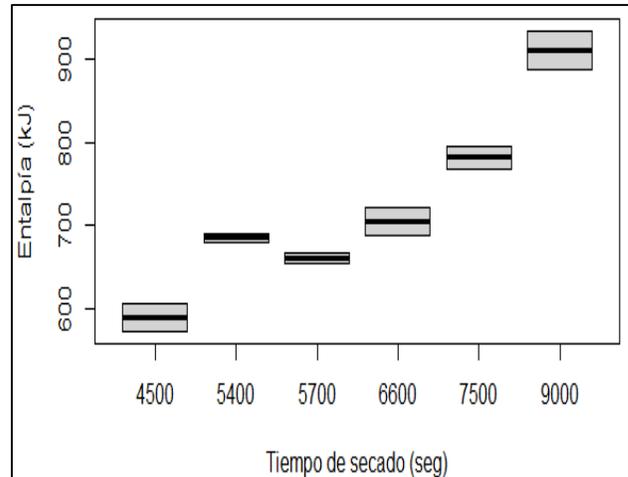


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes para la entalpía de gelatinización en relación al tiempo de secado.

A partir de la representación gráfica se infiere que existe una diferencia en la entalpía alcanzada en función de las dos variables analizadas. Para comprobar este supuesto, se realizó un ANOVA multifactorial cuyos resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ANOVA multifactorial

	Dif	Sum²	Media²	Valor de F	Pr (>F)
TS	1	24147	24147	28.3744	0.0007053 ***
ts	1	97027	97027	114.0124	192e-06 ***
TS:ts	1	11	11	0.0135	0.9103374
Residuales	8	6808	851		

Tanto para la temperatura como para el tiempo de secado, se obtuvo un p-valor < 0,05 lo cual demuestra que ambas variables son influyentes en el valor que toma la entalpía de gelatinización. Sin embargo, no existe interacción entre estas dos variables. La entalpía aumenta a medida que se incrementa la temperatura y el tiempo de secado. El cambio de entalpía es la energía que el sistema intercambia con su entorno, entonces a una mayor temperatura, dicho intercambio con la mezcla termoplástica será menor, entonces menor será el calor que se necesite para que se forme el TPS.

Esta particularidad puede explicarse al estar en presencia de un carbohidrato hidratado que expande en gran medida su estructura en la mezcla. El incremento en la entalpía de gelatinización, indica un incremento en la pérdida de la estructura del almidón. En el caso del almidón de la papa, se necesitan

aproximadamente 650 kJ/kg, en contraste, la desestructuración del almidón de trigo sólo requiere aproximadamente 435 kJ/kg y el almidón del maíz sólo requiere de 380 kJ/kg [37]. La entalpía es un indicador de la pérdida del orden molecular del gránulo de almidón no gelatinizado, lo cual afecta la estabilidad del bioplástico formado. Mientras mayor es la entalpía de gelatinización, mayor es la capacidad de hinchamiento del almidón, el tiempo de transición aumenta y se alcanzan temperaturas de gelatinización y descomposición más altas [35].

4. Conclusión

El material termoplástico obtenido presentó una apariencia semicristalina, cuyo espesor varió en función de la cantidad de masa de almidón utilizada. Aunque existen equipos para determinar la entalpía de gelatinización como es el caso del calorímetro diferencial de barrido (DSC), el método descrito puede ser una alternativa para usar desde el punto de vista académico para calcular analíticamente el valor de la entalpía de gelatinización. Experimentalmente se determinó que la entalpía está influenciada por la temperatura de trabajo y el tiempo de secado, tal como se demostró con el ANOVA al realizar el análisis estadístico. Valores más altos de entalpía, se obtienen con temperaturas de trabajo más bajas y mayores tiempos de secado, indicando así que se requiere mayor energía para alcanzar la gelatinización de la mezcla y por ende costos más altos en el proceso, siendo así un parámetro de importancia a controlar desde el punto de vista industrial. Para futuros trabajos, se sugiere estudiar las propiedades físicas y mecánicas del material termoplástico obtenido bajo cada una de las condiciones establecidas, a fin de evaluar su posibilidad de competir con sus parientes sintéticos.

Referencias

- [1] E. Bertoft, "Understanding starch structure: Recent progress," *Agronomy*, vol. 7, no. 3, pp. 56, 2017. <http://doi:10.3390/agronomy7030056>
- [2] J. Bao, Rice starch, in *Rice: Chemistry and Technology*. 4th ed., J. Bao, Ed. Hangzhou, China: Elsevier, 2019, pp. 55–108.
- [3] E. Agama-Acevedo, P. C. Flores-Silva, and L. A. Bello-Perez, Cereal starch production for food applications, in *Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties*. M.A. Pedrosa-Silva Clerici and M. Schmiele, Ed., Brazil: Elsevier, 2018, pp. 71–102.
- [4] M. Y. Olivo, "Fermentado De Yuca Como Una Nueva Alternativa En La Industria Alimenticia Cassava Fermented Starch Flour Producer Plant Design As a New," *J. Bolív. Ciencias*, vol. 11, no. 35, pp. 25–40, 2016.
- [5] S. N. Moorthy, M. S. Sajeev, and R. J. Anish, Functionality of Tuber Starches, in *Starch in Food*. 2th ed, M. Sjöo and L. Nilsson, Ed., Duxfor, United Kingdom: Elsevier, 2018, pp. 421–508.
- [6] J. Montoya, V. D. Quintero, and J. C. Lucas, "Evaluación fisicotérmica y reológica de harina y almidón de plátano dominico hartón (musa paradisiaca abb)," *Temas Agrar.*, vol. 19, no. 2, pp. 214–233, 2014. <http://doi:10.21897/rta.v19i2.736>
- [7] Y. Zhang, C. Rempel, and Q. Liu, "Thermoplastic Starch Processing and Characteristics-A Review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 54, no. 10, pp. 1353–1370, 2014. <http://doi:10.1080/10408398.2011.636156>
- [8] B. Khan, M. Bilal Khan Niazi, G. Samin, and Z. Jahan, "Thermoplastic Starch: A Possible Biodegradable Food Packaging Material—A Review," *J. Food Process Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. e12447, 2017. <http://doi:10.1111/jfpe.12447>
- [9] M. L. Sanyang, S. M. Sapuan, M. Jawaid, M. R. Ishak, and J. Sahari, "Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (arenga pinnata) starch for food packaging," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 53, pp. 326–336, 2016. <http://doi:10.1007/s13197-015-2009-7>
- [10] R. Nunziato, S. Hedge, E. Dell, T. Trabold, C. Lewis, and C. Diaz, "Mechanical properties and anaerobic biodegradation of thermoplastic starch/polycaprolactone blends," in *21st IAPRI World Conference on Packaging*, 2019. <http://doi:10.12783/iapri2018/24452>
- [11] M. Kaseem, K. Hamad, and F. Deri, "Thermoplastic starch blends: A review of recent works," *Polym. Sci. - Ser. A*, vol. 54, pp. 165–176, 2012. <http://doi:10.1134/S0965545X1202006X>
- [12] H. Peidayesh, Z. Ahmadi, H. A. Khonakdar, M. Abdouss, and I. Chodák, "Fabrication and properties of thermoplastic starch/montmorillonite composite using dialdehyde starch as a crosslinker," *Polym. Int.*, vol. 69, no. 3, pp. 317–327, 2020. <http://doi:10.1002/pi.5955>
- [13] B. Montero, M. Rico, S. Rodríguez-Llamazares, L. Barral, and R. Bouza, "Effect of nanocellulose as a filler on biodegradable thermoplastic starch films from tuber, cereal and legume," *Carbohydr. Polym.*, vol. 157, pp. 1094–1104, 2017. <http://doi:10.1016/j.carbpol.2016.10.073>
- [14] G. Nashed, R. P. G. Rutgers, and P. A. Sopade, "The Plasticisation Effect of Glycerol and Water on the Gelatinisation of Wheat Starch," *Starch - Stärke*, vol. 55, no. 34, pp. 131–137, 2003. <http://doi:10.1002/star.200390027>
- [15] A. Sinha and A. Bhargav, "Modelling approaches to capture role of gelatinization in texture changes during thermal processing of food Modelling approaches to capture role of gelatinization in texture changes during thermal processing of food," *Cornell University, Ithaca, NY*, arXiv:1808.01835. 1–20, 2018.
- [16] Á. Gil, *Tratado de nutrición. Tomo IV. Nutrición humana en el estado de salud*. Colombia: Editorial médica Panamericana, 2017.
- [17] G. M. Olguin-Arteaga, M. Amador-Hernández, A. Quintanar-Guzmán, F. Díaz-Sánchez, I. Sánchez-Ortega, A. Castañeda-Ovando, R. Avila-Pozos and E.M. Santos-López, "Correlación de entalpiás de gelatinización con los índices de absorcion de agua y de sólidos solubles en agua de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado," *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 14, no. 2, pp. 303–310, 2015.
- [18] Y. Zhao, Y. Jiang, B. Zheng, W. Zhuang, Y. Zheng, and Y. Tian, "Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds," *Food Chem.*, vol. 228, pp. 167–176, 2017. <http://doi:10.1016/j.foodchem.2017.01.141>
- [19] J. B. Amaya-Pinos, "Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico," *Rev. Colomb. Química*, vol. 48, no. 1, pp. 43–51, 2019. <http://doi:10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.74469>
- [20] V. Quintero-Castaño and J. Lucas-Aguirre, "Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto," *Ingenium*, vol. 14, no. 28, pp. 16–32, 2013. <http://doi:10.21500/01247492.1331>
- [21] P. Pineda-Gómez, D. F. Coral, M. L. Arciniegas, A. Morales Rivera, and M. E. Rodríguez García, "Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido," *Ing. y Cienc. - ing.cienc.*, vol. 6, no. 11, pp. 129–141, 2010.
- [22] H. Liu, L. Yu, F. Xie, and L. Chen, "Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content," *Carbohydr. Polym.*, vol. 65, no. 3, pp. 357–363, 2006. <http://doi:10.1016/j.carbpol.2006.01.026>
- [23] E. S. Cajiao, L. E. Bustamante, A. R. Cerón, and H. S. Villada, "Efecto de la Gelatinización de Harina de Yuca sobre las Propiedades Mecánicas, Térmicas y Microestructurales de una Matriz Moldeada por Compresión," *Inf. Tecnol.*, vol. 27, no. 4, pp. 53–62, 2016. <http://doi:10.4067/S0718-07642016000400006>
- [24] D. F. Coral, P. Pineda-Gómez, A. Rosales-Rivera, and M. E. Rodríguez-García, "Determination of the gelatinization temperature of starch presented in maize flours," in *XIX Latin American Symposium on Solid State Physics (SLAFES XIX) 2009, Conference Series 167*, <http://doi:10.1088/1742-6596/1671/012057>
- [25] A. García, "Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz," *Escuela especializada en ingeniería, San Salvador*, ISBN: 978-99961-50-21-0, 2015.
- [26] P. Atkins and J. De Paula, *Atkins. Química Física*, 8a ed., Colombia: Editorial Médica Panamericana, 2008.
- [27] R. M. Felder and Ronald W. Rousseau, *Principios elementales de los procesos químicos*, 3a ed., México: Llmusa Wiley, 2004.

- [28] M. Smith, J. Van Ness, H. Abbott, *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. 7a ed., México: McGraw-Hill, 2014.
- [29] P. Pineda-Gómez, D. F. Coral, D. Ramos-Rivera, and A. Rosales Rivera, "Estudio de las propiedades térmicas de harinas de maíz producidas por tratamiento termico-alkalino," *Ing. y Cienc. - ing.cienc.*, vol. 7, no. 14, pp. 119–142, 2011.
- [30] D. Cornuéjols and S. Pérez, "Starch : a structural mystery," *Sci. Sch.*, no. 14, pp. 22–27, 2010.
- [31] D. Navia-Porras and N. Bejarano-Arana, "Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca," *Biotecnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial BSAA*, vol. 12, no. 2, pp. 40–48, 2014.
- [32] G. Ruiz Avilés, "Obtencion y caracterizacion de un polimero biodegradable a partir del almidon de yuca," *Ingeniería y Cienc.*, vol. 2, no. 4, pp. 5–28, 2006.
- [33] J. Acosta, H. Gomajoa, Y. Benavides, A. Charfuelan, and F. Valenzuela, "Evaluación del almidón de papa (*Solanum tuberosum*) en la obtención de bioplástico," *Bionatura*, vol. 1, no. 1, pp. 1-18, 2018, <http://doi:10.21931/rb/cs/2018.01.01.2>.
- [34] A. Carrasquero D, "Determinación del calor específico de la papa y la zanahoria: un ejemplo de investigación guiada en química," *Investig. y Postgrado*, vol. 16, no. 2, pp. 11–24, 2001.
- [35] L. J. Niño Otálora, A. M. García Torres, O. J. Medina Vargas, and C. I. Rojas Morales, "Biopelículas fotoactivas: material de empaque en alimentos sensibles a la oxidación," *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 21, no. 2, pp. 457–466, 2018, <http://doi:10.31910/rudca.v21.n2.2018.1080>.
- [36] S. Wisansakkul, O. Oupathumpanont, K. Sungsanit, S. Chulacupt, and S. Boonyobhas, "Development Production of Bioplastics from Jackfruit Seeds Starch," *Burapha Sci. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 216–228, 2016.
- [37] M. Feldmann and J. Fuchs, "Injection Molding of Bio-Based Plastics, Polymers, and Composites," in *Specialized Injection Molding Techniques*, H. Hans-Peter, Ed., Kassel, Germany: Elsevier, 2016, pp. 211-237.