



## ESTRUCTURA INTERNA DE LOS GRÁNULOS DE ALMIDÓN DE PLÁTANO MEDIANTE GELATINIZACIÓN QUÍMICA SUPERFICIAL: PROPIEDADES MORFOLÓGICAS, FISCOQUÍMICAS Y MOLECULARES

### INNER STRUCTURE OF PLANTAIN STARCH GRANULES BY SURFACE CHEMICAL GELATINIZATION: MORPHOLOGICAL, PHYSICOCHEMICAL AND MOLECULAR PROPERTIES

E. Agama-Acevedo, L.A. Bello-Pérez\*, G. Pacheco-Vargas y S. Evangelista-Lozano

*Instituto Politécnico Nacional Centro de desarrollo de Productos Bióticos. Km 8.5 carr. Yautepec-Jojutla, colonia San Isidro, apartado postal 24, 62731 Yautepec, Morelos, México.*

Recibido 20 de Noviembre 2013; Aceptado 21 de Enero de 2015

#### Resumen

Se estudió la organización estructural de los componentes (amilosa y amilopectina) del almidón de plátano usando gelatinización superficial. A los gránulos remanentes se les evaluó la morfología, sus propiedades térmicas y características moleculares. Se probaron dos reactivos químicos para realizar la gelatinización; el cloruro de litio 13 M provocó mayor daño en la estructura del gránulo de almidón que el cloruro de calcio 2 M, por lo que se continuó usando el segundo a diferentes tiempos de reacción. La superficie gelatinizada incrementó y el tamaño del gránulo disminuyó cuando incrementó el tiempo de reacción. En general, la temperatura promedio y la entalpía de gelatinización disminuyeron al incrementar la superficie removida, indicando una desorganización o “debilitamiento” de la estructura del gránulo. Sin embargo, la gelatinización superficial no afectó el patrón de difracción de rayos X ni el porcentaje de cristalinidad. Conocer la organización de los dos componentes (amilosa y amilopectina) del gránulo de almidón de plátano, ayudará a explicar sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y de digestibilidad, así como su reactividad cuando es modificado química o enzimáticamente.

*Palabras clave:* almidón, plátano, gelatinización química, microscopía, tamaño de gránulo.

#### Abstract

The structural organization of starch components (amylose and amylopectin) of plantain starch was studied using surface gelatinization. The remnant starch granules were studied in the morphological, thermal, and molecular features. Two reagents were tested to carry out the surface gelatinization; 13 M lithium chloride produced higher damage than 2 M calcium chloride on structure of starch granule, so calcium chloride was used to carry out surface gelatinization at different reaction times. Gelatinized surface increased and the granule size decreased when the reaction time increased. In general, the average temperature and enthalpy of gelatinization decreased when the removed surface increased, showing disorganization or “weakening” of the granule structure. However, surface gelatinization did not affect the X-ray diffraction pattern and the crystallinity level. Knowledge of the organization of plantain starch components (amylose and amylopectin), support to explain the physicochemical, functional and digestibility characteristics, as well as its reactivity when the plantain starch is enzymatic and chemical modified.

*Keywords:* starch, plantain, chemical gelatinization, microscopy, granule size.

## 1 Introducción

El almidón es un carbohidrato constituido esencialmente por unidades de D-glucosa (98-99%).

Consiste de dos polisacáridos con estructura química diferente: la amilosa y la amilopectina (Wang y White, 1994). La amilosa es esencialmente lineal y la amilopectina es el componente ramificado. Las

\*Autor para la correspondencia. E-mail: : labellop@ipn.mx

fracciones de amilosa y amilopectina se orientan en forma radial para originar los gránulos de almidón, definiendo su tamaño y forma. Por otro lado, la organización y distribución de la amilosa y amilopectina dentro de la estructura granular también difiere, dependiendo de la fuente botánica; por ejemplo, en el almidón de maíz la amilosa está más concentrada en la periferia que en el centro del gránulo, mientras que las cadenas ramificadas de la amilopectina son más cortas en la superficie que en el interior del gránulo (Pan y Jane, 2000). La distribución de la amilosa y amilopectina dentro del gránulo difiere en función del contenido de amilosa y esto a su vez repercute en sus propiedades fisicoquímicas (Kuakpetoon y Wang, 2007). El almidón de plátano ha sido estudiado en los últimos diez años, proponiéndose su uso en diversos alimentos, ya que se caracteriza por presentar alto contenido de almidón resistente, *in vitro* constituye aproximadamente el 37% (Aparicio-Saguilan y col., 2005) e *in vivo* entre 50 y 66% (Englyst y Cummins, 1986). Además, el almidón de plátano se ha utilizado en la elaboración de películas biodegradables (Romero-Bastida y col., 2011) El almidón de plátano presenta un patrón de difracción de rayos X tipo C, que involucra ambos polimorfismos (A y B) dentro de la estructura granular, un porcentaje de cristalinidad (29%) que impacta en los valores de temperatura y entalpía de gelatinización, a pesar de su mayor contenido de amilosa (37%) que el almidón de maíz normal (Espinoza-Solís y col., 2009). Actualmente, no se conoce la distribución de la amilosa y amilopectina dentro de la estructura granular del almidón de plátano, lo cual ayudaría a entender sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y de digestibilidad, así como explicar su hidrólisis enzimática y su susceptibilidad a diferentes reactivos químicos usados durante su modificación (Nuñez-Santiago y col., 2011). El objetivo de este trabajo fue realizar la gelatinización superficial del almidón de plátano y estudiar los gránulos, después de remover capas, usando diferentes técnicas.

## 2 Metodología

### 2.1 Aislamiento del almidón

Se utilizó plátano (*Musa paradisiaca* L.) de la variedad Macho. El fruto se peló, la pulpa se cortó en rodajas y se secó en un horno de convección forzada a 40 °C por 24 h. Posteriormente, se molió y tamizó (malla 50 U.S.) para obtener la harina. Se pesaron 100 g de

harina de plátano, se agregaron 500 mL de solución de bisulfito de sodio al 1% (pH 4.5), la mezcla se agitó durante 12 h a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo, se filtró a través de una malla 200 U.S., el residuo se lavó con agua destilada, se centrifugó a 100 x g para remover la fibra. Posteriormente, el residuo se resuspendió en agua destilada y centrifugó a 1000 x g para precipitar el almidón. El residuo se filtró a través de una membrana de celulosa (Whatman No. 1) y se secó en un horno de convección a 40 °C durante 12 h (patente US 5, 797, 985 de Whistler, 1998). Para determinar la pureza del almidón aislado se utilizó el método oficial 76.13 (AACC, 2000).

### 2.2 Separación de los gránulos del almidón por sedimentación

Tomando en consideración que los gránulos pequeños son gránulos inmaduros que no han alcanzado su tamaño final (Pan y Jane, 2000, Dhital y col., 2011), se realizó una separación de los gránulos del almidón por sedimentación, para separar los gránulos en dos fracciones: gránulos pequeños < 25  $\mu\text{m}$  y gránulos grandes  $\geq 25 \mu\text{m}$ , utilizando la metodología propuesta por Dhital y col. (2010).

### 2.3 Gelatinización química superficial de los gránulos de almidón

Se utilizó cloruro de litio (LiCl) 13 M y cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) 2 M para llevar a cabo la gelatinización superficial de los gránulos de almidón, mediante la metodología descrita por Pan y Jane (2000). El almidón (5 g) se suspendió en 100 mL de LiCl 13 M a una temperatura entre 21 y 23 °C, durante una hora. Cuando se utilizó  $\text{CaCl}_2$ , se probaron diferentes tiempos de reacción (15, 30, 60 y 120 min). Al término del tratamiento, a la mezcla se le agregaron 600 mL de agua destilada a 4 °C para parar la gelatinización y se centrifugó a 3500 x g a 4 °C durante 15 min. Se descartó el sobrenadante y el almidón se lavó dos veces. Para separar la superficie gelatinizada de los gránulos remanentes, el almidón tratado fue resuspendido en 300 mL de agua destilada a 4 °C y se licuó durante 10 min, se centrifugó a 3900 x g durante 15 min, este proceso se repitió de 5 a 8 veces hasta que el sobrenadante saliera claro. El sobrenadante contenía la fracción gelatinizada y el residuo los remanentes de los gránulos de almidón. Los gránulos remanentes de almidón se lavaron con 60 mL etanol absoluto, se centrifugó a 5000 x g por 15 min y se secó a 40 °C durante 8 h. Los sobrenadantes

colectados después de los lavados se concentraron y se precipitó con etanol, el precipitado se secó a 40 °C durante 8 h.

## 2.4 Análisis morfológico

### 2.4.1 Microscopia de luz transmitida y luz polarizada

Se esparció almidón en un portaobjetos de manera uniforme, a éste se le agregó una gota de agua y con ayuda de una espátula se homogenizó la mezcla. Se colocó un cubre objetos y se observó bajo una lente con luz transmitida y luz polarizada.

### 2.4.2. Análisis de distribución de tamaño de partícula.

El tamaño del gránulo se determinó por análisis de difracción de rayo láser (Malvern Instruments, 2000). Las mediciones se llevaron a cabo por cuadruplicado a temperatura ambiente. El tamaño de partícula se expresó como diámetro medio D (v, 0.5) y distribución de volumen (Malvern Instruments Ltd., 1990).

## 2.5 Contenido de amilosa

El contenido de amilosa se determinó mediante un kit (amylosa/amilopectina; catalogo K-AMYL, Megazyme International, Wicklow, Irlanda).

## 2.6 Patrón de difracción de rayos X y porcentaje de cristalinidad

Se utilizó el método propuesto (Zamudio-Flores y Bello-Pérez, 2013) con algunas modificaciones. El almidón se colocó en el portamuestra del difractómetro de Rayos X (Bruker D5005, Inglaterra) de ángulo ancho, equipado con una fuente de cobre operado a 40 KV y 30 mA, produciendo una radiación de CuK con una longitud de onda de 1.54 Å. Los datos fueron colectados en un rango de 4-38° a intervalos de 0.1° con una velocidad de barrido de 60 s/°. Hermans y Weidinger (1948) establecieron un método para cuantificar la cristalinidad en polímeros, el cual ha sido ampliamente utilizado. Se propuso una integración que involucra la relación del área del pico cristalino a partir del área total de la muestra (regiones cristalinas más amorfas).

$$\text{Cristalinidad (\%)} = \frac{\text{Área dispersada cristalina}}{\text{Área total dispersada}} \times 100\% \quad (1)$$

## 2.7 Propiedades térmicas

Se pesaron 2.2 mg de muestra en una charola de aluminio y se le adicionó 7 µmL de agua desionizada. El análisis se realizó en un intervalo de temperatura de 20 a 120 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, usando un calorímetro de barrido diferencial (Q10, TA Instruments, New Castle, DE, USA). Para medir las propiedades de retrogradación, las muestras gelatinizadas se almacenaron a 4 °C durante 7 días. Se aplicó el mismo programa de calentamiento utilizado para gelatinización.

# 3 Resultados y discusión

## 3.1 Pureza del almidón y distribución del tamaño promedio de los gránulos

Se aisló aproximadamente un kg de almidón, el cual presentó una pureza de 92.5 %. El tamaño promedio del gránulo del almidón de plátano fue de 25 µm (Fig. 1), por lo que se decidió eliminar los gránulos menores a 20 µm, mediante un proceso de sedimentación.

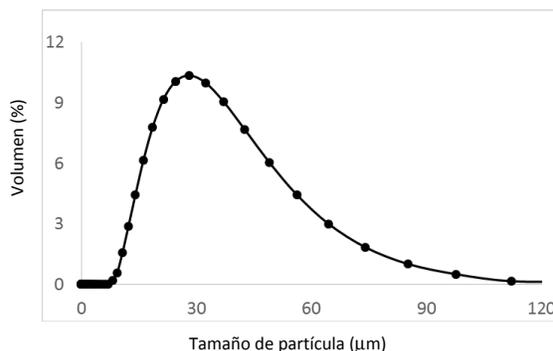


Fig. 1. Distribución de tamaño de gránulo del almidón nativo de plátano.

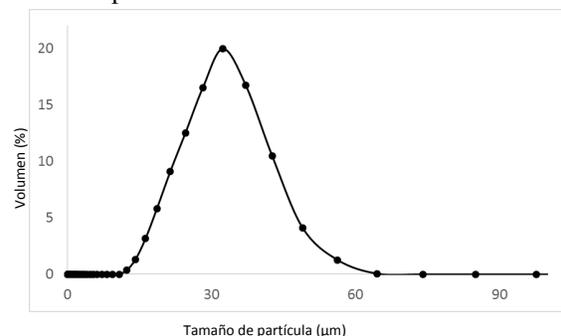


Fig. 2. Distribución de tamaño de gránulo del almidón nativo de plátano después de la sedimentación para concentrar los gránulos mayores a 25 µm.

La Fig. 2 muestra que durante la sedimentación los gránulos menores a  $18 \mu\text{m}$  representaron solo el 10 % volumen. Por lo cual este almidón fue utilizado para llevar a cabo la gelatinización superficial de los gránulos.

### 3.2 Análisis morfológicos de los gránulos remanentes

Los estudios de microscopia de luz normal de los gránulos remanentes, que fueron sometidos a gelatinización superficial con cloruro de litio (tiempo de reacción de 1 h), no presentaron cambios significativos en su forma y tamaño, comparados con el almidón nativo (Fig. 3 A y C). Cuando esta muestra se observó bajo luz polarizada, los gránulos mostraron birrefringencia (indicativo de un orden molecular), por lo que el cloruro de litio no produjo ningún efecto sobre la estructura molecular de los gránulos remanentes (Fig. 3 D). Los resultados del análisis de difracción de rayos láser, para determinar el tamaño promedio de los gránulos remanentes, no mostraron un cambio en el tamaño de partícula promedio (dato

no mostrado) comparado con el almidón nativo, lo cual corrobora lo observado por microscopia. Sin embargo, una pérdida de muestra fue observada posterior al proceso de gelatinización superficial, ya que solo un 20% de muestra total (g de almidón, en base seca, b.s.) fue recuperada como gránulos remanentes. Estos resultados indican que el cloruro de litio provocó una gelatinización total de los gránulos de almidón, y que los gránulos remanentes que se pudieron recuperar, fueron gránulos que probablemente estaban aglomerados, que no tuvieron contacto con el agente químico, evitando su gelatinización superficial. Fue reportado que el cloruro de litio 13 M, utilizado para gelatinizar la superficie del almidón de maíz y papa, mostró mejores resultados que el cloruro de calcio 4 M, debido a que la superficie gelatinizada de los gránulos pudo ser desprendida efectivamente de los gránulos remanente (Pan y Jane, 2000). La elección del cloruro de litio 13 M para gelatinizar superficialmente el almidón de plátano se debió, a que este almidón presenta una alta resistencia a modificaciones con agentes químicos comparado con almidones de otras fuentes botánicas, por ejemplo maíz y papa (Sanchez-Rivera y col., 2013).

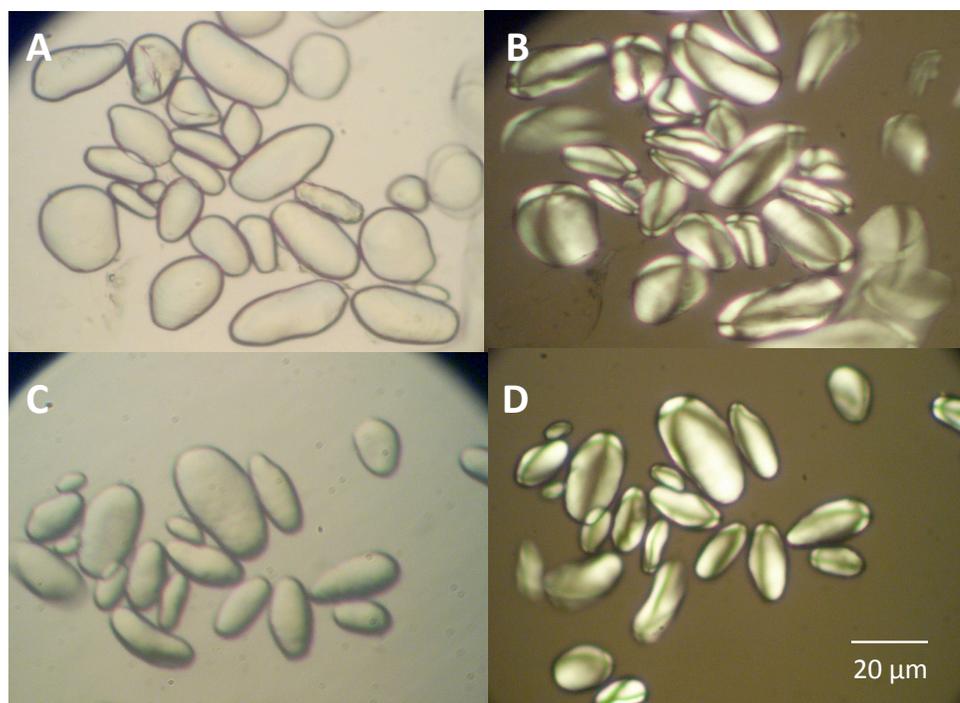


Fig. 3. Microscopia de luz transmitida y luz polarizada de almidón nativo de plátano (A y B) y gránulos remanentes después de la gelatinización superficial con cloruro de litio (C y D).

Tabla 1. Porcentaje de superficie gelatinizada, tamaño promedio de gránulos remanentes después de la gelatinización superficial con cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ )

Tiempo de reacción con (min)	Superficie gelatinizada (%)	Tamaño promedio de gránulo ( $\mu\text{m}$ ).
15	28	19
30	64	13
60	90	8
120	100	-

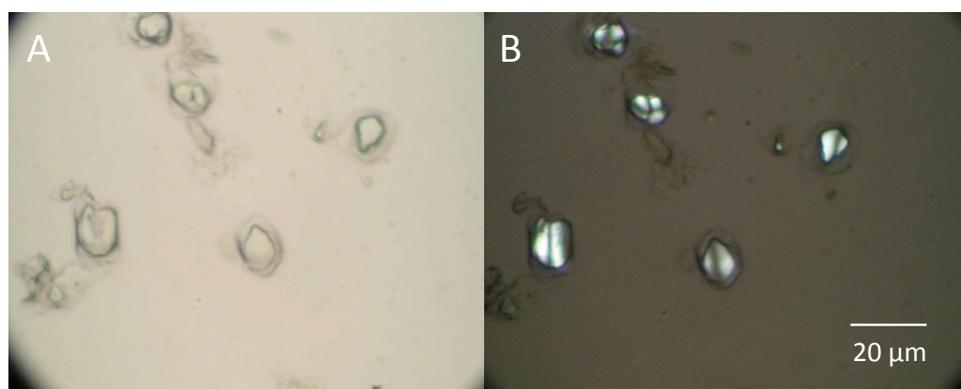


Fig. 4. Microscopía de luz transmitida (A) y luz polarizada (B) de gránulos remanentes después de gelatinizar con cloruro de calcio el 90% de la superficie.

Debido a los resultados obtenidos con el cloruro de litio, se planteó trabajar con una sal menos fuerte y a menor concentración (2 M) a la reportada en trabajos previos (Pan y Jane 2000; Kuakpetoon y Wang 2007). En la Tabla 1 se muestran los resultados del porcentaje de superficie gelatinizada a diferentes tiempos de reacción (15, 30, 60 y 120 min) con cloruro de calcio 2 M. Se encontró que el tratamiento con cloruro de calcio fue menos drástico que con el cloruro de litio. El porcentaje de superficie gelatinizada incrementó cuando incrementó el tiempo de reacción. Después de los 120 minutos se encontró que los gránulos fueron totalmente gelatinizados, ya que su porcentaje de superficie removida fue del 100%. La superficie gelatinizada va a depender del arreglo de los componentes dentro del gránulo de almidón, de la relación amilosa/amilopectina, así como del agente químico usado y el tiempo de reacción; por ejemplo, para obtener un 40 % de superficie removida en un almidón ceroso (alto en amilopectina), normal y alto en amilosa, se requirieron 20, 90 y 45 min, respectivamente (Kuakpetoon y Wang 2007). El tamaño de los gránulos disminuyó en función de la superficie removida, pero siguieron conservando la birrefringencia (Fig. 4). El tamaño promedio de los gránulos remanentes, obtenido a través de difracción

de rayo láser, mostró que de  $25 \mu\text{m}$  (tamaño promedio de los gránulos de almidón nativo de plátano) la reducción del tamaño del gránulo fue en el orden de 19, 13 y  $8 \mu\text{m}$  a los 15, 30 y 60 min de tiempo de reacción, respectivamente (Tabla 1). Estos resultados indican que la gelatinización con cloruro de calcio fue producida de la superficie del gránulo hacia el interior, removiendo progresivamente capas superficiales de los gránulos, conservando intacta de esta manera la estructura interna de los gránulos remanentes a diferentes niveles (en función del tamaño del gránulo remanente). Los primeros estudios sobre la gelatinización superficial de almidón reportan que algunas sales gelatinizan el almidón del interior al exterior del gránulo, mientras que otras sales lo hacen de manera inversa (Jane, 1993).

### 3.3 Contenido de amilosa en los gránulos remanentes

El contenido de amilosa en los gránulos remanentes da información acerca de su ubicación en la estructura granular. Los resultados muestran que el contenido de amilosa disminuyó en función de la superficie gelatinizada (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de amilosa, propiedades térmicas y porcentaje de cristalinidad de gránulos remanentes después de la gelatinización superficial con cloruro de litio (LiCl)

Superficie gelatinizada (%)	Contenido de amilosa (%)	Tp (°C)	$\Delta H$ (J/g)	Cristalinidad (%)
0 (nativo)	26.78 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>	79.98 $\pm$ 0.59 <sup>a</sup>	14.53 $\pm$ 0.93 <sup>a</sup>	33.8
28	22.34 $\pm$ 0.72 <sup>a</sup>	73.66 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>	14.56 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	33.5
64	20.59 $\pm$ 0.49 <sup>b</sup>	70.89 $\pm$ 1.67 <sup>c</sup>	10.65 $\pm$ 0.69 <sup>c</sup>	33.6
90	20.50 $\pm$ 0.68 <sup>c</sup>	69.90 $\pm$ 0.74 <sup>c</sup>	12.86 $\pm$ 0.85 <sup>b</sup>	33.5

Promedio de tres repeticiones  $\pm$  error estándar

Por lo que menos amilosa es concentrada en el centro del gránulo, este resultado concuerda con lo descrito en el mecanismo de biosíntesis del almidón, donde la amilosa es sintetizada después de la amilopectina, ubicándose en los espacios que quedan libres (principalmente entre los puntos de ramificación de la amilopectina o zonas amorfa, que son menos compactas) (Smith, 2001). Conforme se da el crecimiento granular, la periferia se va tornando menos compacta, por lo que más amilosa es sintetizada en la superficie. La misma tendencia fue encontrada en almidón de maíz y papa (Jane y Shen, 1993; Pan y Jane 2000). En controversia con los resultados obtenidos con el almidón de plátano, cuando almidones de maíz con diferente contenido de amilosa se sometieron a gelatinización superficial, se encontró que en maíz normal la amilosa fue ligeramente más concentrada en el interior del gránulo, mientras que en almidones altos en amilosa se concentró en la periferia (Kuakpetoon y Wang, 2007). Aunque existe la posibilidad de que durante la gelatinización superficial, la cual se realiza en un medio acuoso, las moléculas de amilosa que se encuentran en el interior de los gránulos, migren hacia la superficie, concentrándose en la periferia del gránulo.

### 3.4 Propiedades térmicas de los gránulos remanentes

La temperatura promedio de gelatinización (Tp), presentó tendencia a disminuir conforme más superficie gelatinizada fue removida del gránulo (Tabla 2). Una disminución de Tp (79 a 73 °C) se observó cuando se retiró la primera capa de superficie gelatinizada (28%), y posteriormente la disminución de la Tp fue en menor medida, 73°C, 70°C y 69°C en las muestras con 28%, 64% y 90% de superficie gelatinizada, respectivamente. Estos resultados indican, que las moléculas que se encuentra

en mayor proporción en la primera capa gelatinizada y removida del gránulo de almidón de plátano, pudieran tener un papel importante en la integridad del gránulo. Ha sido postulado que la amilosa se encuentra intercalada entre la matriz cristalina de la amilopectina, reforzando la integridad granular (Jane y col., 1999); estos resultados concuerdan con los valores de amilosa determinados en este trabajo, ya que al encontrarse ésta predominantemente en la periferia del gránulo, es eliminada cuando se removió el 28 % de superficie, lo cual pudiera desestabilizar las moléculas remanentes en el gránulo, por lo que fueron disociadas a menor temperatura. La entalpía de gelatinización ( $\Delta H$ ) es un indicativo de la calidad y perfección del cristal (Tester, 2004). La  $\Delta H$  fue de 14 J/g antes y después de gelatinizar el 28 % de la superficie del gránulo, pero cuando se gelatinizó más del 64% de la superficie, el valor disminuyó. El almidón de plátano presenta una mezcla de cristales compactos (tipo A) y cristales menos compactos (tipo B) (Espinoza Solis y col., 2011). Los resultados de  $\Delta H$  en este estudio podría depender del radio de estos dos polimorfismos dentro de la estructura granular, así como de su ubicación dentro de la estructura granular, el cual pudiera ser heterogéneo.

### 3.5 Difracción de rayos X

En la Figura 5 se muestra el patrón de difracción de la muestra de almidón nativo (como un ejemplo), ya que en las muestras gelatinizadas superficialmente no se observaron diferencias. Los almidones presentaron los picos característicos del patrón tipo B ( $2\theta = 5.6^\circ$ ) y del patrón tipo A ( $2\theta = 17^\circ$  y  $23^\circ$ ). Estos resultados podrían sustentar lo discutido en los estudios térmicos del almidón. O'Brien y Wang (2008), reportaron que en la lamela cristalina tipo A se encuentra puntos de ramificación, produciendo regiones "débiles", mientras que en el patrón tipo B estos puntos de ramificación se encuentran fuera

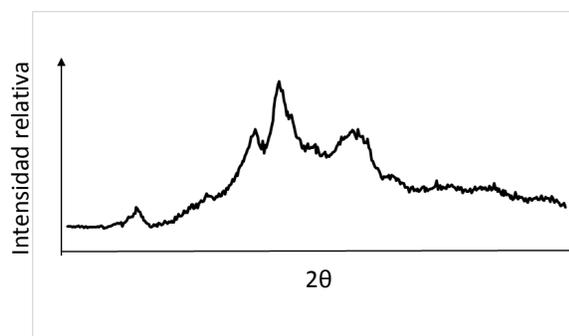


Fig. 5. Patrón de difracción de rayos X del almidón nativo de plátano.

de la lamela cristalina (zona amorfa), evitando su debilitamiento. El porcentaje de cristalinidad de los almidones presentó valores similares, por lo que la cristalinidad se mantuvo en los gránulos remanentes independientemente de la superficie gelatinizada.

## Conclusiones

El cloruro de calcio (2 M) provocó gelatinización superficial de los gránulos de almidón de plátano. El tamaño de los gránulos disminuyó en función del porcentaje de superficie gelatinizada. La amilosa fue más concentrada en la periferia del gránulo. La cantidad de amilosa en la superficie podría ser la responsable de la disminución de la  $T_p$  observada después de remover las primeras capas de superficie gelatinizada (28%). La heterogeneidad del polimorfismo A-B podría ser el responsable de los valores de entalpía de gelatinización. La gelatinización superficial del almidón de plátano ayudó a conocer la organización estructural de sus dos componentes principales (amilosa y amilopectina), lo cual es importante para explicar sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y de digestibilidad, así como su susceptibilidad a las modificaciones químicas y enzimáticas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico a COFAA-IPN y EDI-IPN. Uno de los autores (EAA) agradece el apoyo económico COTEBAL-IPN.

## Referencias

AACC. (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists* (10th ed.).

American Association of Cereal Chemist, St. Paul, MN. EUA.

Aparicio-Saguilan, A., Flores-Huicochea, E., Tovar, J., García-Suárez, F., Gutiérrez-Meraz, F. y Bello-Pérez, L.A. (2005). Resistant starch-rich powders prepared by autoclaving of native and litorized banana starch: partial characterization. *Starch/Stärke* 57, 405-412.

Dhital, S., Shrestha, A.K. y Gidley, M.J. (2010). Relationship between granule size and *in vitro* digestibility of maize and potato starches. *Carbohydrates Polymers* 480, 480-488.

Dhital, S., Shrestha, A. K., Hasjim, J. y Gidley, M. J. (2011). Physicochemical and structural properties of maize and potato starches as a function of granule size. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59, 10151-10161.

Englyst, H.N. y Cummings, J.H. (1986). Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiacal sapientum*) in the human small intestine. *The American Journal of Clinical Nutrition* 44, 42-50.

Espinoza-Solís, V., Jane, J.L. y Bello-Pérez, L.A. (2009). Physicochemical characteristics of starches from unripe fruits of mango and banana. *Starch/Stärke* 61, 291-299.

Espinoza-Solís, V., Sánchez-Ambriz, B., Hamaker, B. y Bello-Pérez, L.A. (2011). Fine structural characteristics related to digestion properties of acid-treated fruit starches. *Starch/Stärke* 63, 717-727.

Hermans, P.H. y Weidinger, A. (1948). Quantitative X-ray investigations on the crystallinity of cellulose fibers: a background analysis. *Journal of Applied Physics* 19, 491-506.

Jane, J.L. (1993). Mechanism of starch gelatinization in neutral salt solutions. *Starch/Stärke* 45, 161-166.

Jane, J., Chen, Y.Y., Lee, L.F., McPerson A.R., Wong K.S., Radosavljevic, M. y Kasemsuwan, T. (1999). Effect of amylopectin branch chain and amylose content on gelatinization and pasting properties. *Cereal Chemistry* 76, 629-937.

Kuakpetoon, D. y Wang, Y.J. (2007). Internal structure and physicochemical properties of corn starches as revealed by chemical surface

- gelatinization. *Carbohydrate Research* 42, 2253-2263.
- Núñez-Santiago, M.C., García-Suárez, F.J., Gutiérrez-Meraz, F., Sánchez-Rivera, M.M. y Bello-Pérez, L.A. (2011). Some intrinsic and extrinsic factors of acetylated starches: Morphological, physicochemical and structural characteristics. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10, 501-512.
- O'Brien, S. y Wang, Y.J. (2008). Susceptibility of annealed starches to hydrolysis by  $\alpha$ -amylase and glucoamylase. *Carbohydrate Polymers* 72, 597-607.
- Pan, D. D. y Jane, J. (2000). Internal structure of normal maize starch granules revealed by chemical surface gelatinization. *Biomacromolecules* 1, 126-132.
- Perez, S. y Bertof, E. (2010). The molecular structures of starch component and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/Stärke* 62, 389-420.
- Romero-Bastida, C.A., Zamudio-Flores, P.B. y Bello-Pérez, L.A. (2011). Antimicrobianos en películas de almidón oxidado de Plátano: Efecto sobre la actividad antibacteriana, microestructura, propiedades mecánicas y de barrera. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10, 445-453.
- Sánchez-Rivera, M.M., Almanza-Benítez, S., Bello-Pérez, L.A., Mendez-Montealvo, G., Santiago-Núñez, M.C. y Rodríguez-Ambriz, S.L. (2013). Acetylation of banana (*Musa paradisiaca* L.) and corn (*Zea mays* L.) starches using a microwave heating procedure and iodine as a catalyst: II. Rheological and structural studies. *Carbohydrate Polymers* 92, 1256-1261.
- Smith, A.M. (2001). The biosynthesis of the starch granule. *Biomacromolecules* 2, 335-341.
- Tester, R., Karkalas, J. y Qi, X. (2004). Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science* 39, 151-165.
- Wang, L.Z. y White, P.L. (1994). Functional properties of oat starches and relationships among functional and structural characteristics. *Cereal Chemistry* 71, 451-458.
- Whistler, R. L. (1998). *Banana starch production*. Patent 5,797,985. West Lafayette Ind.
- Zamudio-Flores, P.B. y Bello-Pérez, L.A. (2013). Elaboración y caracterización de películas de glicoproteínas obtenidas mediante reacción de Maillard utilizando almidón acetilado y aislado proteico de suero lácteo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 401-413.