



**CORRELACIÓN DE ENTALPÍAS DE GELATINIZACIÓN CON LOS ÍNDICES DE ABSORCIÓN DE AGUA Y DE SÓLIDOS SOLUBLES EN AGUA DE SÉMOLAS, GRANILLOS Y HARINAS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO**

**CORRELATION BETWEEN GELATINIZATION ENTHALPIES, WATER ABSORPTION INDEX AND WATER SOLUBLE INDEX IN GRITS, CORN MEALS AND NIXTAMALIZED CORN FLOURS**

G.M. Olguín-Arteaga<sup>1</sup>, M. Amador-Hernández<sup>1</sup>, A. Quintanar Guzmán<sup>2</sup>, F. Díaz-Sánchez<sup>3</sup>, I. Sánchez-Ortega<sup>1</sup>, A. Castañeda-Ovando<sup>1</sup>, R. Avila-Pozos<sup>1</sup> y E.M. Santos-López<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Ciudad del Conocimiento, Crta Pachuca-Tulancingo Km 4.5 s/n, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, 42184, Hidalgo, MEXICO.

<sup>2</sup>Adriana Consulting Services Incorporated. 1408 Hunter Ridge. Siloam Springs, AR 72761 USA

<sup>3</sup>FRITOS TOTIS SA. de CV. Calle 4 sur #123 Cd. Industrial, C.P. 43800, Tizayuca, Hidalgo, México.

Recibido 24 de Febrero de 2015; Aceptado 30 de Abril de 2015

**Resumen**

En la industria de las botanas de maíz se ha observado que se obtienen productos con grandes y numerosas burbujas cuando el almidón está muy gelatinizado a causa de los procesos de molienda, lo que genera textura y apariencia indeseable de los productos. En el presente estudio se midió la entalpía de gelatinización por calorimetría diferencial de barrido (DSC) en sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado y se correlacionó con los índices de absorción de agua (WAI) y de sólidos solubles en agua (WSI) para elaborar un modelo de predicción de entalpía. Los resultados indican que mientras más intenso fue el proceso de molienda (menor tamaño de partícula) más bajos fueron los valores promedio de entalpía de gelatinización,  $8.05 \pm 1.22$  J/g para sémolas,  $5.33 \pm 1.87$  J/g para granillos y finalmente, las harinas de maíz nixtamalizado presentaron valores entre 2.35 y 3.28 J/g. La entalpía de gelatinización presentó correlaciones significativas de - 0.847 y - 0.763 con WAI y WSI, respectivamente. Se estableció un modelo de predicción de entalpía para granillos, sémolas y harinas.

*Palabras clave:* nixtamalización, predicción de entalpía de gelatinización, harina de maíz nixtamalizado, WAI, WSI.

**Abstract**

Corn snack industry has empirically found that big and abundant blisters are developed when cornstarch is highly gelatinized, because of milling processes. This defect affects mainly the texture and appearance of the snacks. In the present study, gelatinization enthalpy by DSC was measured in grits, corn meals and nixtamalized corn flours, and correlated with Water Absorption Index (WAI) and Water Soluble Index (WSI), to generate an enthalpy prediction model. Results indicated that the more intense the process of milling was (lower particle diameter), the lower the gelatinization enthalpy values were. Grits presented a gelatinization enthalpy mean of  $8.05 \pm 1.22$  J/g, corn meals of  $5.33 \pm 1.87$  J/g and nixtamalized corn flours ranged between 2.35 y 3.28 J/g. The gelatinization enthalpy was significantly correlated with WAI and WSI (- 0.847 y - 0.763, respectively). A predictive model was successfully generated to predict gelatinization enthalpy in grits, corn meals and flours.

*Keywords:* nixtamalization, gelatinization enthalpy prediction, nixtamalized corn flour, WSI, WAI

\*Autor para la correspondencia. E-mail: : [emsantos@uaeh.edu.mx](mailto:emsantos@uaeh.edu.mx)

## 1 Introducción

El almidón, presente en forma de gránulos semicristalinos dentro del endospermo de los cereales como el maíz, contribuye en gran medida a las propiedades de textura de los alimentos y es una de las materias más utilizadas para la elaboración de snacks (Singh *y col.*, 2003; Mondragón *y col.*, 2004; Kohyama y Sasaki., 2006; Liu *y col.*, 2011; Osorio-Díaz *y col.*, 2011).

Tras la cosecha, el maíz es sometido a diferentes tratamientos para su posible transformación, ya sea vía seca o húmeda. La molienda seca se basa en la separación de las partes anatómicas del grano. El germen se separa para retirar la porción susceptible a enranciamiento y posteriormente se somete a un molido y tamizado, que según el tamaño puede dar como resultado harinas ( $< 180 \mu\text{m}$ ), granillos ( $180\text{-}425 \mu\text{m}$ ) o sémolas (los de mayor tamaño,  $> 425 \mu\text{m}$ ).

La operación de molienda húmeda es más compleja, ya que en este proceso se incluye la hidratación del maíz para la extracción principalmente del almidón. Dentro de la molienda húmeda merece mención especial las harinas que proceden de un proceso de nixtamalización, que consiste en la cocción del maíz con un tratamiento alcalino (0.6 a 1.2 % de hidróxido de calcio con respecto al peso del maíz), durante un periodo de 50-70 min a temperaturas entre 90-95 °C, y un reposo por 12-14 h. Posteriormente se realiza un drenado y lavado para remover el exceso de calcio y materia seca perdida (Méndez-Montealvo *y col.*, 2008; Ruiz-Gutiérrez *y col.*, 2010). El nixtamal obtenido está listo para la molienda húmeda, dando una masa que puede ser utilizada así o deshidratarla para producir harina de maíz nixtamalizado con diferentes granulometrías, que se puede hidratar para elaborar tortillas y una amplia gama de botanas (Sefa-Dedeh *y col.*, 2004).

Los procesos de almacenamiento, tipo de molienda, tamaño de partícula, el tiempo y temperatura de molienda, tiempos de cocción y tiempos de secado producen en el gránulo de almidón cambios notables en las propiedades fisicoquímicas y funcionales. Estos procesos originan un aumento en el contenido de amilosa al separarse de la estructura de amilopectina, hay una pérdida de birrefringencia y se genera una disminución en la entalpía de gelatinización provocando afectaciones en el producto final (Singh *y col.*, 2003; Sandhu *y col.*, 2004; Kohyama y Sasaki, 2006; Liu *y col.*, 2009; Singh *y col.*, 2009; Malumba *y col.*, 2010; Sikora *y col.*, 2010; Fernández-Muñoz *y col.*, 2011; Liu *y col.*, 2011). Ello

obliga a las industrias a monitorear la calidad de la materia prima que reciben para la elaboración de las botanas. La evaluación de la entalpía ( $\Delta H$ ) ha sido reconocida como una de las medidas más importantes para evaluar la calidad, ya que es un indicador de la pérdida de orden molecular dentro del gránulo y proporciona una medida general de cristalinidad (almidón no gelatinizado) mediante termogramas, especialmente en harinas de maíz nixtamalizado (Singh *y col.*, 2003). Un valor de entalpía bajo (menor a 5 J/g) en masas de maíz puede generar problemas en las botanas tipo totopo como es una mayor absorción de agua (Mondragón *y col.*, 2004; Bressani *y col.*, 2004, González *y col.*, 2005, Fernández-Muñoz *y col.*, 2007; Ruiz-Gutiérrez *y col.*, 2010) y favorecer la formación de masas pegajosas que son difíciles de manejar, un mayor intercambio de agua-aceite y producir mayor tamaño y número de burbujas en la superficie de productos fritos, y por tanto afectar a la textura del producto (Ruiz-Gutiérrez *y col.*, 2010).

Esto obliga a que cuando se parte de harinas de maíz nixtamalizado se incorporen sémolas ( $> 425 \mu\text{m}$ ) o granillos ( $180\text{-}425 \mu\text{m}$ ) a las masas para incrementar la entalpía de gelatinización y mejorar las propiedades de textura. En este punto, la determinación de la entalpía de las sémolas y granillos puede ser una etapa clave en la calidad final de los productos de botanas, sin embargo no es una determinación al alcance de toda empresa y tiene la desventaja de un mayor costo económico (Yu *y col.*, 2001; Sandhu *y col.*, 2004; Liu *y col.*, 2009). Ante ello se planteó determinar mediante análisis estadístico la correlación entre entalpías de gelatinización, el índice de absorción de agua (WAI) y el índice de sólidos solubles en agua (WSI) para establecer una ecuación a partir de un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir valores de entalpía en sémolas, granillos y harinas a partir de estos parámetros.

## 2 Material y métodos

### 2.1 Muestras

Durante el periodo de enero 2011-enero 2014 se analizaron muestras de maíz proporcionadas por la empresa FRITOS TOTIS S.A de C.V. conformadas por 11 lotes de sémolas (S1-S11), 12 lotes de granillos (G1-G12) y 38 lotes de harinas de maíz nixtamalizado, divididos en 5 grupos y codificados como HR01-

HR05, HR11-HR18, HTS1-HTS12, HTM1-HTM7 y HTT1-HTT3. Para la validación del modelo se analizaron 4 lotes de granillos (G13-G16). De cada una de las muestras se tomaron 30 g, se redujo el tamaño de partícula con un molino ciclónico (UDY CORPORATION, USA) y se tamizaron con malla número 100 (diámetro 150  $\mu\text{m}$ ).

## 2.2 Determinación de índice de absorción de agua e índice de sólidos solubles en agua

Tras la determinación del contenido de humedad en las muestras por el método 925.10 de la AOAC (1995) se determinó el índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles en agua (WSI) de acuerdo a la técnica descrita por Anderson y col. (1969) y Rodríguez-Miranda y col. (2014). A muestras de 5 g se les adicionó 30 mL de agua desionizada y tras homogeneizar se dejó en reposo por 30 min. Tras el reposo las muestras fueron centrifugadas a 3000 rpm durante 15 min, posteriormente el parámetro de WAI se calculó como el porcentaje de agua absorbida por la muestra tras la centrifugación respecto a su peso inicial en extracto seco y el parámetro WSI se calculó como el porcentaje de sólidos presentes en el sobrenadante respecto al peso inicial en extracto seco de la muestra. Cada uno de los análisis se realizó por triplicado.

## 2.3 Propiedades térmicas de las harinas

Las mediciones de la entalpía ( $\Delta H$ ) y temperatura pico de gelatinización ( $T_p$ ) se realizaron empleando el método para masa de maíz nixtamalizado descrito por Santos y col. (2014). Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (DSC822e/400, Mettler-Toledo, Columbus, OH), calibrado con estándar de referencia metal Indio y los datos fueron analizados con el software STARe. Para ello, 1 g de muestra previamente calculada su humedad, se mezcló con agua desionizada, para obtener una masa con 50% de contenido de humedad, y se equilibró a temperatura ambiente durante 1 h, para asegurar una hidratación completa (Cameron y Wang, 2006). Se pesó alrededor de 8 mg de muestra en celdas de aluminio herméticamente selladas y se les realizó un barrido de temperatura de 25 a 120  $^{\circ}\text{C}$  con una velocidad de calentamiento de 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . A partir de los termogramas se determinó la  $T_p$  y la entalpía. Cada uno de los análisis se realizó por triplicado.

## 2.4 Correlación y modelo de predicción de entalpía

A los resultados obtenidos se les realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el paquete estadístico Statgraphics Plus versión 4.0, con el fin de determinar si existían diferencias entre cada una de las muestras (lotes y tipos). Se realizó una comparación de medias mediante la prueba Tukey HSD ( $P < 0.05$ ) y las medias muestrales se analizaron de acuerdo al teorema central del límite (Miller, 2002).

Con el fin de evaluar la correlación entre la entalpía de gelatinización y los parámetros de WAI y WSI, se analizó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables. Con base en los coeficientes de correlación obtenidos se eligió el modelo de predicción lineal múltiple, que incluye los coeficientes de correlación entre los valores experimentales y los predichos y el error absoluto de predicción. Estos análisis se realizaron también con el mismo paquete estadístico.

# 3 Resultados y discusión

## 3.1 Resultados de entalpía, WAI y WSI

Se analizaron un total de 61 muestras (11 sémolas, 12 granillos y 38 harinas de maíz nixtamalizado). En la Tabla 1 se presentan los resultados promedio para los parámetros de cada muestra obtenidos de los 7 tipos (G, S, HRO, HR1, HTS, HTM y HTT).

En las sémolas el valor de WAI fue significativamente menor al compararlo con los granillos ( $1.38 \pm 0.26$  y  $1.87 \pm 0.31$  %, respectivamente), mientras que el valor de WSI no presentó diferencia significativa ( $2.10 \pm 0.43$  y  $2.17 \pm 0.39$  %) ( $P > 0.05$ ). En las harinas de maíz nixtamalizado es más elevado el valor WSI (entre 4.92 y 5.15 %) y el valor de WAI es similar al valor obtenido en granillos y mucho mayor si es comparado con sémolas, con valores que van desde  $1.79 \pm 0.15$  hasta  $2.11 \pm 0.20$  %.

Cuanto más agresivo es el tratamiento de reducción de tamaño en seco (en este caso granillo > sémola) y menor el tamaño de partícula (granillo < sémola), mayor es el daño causado a la estructura del almidón, y por tanto, la capacidad de absorber agua por parte del almidón aumenta (Hasjim y col., 2013).

Tabla 1. Valores promedio de índice de absorción de agua (WAI), índice de sólidos solubles (WSI), temperatura pico (Tp) y entalpía de gelatinización ( $\Delta H$ ) en lotes de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado (desviación estándar).

Número de lotes	Tipo de muestra	(WAI) %	(WSI) %	Tp (°C)	$\Delta H$ (J/g)
11	S1-S11	1.38 (0.26) <sup>a</sup>	2.10 (0.43) <sup>a</sup>	73.50 (2.57) <sup>a</sup>	8.05 (1.22) <sup>d</sup>
12	G1-G12	1.87 (0.31) <sup>b</sup>	2.17 (0.39) <sup>a</sup>	75.46 (4.47) <sup>a</sup>	5.33 (1.87) <sup>c</sup>
8	HR0 1-8	1.95 (0.14) <sup>bc</sup>	5.09 (1.14) <sup>b</sup>	80.13 (1.53) <sup>b</sup>	2.81 (0.50) <sup>ab</sup>
8	HR1 1-8	1.94 (0.09) <sup>bc</sup>	4.92 (0.46) <sup>b</sup>	80.75 (2.28) <sup>b</sup>	2.35 (0.44) <sup>a</sup>
12	HTS 1-12	2.08 (0.13) <sup>c</sup>	5.15 (0.82) <sup>b</sup>	81.57 (1.72) <sup>b</sup>	3.28 (0.76) <sup>b</sup>
7	HTM 1-7	1.79 (0.15) <sup>c</sup>	5.07 (0.55) <sup>b</sup>	81.42 (0.85) <sup>b</sup>	2.92 (0.47) <sup>ab</sup>
3	HTT 1-3	2.11 (0.20) <sup>c</sup>	5.13 (0.65) <sup>b</sup>	81.19 (0.85) <sup>b</sup>	2.64 (0.09) <sup>ab</sup>

a-d, medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05).

En las harinas sometidas a un tratamiento de nixtamalización los iones calcio interactúan con parte de la matriz proteica, liberando el almidón, lo que contribuye también a una mayor absorción de agua. En las harinas de maíz nixtamalizado el WAI se relaciona en mayor medida con la temperatura de cocción y el tiempo de remojo en la nixtamalización del maíz que con el tamaño de partícula. La difusión de agua y calcio, en el interior del gránulo genera un incremento en las propiedades de viscosidad con respecto a las sémolas y granillos. Así pues, en el caso de harinas nixtamalizadas la absorción de agua está más ligada con la degradación de la estructura cristalina del almidón durante la nixtamalización que con el proceso de reducción de tamaño (Cornejo-Villegas y col., 2013).

En el índice de sólidos solubles (WSI) resaltan dos grupos homogéneos. Por un lado se encuentran sémolas y granillos (molienda en seco) y por otro lado las harinas de maíz nixtamalizado, donde el valor de WSI fue más alto, debido a que estas muestras han sufrido además del almacenamiento, un proceso térmico en húmedo que provoca una mayor degradación en la estructura del almidón y favorece la formación de dextrinas que son solubles en agua. En el caso de sémolas y granillos al no estar presente el germen, que es la parte que aporta las sustancias solubles (albuminas) el valor de WSI fue significativamente menor (P<0.05).

Respecto a la temperatura pico de entalpía de gelatinización se observó que las harinas de maíz nixtamalizado presentan valores de Tp significativamente más altos, con un promedio de  $81.03 \pm 1.72$  °C comparados con los obtenidos en sémolas y granillos ( $73.50 \pm 2.57$  °C y  $75.46 \pm 4.47$  °C, respectivamente). Esto se debe a una resistencia térmica causada por componentes del grano que se encuentran disueltos (amilosa principalmente) lo que

permite una capacidad de hinchamiento mayor y que se genere un tiempo de transición más largo y temperaturas pico más altas (Schirmer y col., 2013). Temperaturas altas de secado de los granos previo al almacenamiento tienen un efecto negativo en la separación de la estructura de almidón y las proteínas del endospermo (zeínas y glutelinas) durante la molienda en húmedo. Aquellas proteínas que no se separan del almidón limitan la entrada de agua y la reducción de las interacciones entre el agua y los componentes del almidón y generan una resistencia térmica que desplaza la temperatura pico (Malumba y col., 2010).

Respecto a las entalpías de gelatinización, las sémolas presentaron los valores más altos ( $8.05 \pm 1.22$  J/g) seguidas por los granillos ( $5.33 \pm 1.87$  J/g) (P<0.05) ya que en las sémolas la reducción de tamaño menor y por tanto la degradación de la estructura del almidón también es menor. Las harinas de maíz nixtamalizado presentaron entalpías significativamente más bajas, con valores promedio entre 2.35 y 3.28 J/g. El bajo contenido de humedad es un factor limitante en la gelatinización del almidón y explica los valores elevados de entalpía en sémolas y granillos, a diferencia de aquellas muestras que además de suministrarle un aumento en la temperatura por la molienda, tuvieron un tratamiento en húmedo (Malumba y col., 2010). La mayor gelatinización en las harinas es por la difusión de agua presente en el grano de maíz, ya que al inicio de la nixtamalización el espesor del pericarpio impide sustancialmente la entrada de agua, pero durante el proceso de calentamiento la solución alcalina solubiliza el pericarpio, se produce un ablandamiento y permite así la difusión de los iones calcio hasta conseguir un equilibrio en los gránulos, así se hinchan más fácilmente, pierden su estructura cristalina, y es más sencillo que se lleve a cabo la gelatinización

(Morrison y col., 1994; Chen y col., 2003, Dhital y col., 2011).

### 3.2 Correlación entre entalpía, WAI, WSI y predicción de la entalpía a partir de WAI y WSI

La representación de los datos de entalpía frente a los parámetros de WAI y WSI (Figs. 1 y 2), permitió identificar el comportamiento anómalo de 4 muestras, ya que al comparar con el WAI se ubican como un grupo independiente de las dos nubes de puntos o conjunto de datos que aglomeran por un lado a la mayoría de las harinas de maíz nixtamalizado y por otro a la mayoría de las sémolas. Es por ello que se decidió eliminar dichos datos de los análisis posteriores de correlación y regresión.

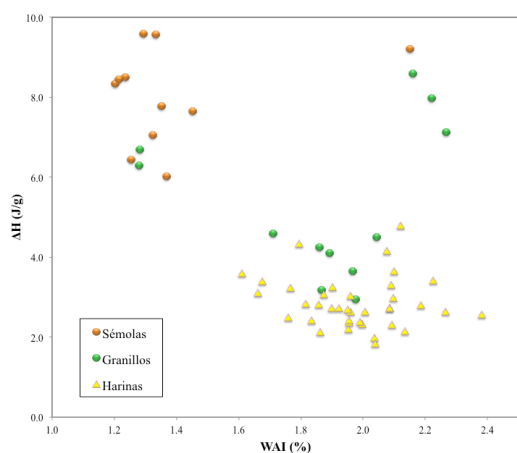


Fig. 1. Relación entre entalpía de gelatinización con índices de absorción de agua para muestras de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.

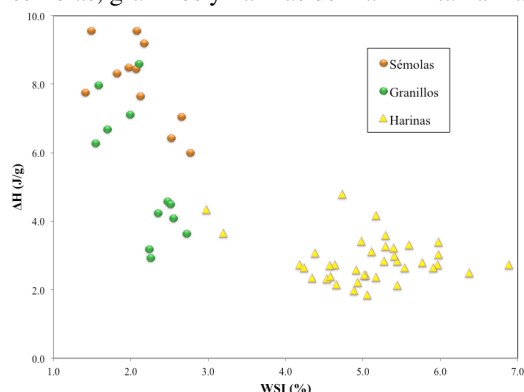


Fig. 2. Relación entre entalpía de gelatinización con índices de sólidos solubles en agua para muestras de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado.

La entalpía se correlacionó significativamente ( $P < 0.001$ ) y de forma negativa con los parámetros de WAI  $r = -0.8473$  y con WSI,  $r = -0.7628$ . En la Tabla 2 se incluyen los parámetros que arrojó el modelo de regresión lineal así como cada uno de los coeficientes que indican la influencia de cada variable predictiva (WAI y WSI) sobre la entalpía de gelatinización. Se muestran también los errores estándar de cada uno de los coeficientes. El modelo cuenta con un nivel de significación de  $P < 0.0001$  y el coeficiente de determinación múltiple obtenido ( $R^2$ ) fue de 0.8040, lo que indica que el valor de entalpía puede ser estimado adecuadamente por parámetros de WAI y WSI. Se obtuvieron altas correlaciones entre los valores de  $\Delta H$  y los predichos, esto se puede observar en la Fig. 3 donde los valores predichos para el modelo se representan frente a la observada. Es evidente que los valores predichos están muy cerca de los valores observados.

Tabla 2. Estadísticas de regresión para el modelo predictivo para entalpía de gelatinización utilizando las variables predictivas índice de absorción de agua (WAI) e índice de sólidos solubles (WSI).

Constante (J/g) (EE)	12.7034 (0.7148)
WAI (J/g) (EE)	3.7670 (0.4782)
WSI (J/g) (EE)	0.4779 (0.0951)
F-test	109.72
$R^2$	0.8114
$R^2$ ajustada	0.8040
Sig.	***
DER	0.8201
Error Absoluto	0.6917

Significación del modelo: \*\*\* ( $P < 0.01$ ). EE: error estándar. DER: desviación estándar residual. EE: error estándar.

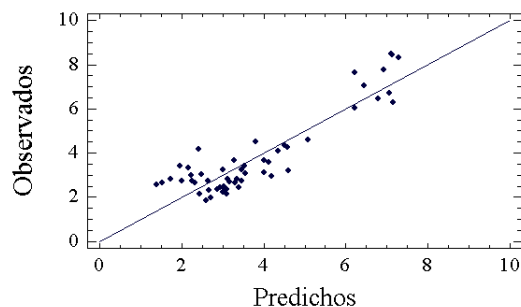


Fig. 3. Correlación entre los valores de las entalpías observadas y las predichas por el modelo obtenido de la regresión lineal múltiple.

Tabla 3. Valores de entalpía de gelatinización registrados por el calorímetro diferencial de barrido (DSC) y obtenidos por el modelo de regresión en cuatro lotes de granillos de maíz

Muestra	Valores Observados				Valores Predichos			
	WAI %	WSI %	Entalpía J/g	Entalpía J/g	LI	LS	LI Media	LS Media
1	1.8444	2.8014	4.75	4.4164	2.7332	6.0996	4.0669	4.7659
2	1.7312	2.7831	4.61	4.8516	3.1755	6.5277	4.5380	5.1652
3	1.7695	2.6388	4.83	4.7763	3.0944	6.4581	4.4332	5.1193
4	1.6620	2.6344	5.50	5.1833	3.5055	6.8612	4.8603	5.5064

LI=Límite Inferior, LS=Límite superior

El modelo de regresión generado a partir de ellos fue expresado por la Ec. 1.

$$\Delta H = 12.7034 - 3.7670WAI - 0.4779WSI \quad (1)$$

El valor de la constante (12.7034) se asocia a un gránulo de almidón intacto cuando no existe un porcentaje de absorción de agua y sólidos solubles. Este valor se encuentra dentro del intervalo reportado para un gránulo de almidón intacto entre 12 y 13.7 J/g (Singh y col., 2003, Estrada-Girón y col., 2014). El coeficiente de la variable WAI (3.7670) se relaciona con el grado de daño presente en el almidón por lo que a mayor daño del grano (por tipo de molienda y temperatura), el almidón absorbe mayor cantidad de agua y tendrá menor entalpía de gelatinización debido a que parte del almidón ya ha sido gelatinizado. El coeficiente de WSI (0.04779) se relaciona con el tiempo de secado de las harinas y granos y el tamaño de partícula. Así, cuanto mayor es el tiempo de secado de la harina y menor es el tamaño de partícula en productos de molienda seca, mayor es la cantidad de dextrinas que se generan (valores más altos de WSI) y menor entalpía. En el caso de harinas de maíz nixtamalizado que además de sufrir el tratamiento térmico durante la nixtamalización son sometidas a un secado posterior para su deshidratación, se da una mayor formación de dextrinas y por tanto un mayor WSI.

### 3.3 Validación del modelo

Para validar el modelo de regresión lineal múltiple se analizaron 4 lotes de muestras de granillos, y a partir de mediciones de WAI y WSI se obtuvo el valor de entalpía de predicción así como los límites correspondientes a cada lote (Tabla 3). De acuerdo a los resultados, los valores de entalpía estimados se encontraron dentro de los intervalos de confianza del 95%, indicando un buen valor predictivo del modelo.

## Conclusión

La alta correlación entre la entalpía de gelatinización, índices de absorción de agua e índices de sólidos solubles en agua en las muestras analizadas permite proponer un modelo de predicción de la entalpía de gelatinización para muestras de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado, con alto poder de predicción a partir de medidas sencillas de WAI y WSI de las mismas.

## Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por el Programa de Estímulos a la Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica del CONACYT, convocatoria 2012, en la modalidad INNOVATEC, Proyecto número 178916. Damos las gracias a la Empresa FRITOS TOTIS, S.A. de C.V. por el apoyo y facilidades para esta investigación.

## Nomenclatura

DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
T <sub>p</sub>	temperatura pico, °C
WAI	índice de absorción de agua, %
WSI	índice de sólidos solubles en agua, %
<i>Símbolos griegos</i>	
ΔH	entalpía de gelatinización (J/g)

## Referencias

- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F. y Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today* 14, 4-12.

- AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists International* (16th ed., Vol. II). (P. Cunniff, ed)
- Bressani, R., Turcios, J. C., Colmenares de Ruiz, A. S. y de Palomo, P. P. (2004). Effect of processing conditions on phytic acid, calcium, iron and zinc contents of lime-cooked maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 1157-1162.
- Cameron, D. K. y Wang, Y. J. (2006). Application of protease and high-intensity ultrasound in corn starch isolation from degermed corn flour. *Cereal Chemistry* 83, 505-509.
- Chen, J. J., Lii, C.Y. y Lu, S. (2003). Physicochemical and morphological analyses on damaged rice starches. *Journal of Food and Drug Analysis* 11, 283-289.
- Cornejo-Villegas, M.A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Del Real-Lopez, A., Zambrano-Zaragoza, M. L., Martínez-Vega, V. y Rodríguez-García, M. E. (2013). Physicochemical, morphological, and pasting properties of nixtamalized flours from quality protein maize and its particle distribution. *LWT-Food Science and Technology* 53, 81-87.
- Dhital, S., Shrestha, A. K., Flanagan, B. M., Hasjim, J. y Gidley, M. J. (2011). Cryomilling of starch granules leads to differential effects on molecular size and conformation. *Carbohydrate Polymers* 84, 1133-1140.
- Estrada-Girón, Y., Aguilar, J., Morales-del Rio, J. A., Valencia-Botin, A. J., Guerrero-Beltrán, J. A., Martínez-Preciado, A. H., Macías, E. R., Soltero, J. F. A., Solorza-Feria, J. y Fernández, V. V. A. (2014). Effect of moisture content and temperature, on the rheological, microstructural and thermal properties of masa (dough) from a hybrid corn (*Zea mays* sp.) variety. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13, 429-446.
- Fernández-Muñoz, J. L., San Martín-Martínez, E., Díaz-Góngora, J. A. I., Calderón, A., Alvarado-Escobar, A. y Ortiz-Cárdenas, H. (2007). Evaluation of physicochemical changes in nixtamalized Maize flours as a function of steeping time. *Journal of Food Engineering* 78, 972-977.
- Fernández-Muñoz, J. L., Acosta-Osorio, A. A., Zelaya-Angel, O. y Rodríguez-García, M. E. (2011). Effect of calcium content in the corn flour on RVA profiles. *Journal of Food Engineering* 102, 100-103.
- González, R., Reguera, E., Figueroa, J.M. y Sánchez-Sinencio, F. (2005). On the nature of the Ca binding to the hull of nixtamalized corn grains. *LWT-Food Science and Technology* 38, 119-124.
- Hasjim, J., Li, E. y Dhital, S. (2013). Milling of rice grains: Effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties. *Carbohydrate Polymers* 92, 682-690.
- Kohyama, K. y Sasaki, T. (2006). Differential scanning calorimetry and a model calculation of starches annealed at 20 and 50 °C. *Carbohydrate Polymers* 63, 82-88.
- Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L. y Lin, L. (2009). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science* 34, 1348-1368.
- Liu, T. Y., Ma, Y., Yu, S. F., Shi, J. y Xue, S. (2011). The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 12, 586-593.
- Malumba, P., Janas, S., Roiseux, O., Sinnaeve, G., Masimango, T., Sindic, M., Deroanne, C. y Béra, F. (2010). Comparative study of the effect of drying temperatures and heat-moisture treatment on the physicochemical and functional properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers* 79, 633-641.
- Méndez-Montealvo, G., García-Suárez, F. J., Paredes-López, O. y Bello-Pérez, L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of Cereal Science* 48, 420-425.
- Miller, J. N. y Miller, J. C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Mondragón, M., Bello-Pérez, L. A., Agama, E., Melo, A., Betancurt-Ancona, D. y Peña, J. L. (2004). Effect of nixtamalization on the modification of the crystalline structure of maize starch. *Carbohydrate Polymers* 55, 411-418.

- Morrison, W. R. y Tester, R. F. (1994). Properties of damaged starch granules. IV. Composition of ball-milled wheat starches and of fractions obtained on hydration. *Journal of Cereal Science* 20, 69-77.
- Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Bello-Perez, L. A., Islas-Hernandez, J. J., Gómez-Montiel, N. O. y Paredes-Lopez, O. (2011). Effect of endosperm type on texture and in vitro starch digestibility of maize tortillas. *LWT-Food Science and Technology* 44, 611-615.
- Rodríguez-Miranda, J., Ramirez-Wong, B., Vivar-Vera, M. A., Solís-Soto, A., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Medrano-Roldan, H. y Delgado-Licon, E. (2014). Effect of bean flour concentration (*Phaseolus vulgaris* L.), moisture content and extrusion temperature on the functional properties of aquafeeds. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13, 649-663.
- Ruiz-Gutiérrez, M. G., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Lardizábal-Gutiérrez, D., Barnard, J., Márquez-Melendez, R. y Talamás-Abbud, R. (2010). Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. *Journal of Food Engineering* 98, 76-83.
- Sandhu, K. S., Singh, N. y Kaur, M. (2004). Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches. *Journal of Food Engineering* 64, 119-127.
- Santos, E. M., Quintanar-Guzman, A., Solorza-Feria, J., Sanchez-Ortega, I., Rodriguez, J. A., Wang, Y. J. (2014). Thermal and rheological properties of masa from nixtamalized corn subjected to a sequential protein extraction. *Journal of Cereal Science* 60, 490-496.
- Sefa-Dedeh, S., Cornelius, B., Sakyi-Dawson, E. y Ohene Afoakwa, E. (2004). Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry* 86, 317-324.
- Schirmer, M., Höchstötter, A., Jekle, M., Arendt, E. y Becker, T. (2013). Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. *Food Hydrocolloids* 32, 52-63.
- Sikora, M., Kowalski, S., Krystyan, M., Ziobro, R., Wrona, P., Curic, D. y LeBail, A. (2010). Starch gelatinization as measured by rheological properties of the dough. *Journal of Food Engineering* 96, 505-509.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S. y Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry* 81, 219-231.
- Singh, N., Bedi, R., Garg, R., Garg, M. y Singh, J. (2009). Physico-chemical, thermal and pasting properties of fractions obtained during three successive reduction milling of different corn types. *Food Chemistry* 113, 71-77.
- Yu, L. y Christie G. (2001). Measurement of starch thermal transitions using differential scanning calorimetry. *Carbohydrate Polymers* 46, 179-84.