



**EFFECTO DEL GRADO DE ACETILACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y FISCOQUÍMICAS DEL ALMIDÓN DE PLÁTANO**

**EFFECT OF THE ACETYLATION DEGREE ON THE MORPHOLOGICAL AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BANANA STARCH**

M. Rivas-González<sup>1</sup>, P. B. Zamudio-Flores<sup>2</sup> y L. A. Bello-Pérez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Posgrado de la Facultad de Química. Cerro de las Campanas s/n. Col. las Campanas. C.P., 76010, Querétaro, Querétaro, México. Teléfono: 01 442 192 13 04, Fax: 01 442 192 13 07.

<sup>2</sup>Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del IPN, Km 8.5 carr. Yautepec-Jojutla, colonia San Isidro, apartado postal 24 C.P., 62731, Yautepec, Morelos, México.

Recibido 16 de Mayo 2009; Aceptado 30 de Septiembre 2009

**Resumen**

El almidón nativo de plátano (APN) acetilado con bajo grado de sustitución (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS) fue caracterizado morfológica y fisicoquímicamente. Se corroboró el grado de acetilación del almidón mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier, encontrándose una señal a  $1740\text{ cm}^{-1}$  que corresponde al estiramiento C-O de los grupos acetilos. El estudio morfológico mostró un mayor daño de los gránulos de almidón con alto grado de sustitución. Este efecto fue evidente en la prueba de formación de pastas debido a que el perfil del almidón APAAGS no presentó el pico de viscosidad máxima, ni los parámetros del rompimiento ni la reorganización de la viscosidad. La temperatura de gelatinización promedio fue similar para el APN y el APABGS, y disminuyó en el APAAGS. La entalpía de gelatinización fue menor en el APAAGS, indicando más desorganización de las dobles hélices de las cadenas de la amilopectina debido al mayor grado de acetilación. Cuando se incrementó el grado de acetilación disminuyó la tendencia a la retrogradación. Los almidones de plátano con diferentes grados de acetilación presentan propiedades fisicoquímicas que pueden ser aprovechadas para diferentes aplicaciones.

**Palabras clave:** almidón de plátano; acetilación; morfología; propiedades térmicas; propiedades fisicoquímicas.

**Abstract**

The morphological and physicochemical characterization of acetylated banana starch with low (ABSLDS) and high (ABSHDS) degree of acetylation was carried out. Fourier transformed infrared spectroscopy indicated that banana starch showed a band at  $1740\text{ cm}^{-1}$  that corresponds to stretching of C-O in the acetyl groups. Morphological studies demonstrated that a higher damage in the starch granules occurred as the degree substitution was higher. This effect was more notorious in the pasting profile because the ABSHDS did not exhibit the viscosity peak, breakdown and setback parameters. The average gelatinization temperature was similar in the native sample and in the ABSLDS, but was lower in the ABSHDS. The enthalpy of gelatinization was low in the ABSHDS, indicating a higher disorganization of the double helices in the amylopectin due to higher degree of acetylation. As the degree of acetylation increased the retrogradation decreased. Banana starch with different acetylation degrees possess varied physicochemical properties that provide them with potentially wide applications spectra.

**Keywords:** banana starch; acetylation; morphology; thermal properties; physicochemical properties.

**1. Introducción**

El almidón constituye la principal reserva alimenticia para la dieta humana y puede tener diversas aplicaciones en la elaboración de muchos productos industriales. Sin embargo, los almidones en su estado nativo presentan limitaciones que reducen su potencial de uso. Estas limitaciones se

deben a su baja resistencia al esfuerzo de corte durante el mezclado, baja estabilidad térmica, alta tendencia a la retrogradación y sinéresis (Betancur-Ancona y col., 1997; Singh y Singh, 2005). El almidón puede ser aislado de diversas fuentes vegetales como son cereales, leguminosas, tubérculos y frutas. En el caso de las frutas, la concentración de almidón varía con el estado de

\* Autor para la correspondencia. E-mail: labellop@ipn.mx  
Fax 01 735 394 18 96

madurez y constituye una fuente alternativa para su aislamiento (Guerra-Della Valle y col., 2008). El fruto del plátano macho (*Musa paradisiaca* L.) es un claro ejemplo de este comportamiento, ya que en estado inmaduro la concentración de almidón llega hasta un 70-80 % en base seca (Guerra-Della Valle y col., 2008; Bello-Pérez y col., 1999). Las limitaciones funcionales del almidón nativo pueden ser superadas realizando una modificación química. Se pueden realizar numerosas modificaciones químicas al almidón para impartirle propiedades útiles en aplicaciones específicas como en la industria de papel, la elaboración de textiles, la formulación de alimentos y en la elaboración de películas o empaques biodegradables (Morton y Solarek, 1984; Kuakpetoon y Wang, 2006; Sánchez-Rivera y Bello-Pérez, 2008; Zamudio-Flores y col. 2007). La acetilación es un tipo de modificación química la cual consiste en la esterificación de los polímeros de almidón con grupos acetilo (Singh y Singh, 2005). Los almidones acetilados presentan mejores propiedades sobre los almidones nativos y se han utilizado para impartir estabilidad y resistencia a la retrogradación (Wurzburg, 1986).

El objetivo de este estudio fue acetilar con bajo y alto grado de sustitución al almidón de plátano y evaluar sus propiedades morfológicas y fisicoquímicas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Materiales

Se utilizaron plátanos macho (*Musa paradisiaca* L.) en estado fisiológico inmaduro los cuales se adquirieron en el mercado local de Cuautla, Morelos, México. Para seleccionar los plátanos se tomó el criterio de que si la cáscara en su totalidad fuese de color verde sin ningún área amarilla.

### 2.2 Aislamiento del almidón

El almidón nativo se aisló a nivel planta piloto utilizando el método propuesto por Flores-Gorosquera y col. (2004).

### 2.3 Acetilación del almidón

La acetilación de los almidones se realizó mediante la metodología propuesta por Mark y Mehltretter, 1972 con algunas modificaciones. Se pesaron 50 g de almidón en base seca (bs), se mezclaron con 400 mL de anhídrido acético (Reasol, D. F., México) dentro de un matraz con 3 bocas, se agitó a 200 rpm con un mezclador (Ika-Werke, Cincinnati, Oh.), después se homogenizó durante 5 min, se agregaron 7.5 g de NaOH por gramo de almidón. La temperatura se incrementó a 120 °C (en un baño con aceite), al llegar a esta temperatura se contabilizó el tiempo de reacción (30 min y 5 h para obtener los almidones con bajo y alto grado de sustitución

respectivamente). Al finalizar el tiempo se retiró el matraz del baño y la temperatura se disminuyó a 50° C; posteriormente se precipitó el almidón con 300 mL de alcohol etílico al 96 %. La solución resultante fue centrifugada lavando el residuo con alcohol y posteriormente con agua hasta eliminar la mayor parte de anhídrido acético. Después de los lavados, la pasta de almidón fue secada en una estufa a una temperatura de 50 °C durante 24 h. Finalmente el almidón modificado se molió y tamizó con una malla de 50 (US) con el fin de obtener un tamaño de partícula homogénea.

### 2.3 Determinación de grupos acetilo ( $\text{CH}_3\text{-C=O}$ )

Para la determinación de los grupo acetilo se utilizó la metodología reportada por Wurzburg, 1986, la cual consistió en lo siguiente, se pesó 1 g de almidón nativo y modificado (bs) y se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Se le agregaron 50 mL de agua destilada, unas gotas de fenolftaleína y se neutralizó con NaOH 0.1 N hasta que permaneció un color ligeramente rosado. Después se le adicionaron 25 mL de NaOH 0.45 N y se agitó vigorosamente la suspensión con un agitador magnético durante 30 min. Transcurrido el tiempo, las muestras saponificadas se titularon con HCl 0.2 N utilizando fenolftaleína como indicador. Se valoró al mismo tiempo un blanco, usando el almidón nativo.

El porcentaje de acetilos representó el porcentaje en peso de los grupos acetilos en el almidón en base seca y se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ acetil} = \frac{(\text{mL blanco}) - (\text{mL muestra}) \times N \text{ del HCl} \times 0.043 \times 100}{\text{gramos de la muestra (base seca)}}$$

Donde:

0.043 = miliequivalentes del grupo acetilo

### 2.4 Determinación del grado de sustitución (GS)

El grado de sustitución (GS) es el número promedio de grupos acetilos introducidos por unidad de glucosa y se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Grado de sustitución (GS)} = \frac{162 \times \% \text{ acetil}}{4300 - (42 \times \% \text{ acetil})}$$

Donde: 162 = Peso molecular de la unidad de anhidro glucosa.

4300 = 100 x peso molecular del grupo acetilo

42 = Peso molecular del grupo acetilo - 1

### 2.5 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (EITF)

Se determinó el espectro de infrarrojo del almidón nativo y del almidón acetilado utilizando el método reportado por Pushpamalar y col. (2006), para lo cual se mezcló la muestra seca con KBr en una relación de almidón/KBr 1:4. Se prensó la mezcla para obtener una pastilla y se introdujo en un espectrofotómetro (MIDAC, prospect 269, Costa Mesa, CA) equipado con un sistema de pastilla de

KBr y sistema de reflectancia total atenuada a una temperatura de  $25 \pm 2$  °C. Para cada muestra se colectaron 32 barridos con una resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$  y de éstos se obtuvo un valor promedio. Se trabajó en la región de 400 a  $4000 \text{ cm}^{-1}$ . De cada muestra se realizó un cuadruplicado.

## 2.6 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Se utilizó el método reportado por Paredes-López y col. (1989). La muestra de almidón se espolvoreó sobre una cinta conductora de cobre de doble adhesión, la cual se fijó previamente en un soporte de aluminio del microscopio electrónico de barrido JEOL (modelo JSEM 35CX, Electronic Optic mal limited, Japón). La muestra se cubrió con una capa de carbón de 30 nm. Las muestras se colocaron en un ionizador de metales JEOL y se recubrieron con una capa de oro de 60 nm. Posteriormente, se observaron al microscopio electrónico de barrido a un voltaje de 8 kV y se tomaron las fotografías.

## 2.7 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de gelatinización y retrogradación se evaluaron utilizando el método reportado por Paredes-López y col. (1994). Se pesaron 2.3 mg de muestra en base seca en una charola de aluminio y se adicionaron 7.7  $\mu\text{L}$  de agua de destilada. La charola se selló herméticamente y posteriormente se dejó estabilizar durante 2 h antes de llevar a cabo el análisis. Se utilizó una charola de aluminio vacía como referencia. Las muestras se sometieron a un programa de calentamiento en un intervalo de temperatura de 25 a 140 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Las muestras gelatinizadas se almacenaron durante 7 d, posteriormente se realizó el barrido de temperatura de 15 a 180 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. La temperatura de inicio ( $T_i$ ), pico ( $T_p$ ), final ( $T_f$ ) de gelatinización y retrogradación, así como la entalpía de transición ( $\Delta H$ ) se obtuvieron mediante el uso del programa TA instruments OS/2 versión 2.1.

## 2.8 Formación de pastas

Para determinar el perfil de viscosidad de las dispersiones de los almidones, se empleó la técnica (61-02) propuesta por la AACC (2000). Se prepararon dispersiones al 10 % (p/v) en base seca; de estas muestras se tomaron 100 mL y se transfirieron al tazón del microviscoamilógrafo (marca Brabender OHG, Duisburg, Alemania). Se programó el equipo con un ciclo de calentamiento-cocción-enfriamiento, de 30 °C hasta 95 °C, se mantuvo a esa temperatura por 10 min, posteriormente se enfrió hasta 40 °C manteniéndose a esta temperatura por 10 min. Se empleó una velocidad de calentamiento-enfriamiento durante

todo el ciclo de 2.5 °C/min y una velocidad de tazón de 125 rpm.

## 2.9 Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza de una vía (ANOVA) al nivel de significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ) utilizando el programa estadístico SigmaStat para Windows versión 2.03 (Fox y col., 1995), y cuando se encontraron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (Walpole y col., 1999).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Porcentaje de grupos acetilo y grado de sustitución de los almidones acetilados

En la muestra de almidón de plátano nativo (APN) no se cuantificaron grupos acetilo y tampoco presentó grado de sustitución (GS). El GS está en función del contenido de grupos acetilo y por tal razón no se cuantificó en esta muestra. Los almidones acetilados de bajo (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS) presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en el porcentaje del contenido de grupos acetilo y en el grado de sustitución (Tabla 1). El porcentaje de grupos acetilo se incrementó significativamente de 17.2 % en la muestra APABGS a 22.6 % en la muestra APAAGS, mientras que el GS se incrementó de igual manera de 0.78 a 1.09, para las muestras APABGS y APAAGS, respectivamente. Esta diferencia se debió al mayor tiempo de reacción utilizado en la modificación del APAAGS, lo cual provocó que una mayor cantidad de grupos acetilos se introdujeran en la molécula del almidón. Liu y col. (1997) reportaron un contenido de grupos acetilo de 2.71 a 4.22 % y un GS de 0.11-0.17 en almidones acetilados de maíz utilizando anhídrido acético al 10 % y una dispersión de almidón al 31 %. En almidón de *Canavalia ensiformis* acetilado con anhídrido acético al 8 % con diferentes condiciones, se cuantificó un contenido de grupos acetilos entre 1.5 y 2.3 % y un GS entre 0.057 y 0.091 (Betancur-Ancona y col. 1997). El contenido de grupos acetilo y el GS de los almidones acetilados depende de la fuente vegetal y de la estructura granular del almidón nativo (Singh y col., 2004a).

Tabla 1. Contenido de grupos acetilo y grado de sustitución del almidón de plátano nativo (APN) y acetilado con bajo (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS)\*.

Muestra	Grupos acetilo (%)	Grado de sustitución
APN	NC	NC
APABGS	$17.20 \pm 0.30^a$	$0.78 \pm 0.03^a$
APAAGS	$22.58 \pm 0.41^b$	$1.09 \pm 0.02^b$

\*Valores promedio de tres repeticiones  $\pm$  error estándar.

Valores con letras diferentes en la columna presentan diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ).

NC = No cuantificado.

### 3.2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (EITF)

El análisis de EITF se realizó para conocer si hubo formación de grupos funcionales durante la acetilación a las diferentes condiciones. El almidón nativo presentó bandas (Fig. 1) que corresponden al estiramiento de los principales grupos característicos de la molécula de almidón (Mano y col., 2003). Los almidones de plátano acetilados a bajo (APABGS) y a alto grado de sustitución (APAAGS) presentaron bandas en el intervalo entre  $900 - 1250 \text{ cm}^{-1}$  que corresponden al estiramiento del grupo C-O, la señal a  $1226 \text{ cm}^{-1}$  corresponde específicamente al estiramiento de los grupos acetilo C-O (Colthup y col., 1990). Esta señal fue similar en las muestras de almidón nativo y APABGS, e incrementó en la muestra APAAGS, indicando que solamente algunos grupos acetilos se introdujeron en la muestra APABGS. Cuando se llevó a cabo la reacción de acetilación en la molécula de almidón, se observó una disminución en las señales correspondientes a las vibraciones por estiramientos ( $3000-3900 \text{ cm}^{-1}$ ) y a las vibraciones por doblamiento ( $1650 \text{ cm}^{-1}$ ) del grupo O-H debido a la introducción de los grupos acetilo en el almidón, corroborando que se realizó la acetilación en el almidón de plátano. Adicionalmente, se observó un incremento en la señal a  $1740 \text{ cm}^{-1}$  en la muestra con mayor grado de sustitución en comparación con el almidón acetilado a bajo grado. Esta señal es característica de los modos vibracionales en los grupos carbonilo presentes en el almidón acetilado (Xu y col., 2004; Xu y Hanna, 2005; Colthup y col., 1990; Adebajo y Frost, 2004; Aziz y col., 2004). La señal a  $2950 \text{ cm}^{-1}$  correspondió a los estiramientos CH de la unidad de anhidro glucosa de la molécula de almidón (Xu y col. 2004).

### 3.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la Fig. 2 se muestran las micrografías electrónicas de barrido del almidón nativo y de los almidones acetilados.

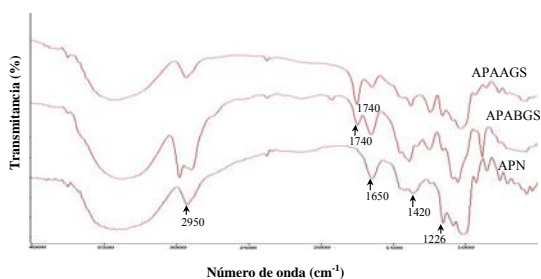


Fig.1. Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) del almidón de plátano nativo (APN) y acetilado con bajo (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS).

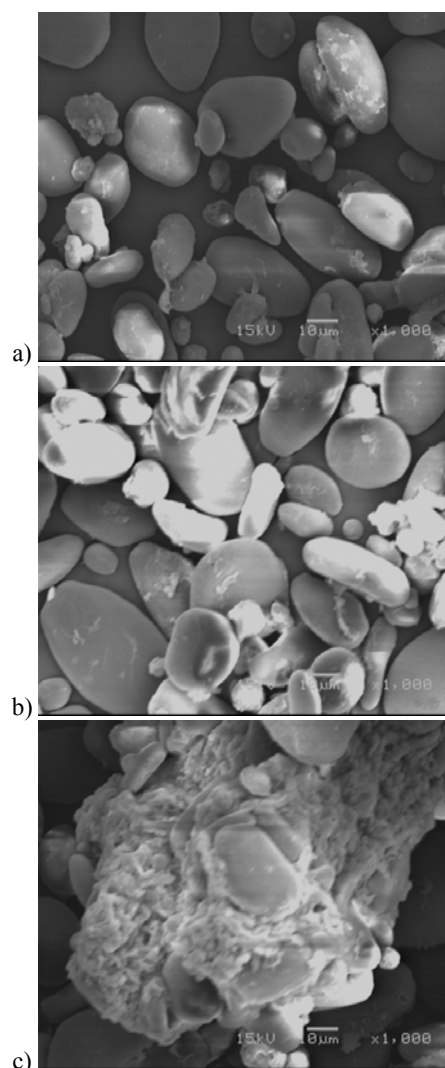


Fig. 2. Fotografías de microscopía electrónica de barrido del almidón de plátano a) nativo (APN); b) acetilado con bajo grado de sustitución (APABGS) y c) acetilado con alto grado de sustitución (APAAGS).

Se observaron ligeras variaciones en el tamaño y forma de los granos en el almidón APABGS (Fig. 2b) con respecto al almidón nativo (APN) (Fig. 2a). Cuando el grado de sustitución incrementó en el almidón APAAGS el efecto fue más notorio, debido a una evidente fusión de los granos (Fig. 2c). Sin embargo, granos de almidón acetilado de bajo grado de sustitución de maíz y papa también presentaron fusión (Singh y col., 2004a), por lo que el almidón de plátano presenta mayor resistencia a esta modificación. Singh y col. (2004b) reportaron que el incremento en la concentración de anhídrido acético produjo mayor fusión de los granos y que la fusión del gránulo después de la acetilación se atribuyó a la introducción de grupos hidrofílicos en la molécula de almidón. Por lo tanto, la coalescencia

de las moléculas de almidón resultó en la fusión de los gránulos.

### 3.4 Análisis térmico

El almidón de plátano acetilado con bajo y alto grado de sustitución mostró disminución en las temperaturas de inicio ( $T_i$ ), de pico ( $T_p$ ) y en la entalpía de gelatinización, mientras que en la temperatura final ( $T_f$ ) no se observó diferencia significativa ( $p>0.05$ ) en comparación con la muestra de APN (Tabla 2). La gelatinización del almidón es controlada, en parte, por la estructura molecular de la amilopectina (perfección y orden de los cristales, longitud de sus cadenas, grado de ramificación) así como también por la relación de las zonas cristalinas y amorfas (Tester y Morrison, 1990). En este mismo sentido, el valor de entalpía refleja la pérdida del orden de las dobles hélices más que de la cristalinidad.

Muestra	$T_i$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
APN	68.32 $\pm 0.11^a$	73.95 $\pm 0.04^a$	88.71 $\pm 0.60^a$	12.78 $\pm 0.69^a$
APABGS	64.07 $\pm 0.72^b$	71.11 $\pm 0.09^b$	89.22 $\pm 0.28^a$	10.49 $\pm 0.73^b$
APAAGS	63.25 $\pm 0.29^b$	70.73 $\pm 0.11^c$	88.71 $\pm 0.38^a$	7.76 $\pm 0.55^c$

\*Valores promedio de tres repeticiones  $\pm$  error estándar.

Valores con letras diferentes en la columna presentan diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ).

$T_i$  = Temperatura de inicio;  $T_p$  = Temperatura de pico de gelatinización;  $T_f$  = Temperatura final;  $\Delta H$  = Entalpía de gelatinización.

Tabla 3. Propiedades térmicas de retrogradación del almidón de plátano nativo (APN) y acetilado con bajo (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS)\*.

Muestra	$T_i$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
APN	48.55 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	58.37 $\pm$ 0.22 <sup>a</sup>	71.65 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	9.2 $\pm$ 1.4 <sup>a</sup>
APABGS	46.66 $\pm$ 0.36 <sup>b</sup>	58.71 $\pm$ 0.07 <sup>a,b</sup>	69.12 $\pm$ 0.95 <sup>a,b</sup>	7.07 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>
APAAGS	47.71 $\pm$ 0.79 <sup>a,b</sup>	57.53 $\pm$ 0.51 <sup>b</sup>	67.75 $\pm$ 0.73 <sup>b</sup>	4.29 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>

\*Valores promedio de tres repeticiones  $\pm$  error estándar.

Valores con letras diferentes en la columna presentan diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ).

$T_i$  = Temperatura de inicio;  $T_p$  = Temperatura de pico de retrogradación;  $T_f$  = Temperatura final;  $\Delta H$  = Entalpía de retrogradación.

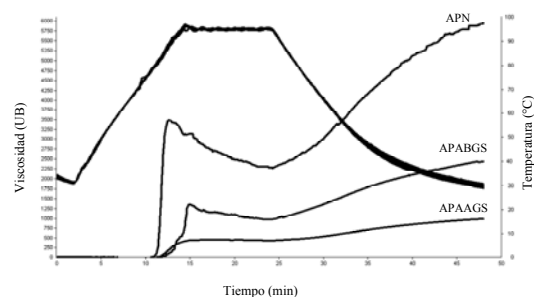


Fig. 3. Perfiles de viscosidad del almidón de plátano nativo (APN) y acetilado con bajo (APABGS) y alto grado de sustitución (APAAGS).

dad (Cooke y Gidley, 1992). Por lo tanto, se postuló que el valor de la entalpía de gelatinización es afectado por el tamaño del gránulo y por la relación amilosa/amilopeptina más que la cantidad y la calidad de los cristales (Ahmad y col., 1999; Tester, 1997). La diferencia en el valor de la entalpía entre el APABGS y su contraparte nativa refleja una desorganización parcial producida por la reacción de acetilación. En el APAAGS se observaron más cambios significativos en la temperatura y entalpía de gelatinización corroborando que la acetilación del almidón de plátano con alto grado de sustitución produjo una desorganización como se mostró por EITF, MEB y formación de pastas. Los cambios en las propiedades térmicas pueden ser atribuidos a la presencia de grupos sustituyentes hidrofílicos y al incremento en enlaces de hidrógeno en las moléculas de almidón, lo cual disminuyó la temperatura de gelatinización (Singh y col., 2004b; Eliasson y col., 1988; Hoover y Sosulski, 1985; Liu y col., 1997). Estos resultados coinciden con lo reportado por Wootton y Bamunuarachchi (1979) quienes sugirieron que la introducción de grupos acetilo dentro de las cadenas de polímeros resultó en la desestabilización de la estructura granular, y como consecuencia incrementó la capacidad de hinchamiento y disminuyó la temperatura de gelatinización.

En la Tabla 3 se muestran las características de retrogradación del almidón de plátano nativo y acetilado analizados a 7 días de almacenamiento después de su gelatinización. En general, las temperaturas  $T_i$ ,  $T_p$ , y  $T_f$  no presentaron diferencias ( $p>0.05$ ) entre las tres muestras analizadas, pero si en el valor de la entalpía asociada a esta transición de fase. Una mayor entalpía indica que el almidón se reorganizó en mayor cantidad y por lo tanto esta más retrogradado. La acetilación produjo una disminución en la retrogradación del almidón, la cual fue mayor cuando se incrementó el grado de acetilación. La mayor cantidad de grupos acetilo en las cadenas de almidón con la concomitante disminución de los grupos OH en las cadenas del almidón, disminuyó las interacciones almidón-almidón y por lo tanto el nivel de retrogradación (Singh y Singh, 2005). Dependiendo del nivel de

acetilación se pueden sugerir aplicaciones para el almidón de plátano modificado.

### 3.5 Perfil de viscosidad

Durante la etapa de calentamiento (30 a 95 °C), la viscosidad (UB) se incrementó gradualmente hasta obtener un valor máximo (pico máximo de viscosidad) (Fig. 3). Cuando el almidón es calentado en exceso de agua, los gránulos se hinchan y al mismo tiempo, parte de sus componentes se solubilizan, originando una suspensión de partículas en una fase continua (Thebaudin y col., 1998). El valor de viscosidad máxima del almidón nativo de plátano fue de aproximadamente de 3500 UB, presentándose a una temperatura de 92 °C, el almidón APABGS presentó un patrón similar, pero mostró menor viscosidad máxima (aproximadamente 1350 UB), y en el caso del APAAGS no se presentó un pico de viscosidad máxima definido, pero se obtuvo un valor máximo de 500 UB. Estos resultados están de acuerdo con el ligero cambio producido durante la modificación química del APABGS y la mayor modificación en el APAAGS, como se mostró en los estudios de EITF y MEB. Durante la etapa de sostenimiento a 95 °C, la viscosidad disminuyó (disociación del gránulo), y durante la etapa de enfriamiento (reasociación) se observó un incremento en la viscosidad debido a la reorganización de las cadenas lineales (principalmente amilosa) solubilizadas durante las etapas de calentamiento y de mantenimiento isotérmico, que origina un mayor número de enlaces entrecruzados durante el proceso de formación del gel (Gimeno y col., 2004; Mali y col., 2003). En el caso de los almidones acetilados la viscosidad en las etapas de disociación y reasociación fue menor en comparación con el almidón nativo, debido a que los grupos acetilos introducidos impiden la reorganización de las cadenas de almidón, como fue observado en el estudio de retrogradación.

### Conclusiones

Se obtuvo almidón de plátano acetilado con bajo y alto grado de sustitución lo cual fue corroborado mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier. La acetilación modificó las características morfológicas del gránulo de almidón y disminuyó la temperatura y entalpía de gelatinización. El efecto fue mayor cuando se incrementó el grado de acetilación afectándose la retrogradación y formándose pastas con menor viscosidad de pico y geles con menor consistencia.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico de la SIP-IPN, COFAA-IPN y EDI-IPN. Uno de los autores (MRG) también agradece la beca de doctorado del CONACYT.

### Referencias

- AACC. (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist* (10<sup>th</sup> ed.). American Association of Cereal Chemist, St. Paul, Mn.
- Adebajo, M.O. y Frost, R.L. (2004). Acetylation of raw cotton for oil spill cleanup application: an FTIR and <sup>13</sup>C MAS NMR spectroscopic investigation. *Spectrochimica Acta Part A* 60, 2315–2321.
- Ahmad, F.B., Williams, P.A., Doublier, J.-L., Duran, S. y Buléon, A. (1999). Physico-chemical characterization of sago starch. *Carbohydrate Polymers* 38, 361-370.
- Aziz, A., Daik, R., Ghani, M.A., Daud, N.I.N. y Yamin, B.M. (2004). Hydroxypropylation and acetylation of sago starch. *Malaysian Journal of Chemistry* 6, 48-54.
- Bello-Pérez, L.A., Agama-Acevedo, E., Sánchez-Hernández, L. y Paredes-López, O. (1999). Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47, 854-857.
- Betancur-Ancona, D., Chel-Guerrero, L. y Canizares-Hernández E. (1997). Acetylation and characterization of *Canavalia ensiformis* starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45, 378-382.
- Colthup, N., Daly, L.H. y Wiberley, S.E. (1990). *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*. Pp. 254–309. Academic Press. USA.
- Cooke, D. y Gidley, M.J. (1992). Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. *Carbohydrate Research* 227, 103-112.
- Eliasson, A.C., Finstand, H. y Ljunger, G. (1988). A study of starch lipid interactions of some native and modified maize starches. *Starch/Stärke* 40, 95-100.
- Flores-Gorosquera, E., García-Suárez, F.J., Flores-Huicochea, E., Nuñez-Santiago, M.C., González-Soto, R.A. y Bello-Pérez, L.A. (2004). Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*). Estudio en planta piloto. *Acta Científica Venezolana* 55, 86-90.
- Fox, E., Shotton, K. y Urlich, C. (1995). *Sigma Stat: Manual de Usuario*, Versión 2.1 para Windows 95, NT y 3.1, (Sandel Co., ed.), USA.
- Gimeno, E., Moraru, C.I. y Kokini, J.L. (2004). Effect of xanthan gum and CMC on the structure and texture of corn flour pellets expanded by microwave heating. *Cereal Chemistry* 81, 100-107.
- Guerra-Della Valle, D., Bello-Pérez, L.A., González-Soto, R.A., Solorza-Feria, J. y Arámbula-Villa, G. (2008). Effect of reaction time on

- the acetylation of plantain starch. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 7(3), 283-291.
- Hoover, R. y Sosulski, F. (1985). A comparative study of the effect of acetylation on starches of *Phaseolus vulgaris* biotypes. *Starch/Stärke* 12, 397-404.
- Kuakpetoon, D. y Wang, Y.J. (2006). Structural characteristics and physicochemical properties of oxidized corn starches varying in amylose content. *Carbohydrate Research* 341(11), 1896-1915.
- Liu H., Ramsden L. y Corke H. (1997). Physical properties and enzymatic digestibility of acetylated ae, wx, and normal corn starch. *Carbohydrate Polymers* 34, 283-289.
- Mali, S., Ferrero, C., Redigonda, V., Belia, A.P., Grossman, M.V.E. y Zaritzky, N.E. (2003). Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Dioscorea alata*) starch pastes stability. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 36, 475-481.
- Mano, J.F., Koniárova, D. y Reis, R.L. (2003). Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine* 14(2), 127-135.
- Mark, A.M. y Mehlretter, C.L. (1972). Facile preparation of starch triacetates. *Starch/Stärke* 24, 73-76.
- Morton R. W. y Solarek D. (1984). Starch derivatives: Production and uses. In: *Starch Chemistry and Technology*, (R. L. Wistler, J. N. BeMiller, y E. F. Paschall, eds.), Pp. 311-366. Academic Press, New York.
- Paredes-López, O., Bello-Pérez, L.A. y López, M.G. (1994). Amylopectin: structural gelatinization and retrogradation studies. *Food Chemistry* 50, 411-418.
- Paredes-López, O., Schevenin, M.L., Hernández-López, D. y Cárbaz, A. (1989). Amaranth starch isolation and partial characterization. *Starch/Stärke* 41, 205-209.
- Pushpamalar, V., Langford, S.J., Ahmad, M. y Lim, Y.Y. (2006). Optimization of reaction conditions for preparing carboxymethyl cellulose from sago waste. *Carbohydrate Polymers* 64, 312-318.
- Sánchez-Rivera, M.M. y Bello-Pérez, L.A. 2008. Effect of temperature in the oxidation reaction of banana starch (*Musa paradisiacal* L.). Activation energy determination. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 7(3), 275-281.
- Singh, J., Kaur, L. y Singh, N. (2004a). Effect of acetylation on some properties of corn and potato starches. *Starch/Stärke* 56, 586-601.
- Singh, N., Chawla, D. y Singh, J. (2004b). Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch. *Food Chemistry* 86, 601-608.
- Singh, N.S. y Singh, N. (2005). Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. *Journal of Food Engineering* 70, 117-127.
- Tester, R.F. (1997). Influence of growth conditions on barley starch properties. *International Journal of Biological Macromolecules* 21, 37-45.
- Tester, R.F. y Morrison, W.R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches, I. Effect of amylopectin, amylose and lipids. *Cereal Chemistry* 67, 551-557.
- Thebaudin, Y.J., Lefebvre, A.C. y Doublier, J.L. (1998). Rheology of starch pastes from starches of different origins: applications to starch-based sauces. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 31, 354-360.
- Walpole, E., Myers, H. y Myers, L. (1999). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, México.
- Wootton, M. y Bamunuarachchi, A. (1997). Application of DSC to starch gelatinization. *Starch/Stärke* 31, 201-204.
- Wurzburg, O.B. (1986). *Modified Starches: Properties and Uses*. CRC Press, Inc. Pp. 1-227. Boca Raton, Florida.
- Xu, Y. y Hanna, M.A. 2005. Preparation and properties of biodegradable foams from starch acetate and poly (tetramethylene adipate-co-terephthalate). *Carbohydrate Polymers* 59, 521-529.
- Xu, Y., Miladinov, V. y Hanna, M.A. (2004). Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry* 81(6), 735-740.
- Zamudio-Flores, P.B., Bello-Pérez, L.A., Vargas-Torres, A., Hernández-Urbe, J.P. y Romero-Bastida, C.A. (2007). Partial characterization of films prepared with oxidized banana starch. *Agrociencia* 41, 837-844.