

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE ALMIDONES DE MANGO Y PLÁTANO PREGELATINIZADOS MEDIANTE DIFERENTES CONDICIONES DE EXTRUSIÓN

CHARACTERIZATION OF PREGELATINIZED BLENDS OF MANGO AND BANANA STARCHES WITH DIFFERENT EXTRUSION CONDITIONS

Nancy Manrique-Quevedo¹, Rosalía A. González-Soto¹, Madian Othman-Abu-Hardan²,
Francisco J. García-Suárez¹ y Luis A. Bello-Pérez¹

¹Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del IPN. Km. 8.5 Carretera Yautepec-Jojutla. 62731. Colonia San Isidro. Yautepec, Morelos, México (labellop@ipn.mx). ²Division of Food Sciences. University of Nottingham. Sutton Bonington Campus. Loughborough LE12 5RD, UK.

RESUMEN

Se prepararon almidones pregelatinizados (AP) a partir de mezclas de almidones de plátano y mango usando un extrusor de doble tornillo. Las variables independientes fueron ambos almidones y la velocidad del tornillo. Se estudiaron las características moleculares de los AP mediante difracción de rayos X y espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier. También se determinó grado de gelatinización, índice de absorción en agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), y el contenido de almidón resistente (AR). Los almidones nativos de plátano y mango presentaron un patrón de difracción de rayos X tipo C y A, el cual se perdió en el proceso de extrusión. Estos resultados se corroboraron con el estudio de espectroscopia de infrarrojo, ya que la relación de absorbancias en los AP fue <1 , indicando que se perdió la cristalinidad. El IAA y el ISA aumentaron a medida que la velocidad del tornillo y el porcentaje de almidón de mango en la mezcla se incrementaron. Se obtuvo una gelatinización casi completa en todas las muestras extrudidas. El contenido de AR se incrementó a medida que aumentó el contenido de almidón de plátano en el AP. Se obtuvieron AP con propiedades funcionales y un contenido de AR que sugiere aplicaciones en la industria de alimentos como un ingrediente nutracéutico.

Palabras clave: *Musa paradisiaca*, *Mangifera indica*, almidón modificado, difracción de rayos X, espectroscopia de infrarrojo.

INTRODUCCIÓN

El almidón es la principal fuente de carbohidratos en la dieta humana; por sus propiedades físico-químicas y funcionales se ha usado en diferentes industrias como la de alimentos, farmacéutica, petrolera y textil. En los alimentos, recientemente ha destacado su uso como ingrediente nutracéutico debido a las propiedades de la fracción almidón resistente (AR), que por resistir el ataque de las enzimas amilolíticas se fermenta en el colon. Por tanto, a los productos de

ABSTRACT

Pregelatinized starches were obtained by blending banana and mango starches in a twin-screw extruder. The amount of both starches in the blend and the screw speed were independent variables. Molecular characteristics of pregelatinized starches were assessed by X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. Additionally, the gelatinization degree, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI) and resistant starch (RS) content were tested. Native banana and mango starches showed a C- and A- type X-ray diffraction pattern, which was lost in the extrusion process. These results agree with the infrared spectroscopy study, since the absorbance ratio in the pregelatinized starches was <1 , indicating that the crystallinity was lost. The WAI and WSI increased with the increase in screw speed and mango starch level. The extruded samples had an almost complete gelatinization. RS content increased when banana starch in the blend was higher. The obtained pregelatinized starches had functional properties and RS content that suggest some industrial food applications as a nutraceutical ingredient.

Key words: *Musa paradisiaca*, *Mangifera indica*, modified starch, X-ray diffraction, infrared spectroscopy.

INTRODUCTION

Starch is the main source of carbohydrates in the human diet; because of its physico-chemical and functional properties, it has been used for different applications such as the food, pharmaceutical, petrochemical and textile industries. In foods, recently its use has been outstanding as a nutraceutical ingredient due to the properties of the resistant starch (RS) fraction, which resists the attack of the amylolytic enzymes, and thus ferments in the colon. Therefore, the products of this fermentation (short chain fatty acids) are attributed with beneficial effects similar to those of soluble dietary fiber (Tovar *et al.*, 2006).

Starch is an important fraction in a great number of agricultural products, such as cereals, legumes,

Recibido: Agosto, 2006. Aprobado: Abril, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 637-645. 2007.

dicha fermentación (ácidos grasos de cadena corta) se les atribuye efectos benéficos similares a los de la fibra dietética soluble (Tovar *et al.*, 2006).

El almidón es una fracción importante en numerosos productos agrícolas como cereales, leguminosas, tubérculos, y algunas frutas como el plátano y el mango, que en estado verde o inmaduro alcanzan concentraciones importantes de este polisacárido (Bello-Pérez y Paredes-López, 1999). Es importante obtener almidones desde fuentes no convencionales, ya que es una alternativa tecnológica para usar recursos agrícolas poco utilizados, y porque esos nuevos almidones podrían presentar propiedades funcionales mejores o diferentes (Bello-Pérez *et al.*, 1999).

El almidón nativo generalmente no tiene las características (propiedades espesantes limitadas, alta tendencia a la retrogradación y pérdida de agua, etc.) requeridas por la industria. Por tanto, se han estudiado estrategias para mejorar sus propiedades, y una de ellas es la mezcla de almidones nativos para obtener el efecto sinérgico que éste tiene sobre sus propiedades funcionales (Bello-Pérez *et al.*, 2001; Nocelo-Cen y Betancur-Ancona, 2005). Otra estrategia es la modificación mediante tratamientos físicos, desde los cuales se pueden obtener almidones pregelatinizados (AP) (González-Parada y Pérez-Sira, 2003). Los AP tienen una amplia aplicación en la industria de alimentos, ya que pueden ser fácilmente solubilizados en agua, mejorando las características de viscosidad y textura de los productos a los que se adicionan. Los AP se usan como aditivos estabilizantes, retenedores de humedad y espesantes (Martínez-Bustos *et al.*, 2005). En la industria de alimentos, los almidones se usan en la elaboración de alimentos infantiles, en la producción de sopas y atoles instantáneos, y como relleno en productos de repostería; en la industria farmacéutica se usan para elaborar pastillas (BeMiller, 1997). En la industria hay diversos métodos para obtener AP: los de naturaleza física como secado por tambor, calentamiento por microondas, calentamiento óhmico, autoclave (Martínez-Bustos *et al.*, 2005) y extrusión (Thomas y Atwell, 1999).

La extrusión es un proceso térmico-mecánico con el que se plastifican y cuecen materiales que contienen biopolímeros, como el almidón, por la acción combinada de presión, calor y esfuerzo de corte (Pólit-Corral, 1996). Durante la extrusión ocurre una fragmentación del gránulo de almidón, que ocasiona la liberación y despolimerización de sus dos componentes principales: la amilosa y la amilopectina. Las transformaciones que sufre el almidón dentro de un extrusor se pueden analizar a nivel granular, cristalino o molecular (Wen *et al.*, 1990). Cuando los almidones extrudidos se dispersan en agua, sus principales propiedades funcionales son

tubers, and some fruits such as banana and mango, which in their green or unripe state reach important concentrations of this polysaccharide (Bello-Pérez and Paredes-López, 1999). It is important to obtain starches from unconventional sources, given that it represents a technological alternative for using agricultural resources that are infrequently used, and because these new starches could present functional properties that are superior to or different from those of traditional sources (Bello-Pérez *et al.*, 1999).

Native starch does not generally have the characteristics (limited thickening properties, high tendency of retrogradation and water loss, etc.) required by industry. Therefore, strategies have been made to improve its properties, one of which is the blend of native starches in order to obtain the synergistic effect that is produced over its functional properties (Bello-Pérez *et al.*, 2001; Nocelo-Cen and Betancur-Ancona, 2005). Another strategy is the modification through physical treatments from which pregelatinized starches can be obtained (PS) (González-Parada and Pérez-Sira, 2003). The PS have a broad application in the food industry, as they can be easily solubilized in water, improving the characteristics of viscosity and texture of the products to which they are added. The PS are used as stabilizing additives, moisture retainers and thickeners (Martínez-Bustos, *et al.*, 2005). In the food industry, starches are used in the elaboration of baby foods, in the production of soups and instant corn flour mixes, and as filling in dessert products; in the pharmaceutical industry they are used in the manufacture of pills (Be Miller, 1997). In the industry there are different methods for obtaining PS: of a physical nature such as drying, microwave heating, ohmic heating, autoclave (Martínez-Bustos *et al.*, 2005) and extrusion (Thomas and Atwell, 1999).

Extrusion is a thermo-mechanical process with which materials that contain biopolymers, such as starch, are plasticized and cooked, by the combined action of pressure, heat and cutting force (Pólit-Corral, 1996). During extrusion, a fragmentation occurs of the starch granule, which causes the release and de-polymerization of its two main components: amylose and amylopectin. The transformations occurring in the starch within an extruder can be analyzed at the granular, crystalline or molecular level (Wen *et al.*, 1990). When the extruded starches are dispersed in water, their main functional properties are the absorption of this component and solubility. The Water Absorption Index (WAI) and the Water Solubility Index (WSI) can be used to estimate the convenience of applying extruded starches in products with characteristics of suspensions or solutions (Colonna *et al.*, 1998).

la absorción de este componente y la solubilidad. El Índice de Absorción de Agua (IAA) y el Índice de Solubilidad en Agua (ISA) pueden usarse para determinar la conveniencia de aplicar almidones extrudidos en productos con características de suspensiones o soluciones (Colonna *et al.*, 1998).

El objetivo del presente estudio fue producir AP a partir de mezclas de almidones de fuentes no convencionales (mango y plátano) usando un extrusor de doble tornillo con diferentes condiciones, y medir algunas de sus propiedades moleculares, funcionales y nutricionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento del almidón de mango y plátano

Los frutos (100 kg) fisiológicamente maduros de mango (*Manguijera indica*) var. Tommy Atkins y plátano (*Musa paradisiaca*) var. macho, se compraron en el mercado local de Cuautla, Morelos, México. Para aislar el almidón se siguió el procedimiento descrito por Flores-Gorosquera *et al.* (2004). Los frutos no fueron sometidos a ningún tratamiento para maduración.

Preparación de las muestras extrudidas

Se usó un diseño experimental completamente aleatorizado, siendo cada mezcla la unidad experimental. Se hicieron dos réplicas de cada experimento.

Se prepararon mezclas (1 kg) de los almidones en proporciones: 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 y 0:100 de plátano y mango. Se mezclaron en un equipo Kitchen Aid Modelo KSM-15BOB (St. Joseph, Michigan, USA) durante 20 min. La extrusión se realizó en un extrusor de doble tornillo Clextal Bc-21 (Akron, Ohio, USA) con configuración de tornillos co-rotacional y una relación longitud/diámetro de 16:1. Las temperaturas para las cuatro zonas del extrusor fueron 40, 70, 90 y 110 °C. El proceso se realizó a dos velocidades de tornillo (200 y 250 rpm), con una inyección de agua en la segunda zona de 0.48 kg h⁻¹; la capacidad de alimentación en el extrusor fue 5 kg h⁻¹.

Difracción de rayos-X

Las muestras (acondicionadas a una humedad relativa de 82% en un desecador) se colocaron sobre el portamuestra del difractor de rayos-X (Bruker D5005, London, UK) de ángulo ancho, equipado con una fuente de cobre operada a 40 kV y 30 mA, produciendo una radiación de Cu K_α con una longitud de onda de 1.54 Å. Los datos se recolectaron en un intervalo de 4-38° cada 0.1°, con una velocidad de barrido de 60 s/°. La línea base del difractograma se corrigió en el intervalo de barrido y el vector se normalizó utilizando el programa OPUS 3.0 (Bruker, London, UK) antes de calcular el índice de cristalinidad, el cual se determinó con el método de Bello-Pérez *et al.* (2005).

The objective of the present study was to produce PS from blends of starches from unconventional sources (mango and banana) using a twin-screw extruder under different conditions, and to measure some of its molecular, functional and nutritional properties.

MATERIALS AND METHODS

Isolation of mango and banana starch

The physiologically mature fruits (100 kg) of mango (*Manguijera indica*) var. Tommy Atkins and banana (*Musa paradisiaca*) var. macho, were bought in the local market of Cuautla, Morelos, México. The procedure described by Flores-Gorosquera *et al.* (2004) was used to isolate the starch. The fruits were not subjected to any treatment for ripening.

Preparation of the extruded samples

The experimental design was completely randomized, with each blend as the experimental unit. Two replicates were made of each of the experiments.

Blends (1 kg) were obtained of the starches in the following proportions: 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 and 0:100 of banana and mango. They were blended in a Kitchen Aid blender Model KSM-15BOB (St. Joseph, Michigan, USA) during 20 min. The extrusion was carried out in a Clextal Bc-21 twin screw extruder (Akron, Ohio, USA) with co-rotational screw configuration and a length/diameter ratio of 16:1. The temperatures for the four zones of the extruder were 40, 70, 90 and 110 °C. The process was carried out at two screw speeds (200 and 250 rpm), with water injection in the second zone of 0.48 kg h⁻¹; the feeding capacity in the extruder was 5 kg h⁻¹.

X-ray diffraction

The samples (conditioned to a relative humidity of 82% in a dryer) were placed on the slide of the X-ray wide angle diffractometer (Bruker D5005, London, UK), equipped with a copper source operated at 40 kV and 30 mA, producing a radiation of Cu K_α with a wave length of 1.54 Å. The data were collected in an interval of 4-38° every 0.1°, with a scan speed of 60 s/°. The base line of the diffractogram was corrected in the scan interval and the vector was normalized using the program OPUS 3.0 (Bruker, London, UK) before calculating the crystallinity index, which was determined with the method proposed by Bello-Pérez *et al.* (2005).

Infrared spectroscopy

The infrared spectras were obtained with the method proposed by Bello-Pérez *et al.* (2005) in an apparatus (Bruker, London, UK) with a thermal cell of simple reflectance with a diamond (Graseby-specac Ltd., UK). A sapphire cover sealed with a rubber ring was used to minimize moisture loss during the measurements. For each

Espectroscopia de infrarrojo

Los espectros de infrarrojo se obtuvieron con el método propuesto por Bello-Pérez *et al.* (2005) en un equipo (Bruker, London, UK) con una celda térmica de reflectancia simple con un diamante (Graseby-specac Ltd., UK). Se utilizó una cubierta de zafiro sellada con un anillo de goma para minimizar las pérdidas de humedad durante las mediciones. Para cada muestra se recolectaron 32 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} y se agruparon. Las muestras se analizaron a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. El análisis de datos se hizo con el programa OPUS 3.0 (Bruker, UK).

Grado de gelatinización

Se usó la metodología descrita por Birch y Priestley (1973) que se basa en la formación de un complejo azul por la adición de yodo, el cual reacciona con la amilosa liberada durante la gelatinización.

Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

El IAA y el ISA se determinaron con el método propuesto por Anderson *et al.* (1969), que consiste en calcular gravimétricamente la cantidad de material disuelto y la proporción de agua adsorbida después de la agitación de una suspensión de almidón a temperatura ambiente.

Contenido de almidón resistente (AR)

Se determinó el contenido de AR con el método propuesto por Goñi *et al.* (1996), en el cual la proteína se remueve con pepsina (Sigma A-7000, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h, pH 1.5), después una incubación con α -amilasa (Sigma A-3176, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 16 h, pH 6.9) para hidrolizar el almidón digerible, tratamiento del precipitado con KOH 2M para solubilizar al AR, una incubación con amiloglucosidasa (Sigma A-3514, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 45 min, pH 4.75) y determinación de glucosa mediante un ensayo con glucosa oxidasa peroxidasa. El contenido de AR se calculó como concentración de glucosa $\times 0.9$.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para determinar la diferencia entre las medias de cuatro repeticiones y luego una prueba de Tukey con el programa Sigma Stat (Fox *et al.*, 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades moleculares

El almidón nativo de mango presentó un patrón de difracción de rayos X tipo A (Figura 1), el cual se caracteriza por un alto grado de ramificación y longitud de cadenas cortas; éste tipo de patrón se encuentra

sample, 32 scans were collected with a resolution of 4 cm^{-1} and were grouped. The samples were analyzed at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. The data analysis was made with the program OPUS 3.0 (Bruker, UK).

Degree of gelatinization

The procedure was carried out with the methodology described by Birch and Priestley (1973). It is based on the formation of a blue complex by the addition of iodine, which reacts with the amylose released during gelatinization.

Water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI)

The WAI and WSI were determined with the method proposed by Anderson *et al.* (1969), which consists in gravimetrically calculating the amount of dissolved material and the ratio of water absorbed after the agitation of a starch suspension at room temperature.

Resistant starch (RS) content

The RS content was determined with the method proposed by Goñi *et al.* (1996), in which the removal of the protein with pepsin is carried out (Sigma A-7000, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h, pH 1.5), after an incubation with α -amylase (Sigma A-3176, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 16 h, pH 6.9) to hydrolyze the digestible starch, treatment of the precipitate with KOH 2M to solubilize the RS, an incubation with amyloglucosidase (Sigma A-3514, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 45 min, pH 4.75) and determination of glucose through an assay with glucose oxidase peroxidase. The RS content was calculated as concentration of glucose $\times 0.9$.

Statistical analysis

An analysis of variance was made to determine the difference among the means of four replicates and then a Tukey test was applied with the program Sigma Stat (Fox *et al.*, 1995).

RESULTS AND DISCUSSION

Molecular properties

The native mango starch presented a type A X-ray diffraction pattern (Figure 1), which was characterized by a high degree of ramification and short chain lengths; this type of pattern is mainly found in cereals (Zobel, 1988). The native banana starch showed a type C pattern of X-ray diffraction, which is considered to be a blend of type A and B patterns. When the starches are subjected to treatments with high temperatures and cutting forces (such as extrusion), fragmentation of the granule is produced and crystallinity is lost, resulting in an amorphous state, as is observed in the diffractometer of the PS

principalmente en cereales (Zobel, 1988). El almidón nativo de plátano mostró un patrón de difracción de rayos X tipo C, el cual se considera una mezcla de los patrones tipo A y B. Cuando los almidones se someten a tratamientos con altas temperaturas y esfuerzos de corte (como la extrusión), se provoca la fragmentación del gránulo y se pierde su cristalinidad, dando como resultado un estado amorfo, como se observa en el difractograma de los AP con 80% plátano y 20% mango, así como 50% plátano y 50% mango (Figura 1). Todos los AP elaborados presentaron un patrón amorfo, indicando una degradación completa de los gránulos de almidón durante la extrusión. Se ha reportado patrones amorfos en muestras extrudidas de almidones de plátano, papa, trigo, maíz y arroz (Bello-Pérez *et al.*, 2005; Farhat *et al.*, 2001; Wolfgang *et al.*, 2002); el estado amorfo indica la gelatinización casi completa del almidón y provoca que los almidones sean más solubles en agua, característica deseable en los AP.

El análisis por espectroscopía de infrarrojo mostró que los AP tuvieron mayor cantidad de zonas amorfas que cristalinas (Cuadro 1), ya que el cociente de la relación de absorbancias 1045/1022 fue <1; cuando dicho cociente tiende hacia cero, lo que prevalece en el almidón son las zonas amorfas (Van Soest *et al.*, 1994). En general, los valores de la relación 1045/1022 se incrementaron cuando se aumentó la cantidad de almidón de mango en el AP, indicando que el patrón de difracción tipo A- de este almidón retiene en mayor grado su estructura cristalina después del proceso de extrusión que el tipo C- del almidón de plátano. A mayor velocidad del tornillo (250 rpm) prevalece ligeramente más la cristalinidad del almidón debido a que a mayor velocidad es menor el tiempo de residencia, desorganizándose menos la estructura del

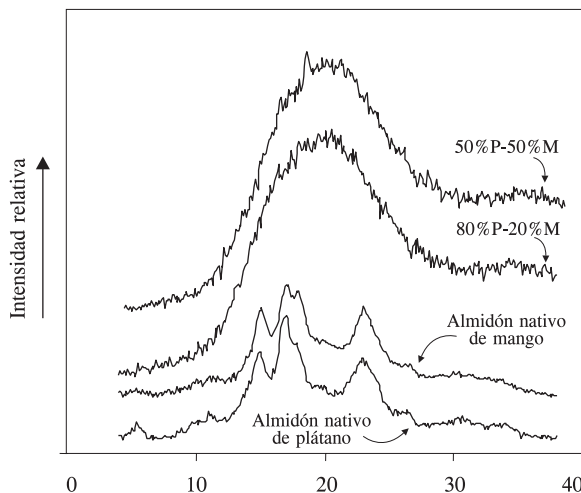


Figura 1. Difractogramas de rayos X de los almidones nativos y de la mezcla de los almidones pregelatinizados. P=plátano, M=mango.

Figure 1. Difractograms of X-rays of the native starches and of the blend of pregelatinized starches. B=banana, M=mango.

with 80% banana and 20% mango, as well as 50% banana and 50% mango (Figure 1). All of the PS obtained presented an amorphous pattern, indicating a complete degradation of the starch granules during extrusion. Amorphous patterns have been reported in extruded starch samples of banana, potato, wheat, maize and rice (Bello-Pérez *et al.*, 2005; Farhat *et al.*, 2001; Wolfgang *et al.*, 2002); the amorphous state indicates the almost complete gelatinization of the starch and makes the starches more soluble in water, a desirable characteristic in the PS.

The analysis by means of infrared spectroscopy showed that the PS had a greater amount of amorphous zones than crystalline zones (Table 1), given that the quotient of the absorbance ratio 1045/1022 was <1; when this quotient tends toward zero, what prevails in starch are the amorphous zones (Van Soest *et al.*, 1994). In general, the values of the ratio 1045/1022 increased when the amount of mango starch was increased in the PS, indicating that the type A diffraction pattern of this starch retains its crystalline structure to a greater degree after the extrusion process than the type C pattern of the banana starch. At a higher screw speed (250 rpm), the starch crystallinity prevails slightly more, due to the fact that the higher the speed, the shorter the residence time, with less disorganization of the starch structure. These results coincide with the X-ray diffraction patterns of the PS; thus, these techniques can be complementary in the study of starches. In extrudates made with banana starch and analyzed immediately, a value was found of the ratio 1045/1022 < 1; this value increased when

Cuadro 1. Relación de las absorbancias (1045/1022) de la mezcla de almidones pregelatinizados estudiadas por espectroscopía de infrarrojo.

Table 1. Ratio of the absorbencies (1045/1022) of the blend of pregelatinized starches studied through infrared spectroscopy.

Mezclas (%P:%M)	200 rpm	250 rpm
Testigo plátano (100%)	0.239 ± 0.005 ^{a,A}	0.260 ± 0.009 ^{a,B}
80:20	0.240 ± 0.005 ^{a,A}	0.270 ± 0.008 ^{b,B}
60:40	0.267 ± 0.004 ^{b,A}	0.273 ± 0.002 ^{b,A}
50:50	0.275 ± 0.002 ^{c,A}	0.273 ± 0.002 ^{b,A}
40:60	0.279 ± 0.004 ^{c,A}	0.284 ± 0.00 ^{c,A}
20:80	0.280 ± 0.004 ^{c,A}	0.290 ± 0.003 ^{d,B}
Testigo mango (100%)	0.295 ± 0.005 ^{d,A}	0.306 ± 0.004 ^{e,A}

P=almidón de plátano; M=almidón de mango. Media de cuatro repeticiones ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencia estadística significativa (p<0.05); letras mayúsculas diferentes en una fila indican diferencia estadística significativa (p<0.05).

almidón. Estos resultados coinciden con los patrones de difracción de rayos X de los AP, por lo que estas técnicas pueden ser complementarias en el estudio de almidones. En extrudidos elaborados con almidón de plátano y analizados inmediatamente, se encontró un valor de la relación 1045/1022 <1; dicho valor aumentó cuando las muestras fueron almacenadas, debido al proceso de recristalización del almidón (Bello-Pérez *et al.*, 2005).

La gelatinización del almidón dentro del extrusor fue casi completa (Cuadro 2), lo cual coincide con los resultados de difracción de rayos X y espectroscopía de infrarrojo. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las dos velocidades de tornillo y en la mezcla de los almidones. Esto se debió principalmente a una degradación molecular originada por la fuerza de cizalla. El grado de gelatinización (GG) está directamente relacionado con las propiedades físicas de los productos extrudidos. El proceso de extrusión produce una gelatinización casi completa a bajos contenidos de humedad cuando la temperatura excede el intervalo entre 110 y 135 °C (Anderson *et al.*, 1969; Mercier y Feillet, 1975; Chiang y Johnson, 1977).

Propiedades funcionales

Al incrementar la velocidad del tornillo, el IAA aumentó significativamente (Cuadro 3); ésto puede deberse a que altos esfuerzos de cortes provocan la degradación de las moléculas de almidón y que sólo los gránulos fragmentados absorben agua a temperatura ambiente. Se encontró también que el IAA aumentó cuando la cantidad de almidón de mango en la mezcla fue mayor. Ésto puede deberse a que el tamaño de los gránulos de almidón de mango es más pequeño (5-10 μm) que el del almidón de plátano (8-20 μm) (Millán-Testa *et al.*, 2005), lo cual favorece la absorción de agua al tener mayor área de contacto (Paredes-López *et al.*, 1989). Chang *et al.* (2001) reportaron IAA de 0.94 a 5.19% en mezclas de almidón de yuca y proteínas de soya extrudidas; además, un IAA elevado con una temperatura de 160 °C y 39.86% de proteínas de soya, y con velocidad de tornillo constante (250 rpm). Nabeshima y Grossmann (2001) determinaron IAA de 7.5 a 8.2% en almidones pregelatinizados de yuca, valores que fueron afectados por la temperatura y la adición de NaOH; esto se debería a que la combinación de extrusión y un pH alcalino modificaron el gránulo, lo cual aumentó la capacidad de hidratación.

El ISA aumentó significativamente al incrementar la velocidad de tornillo y el almidón de mango en el AP (Cuadro 3). El ISA se relaciona con la cantidad de

the samples were stored, due to the re-crystallization process of the starch (Bello-Pérez *et al.*, 2005).

The gelatinization of the starch within the extruder was nearly complete (Table 2), which coincides with the results of X-ray diffraction and infrared spectroscopy. The statistical analysis did not show significant differences ($p > 0.05$) between the two screw speeds studied and in the starch mixture. This was mainly due to a molecular degradation caused by the shear stress. The degree of gelatinization (GD) is directly related to the physical properties of the extruded products. The extrusion process produces a gelatinization process that is nearly complete at low moisture contents when the temperature exceeds the interval between 110 and 135 °C (Anderson *et al.*, 1969; Mercier and Feillet, 1975; Chiang and Johnson, 1977).

Functional properties

As screw speed was increased there was a significant increase in WAI (Table 3), which may be due to the fact that high cutting forces cause starch molecules to degrade and that only fragmented granules absorb water at room temperature. Besides, it was found that WAI increased when the amount of mango starch in the blend was higher. This may be due to the fact that granules of mango starch have a smaller size (5-10 μm) than that of banana starch (8-20 μm) (Millán-Testa *et al.*, 2005), which favours water absorption because of a larger contact area (Paredes-López *et al.*, 1989). Chang *et al.* (2001) reported WAI from 0.94 to 5.19% in mixtures of yucca starch and extruded soybean protein; besides, an increased WAI with a temperature of 160 °C and 39.85% of soybean protein, and with a constant screw speed (250 rpm).

Cuadro 2. Grado de gelatinización (%) en las mezclas de almidones pregelatinizados a dos velocidades de tornillo.

Table 2. Degree of gelatinization (%) in the blends of pregelatinized starches at two screw speeds.

Mezcla (%P:%M)	200 rpm	250 rpm
Testigo plátano (100%)	92.72 \pm 0.398 ^{aA}	93.49 \pm 0.597 ^{aA}
80:20	92.00 \pm 0.319 ^{aA}	92.89 \pm 0.729 ^{aA}
60:40	91.93 \pm 0.704 ^{aA}	92.87 \pm 0.431 ^{aA}
50:50	91.15 \pm 0.177 ^{aA}	92.67 \pm 0.738 ^{aB}
40:60	91.06 \pm 0.254 ^{aA}	92.62 \pm 0.751 ^{aB}
20:80	91.01 \pm 0.354 ^{aA}	92.45 \pm 0.435 ^{aA}
Testigo mango (100%)	90.63 \pm 0.357 ^{aA}	92.29 \pm 0.483 ^{aA}

P=almidón de plátano, M=almidón de mango. Media de cuatro repeticiones \pm error estándar. Letras minúsculas iguales en una columna indican que no existe diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$), letras mayúsculas diferentes en una fila indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Cuadro 3. Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) en las mezclas de almidones pregelatinizados a dos velocidades de tornillo.
Table 3. Water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) in the blends of pregelatinized starches at two screw speeds.

Mezcla (%P:%M)	IAA		ISA	
	200 rpm	250 rpm	250 rpm	250 rpm
Testigo plátano (100%)	2.33 ± 0.04 ^{a,A}	3.28 ± 0.03 ^{a,B}	21.26 ± 0.92 ^{a,A}	25.50 ± 0.624 ^{a,B}
80:20	2.68 ± 0.02 ^{b,A}	3.31 ± 0.02 ^{a,B}	23.19 ± 1.482 ^{a,A}	32.42 ± 0.722 ^{b,B}
60:40	2.69 ± 0.02 ^{b,A}	3.37 ± 0.04 ^{b,B}	26.99 ± 0.715 ^{b,A}	34.42 ± 0.590 ^{c,B}
50:50	2.69 ± 0.02 ^{b,A}	3.43 ± 0.02 ^{b,B}	27.32 ± 1.516 ^{b,c,A}	35.95 ± 1.438 ^{c,B}
40:60	3.14 ± 0.01 ^{c,A}	3.56 ± 0.03 ^{c,B}	27.38 ± 1.826 ^{b,c,A}	36.39 ± 1.397 ^{c,d,B}
20:80	3.30 ± 0.03 ^{d,A}	3.92 ± 0.02 ^{d,B}	27.47 ± 1.184 ^{b,c,A}	37.55 ± 1.344 ^{d,B}
Testigo mango (100%)	3.43 ± 0.02 ^{e,A}	4.13 ± 0.03 ^{e,B}	28.82 ± 0.535 ^{c,A}	38.99 ± 0.133 ^{d,B}

P=almidón de plátano; M=almidón de mango. Media de cuatro repeticiones ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$); letras mayúsculas diferentes en una fila y por determinación indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

moléculas solubles, lo que está asociado con el aumento de la dextrinización (degradación de los componentes del almidón a cadenas más cortas) por la temperatura y esfuerzo de corte durante la extrusión. El ISA aumenta con la severidad del tratamiento térmico y mecánico en el extrusor y, además, cuando disminuye la humedad en la muestra (Colonna *et al.*, 1998). En almidones pregelatinizados donde no se aplicó ninguna fuerza de corte a los gránulos hinchados ocurrió una lixiviación parcial de la amilosa, con una baja absorción de agua y solubilidad (Colonna *et al.*, 1987).

Almidón resistente

El contenido de AR fue más alto en los AP con mayor contenido de almidón de plátano, debido a que el almidón nativo de plátano presentó un patrón de difracción de rayos X entre el A- y el B-, con una estructura cristalina que hizo más difícil su hidrólisis por las enzimas amilolíticas que en el caso de los almidones de cereales con patrón tipo A- (Faisant *et al.*, 1995). Los valores más altos se encontraron en los AP preparados a 250 rpm (Cuadro 4). Este comportamiento se debe a que con altas velocidades del tornillo se puede producir mayor degradación molecular y alineación de las cadenas lineales, lo que favorece la formación de AR (Agustiano-Osornio *et al.*, 2005); adicionalmente, el almidón de plátano tiene un mayor contenido de amilosa (37%) (Millán-Testa *et al.*, 2005) lo cual favorece la formación de AR.

Unlu y Faller (1998) produjeron AR en un extrusor de doble tornillo con mezclas de almidones de maíz, trigo, papa y harina de maíz. La mezcla de almidón de maíz con alto contenido de amilosa y harina de maíz presentó el contenido más alto de AR; además, el contenido de AR en los extrudidos varió con la fuente botánica de almidón y su contenido de amilosa.

Nabeshima and Grossmann (2001) determined WAI from 7.5 to 8.2% in pregelatinized yucca starches, values that were affected by the temperature and NaOH addition; this might be due to the fact that the combination of extrusion and an alkaline pH modified the granule, which increased hydration capacity.

There was a significant increase in WSI as screw speed and mango starch in PS were increased (Table 3). WSI is related to the amount of soluble molecules, which is associated to the increase in dextrinization (degradation of starch components to shorter chains) because of temperature and cutting force during extrusion. WSI increased with severity of mechanical thermal treatment in the extruder and, besides, when humidity in the sample was decreased (Colonna *et al.*, 1998). In pregelatinized starches where no cutting force was applied to the swelled granules there was a partial lixiviation of amylose, with a low solubility and water absorption (Colonna *et al.*, 1987).

Resistant starch

The RS content was higher in the PS with a higher content of banana starch, due to the fact that the native banana starch presented an X-ray diffraction pattern between A- and B-, with a crystalline structure that made its hydrolysis more difficult because of the amylolytic enzymes, than in the case of the cereal starches with a type A- pattern (Faisant *et al.*, 1995). The highest values were found in the PS prepared at 250 rpm (Table 4). This behavior is due to the fact that with high screw speeds, greater molecular degradation can be produced along with alienation of the linear chains, which favors the formation of RS (Agustiano-Osornio *et al.*, 2005); additionally, banana starch has a higher amylose content (37%) (Millán-Testa *et al.*, 2005), which favors the formation of RS.

CONCLUSIONES

El proceso de extrusión desorganizó la estructura cristalina de los almidones presentes en la mezcla, como se observó mediante difracción de rayos X, espectroscopia de infrarrojo y grado de gelatinización. Los AP preparados con mayor velocidad de tornillo (250 rpm) y con mayor porcentaje de almidón de mango presentaron mayor IAA e ISA. Los AP preparados a 250 rpm y con mayor contenido de almidón de plátano en la mezcla mostraron mayor contenido de AR. Los AP elaborados con la mezclas de los almidones de plátano y mango se pueden utilizar como ingrediente nutraceútico en diversos alimentos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico a CGPI-IPN, COFAA-IPN y EDI-IPN. Uno de los autores (NMQ) agradece la beca de maestría del CONACYT.

LITERATURA CITADA

- Agustiano-Osornio, J. C., R. A. González-Soto, E. Flores-Huicochea, N. Manrique-Quevedo, L. Sánchez-Hernández, and L. A. Bello-Pérez. 2005. Resistant starch production from mango starch using a single-screw extruder. *J. Sci. Food Agric.* 85: 2105-2110.
- Anderson, R., H. F. Conway, V. F. Pheiser, and E. L. L. Griffin. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today* 14: 4-12.
- Bello-Pérez, L. A., y O. Paredes-López. 1999. El almidón: lo comemos pero no lo conocemos. *Ciencia* 50(3): 29-33.
- Bello-Pérez, L. A., E. Agama-Acevedo, L. Sánchez-Hernández, and O. Paredes-López. 1999. Isolation and partial characterization of banana starches. *J. Agric. Food Chem.* 47: 854-857.
- Bello-Pérez, L. A., K. Meza-León, S. Contreras-Ramos, and O. Paredes-López. 2001. Functional properties of corn, banana and potato starch blends. *Acta Cient. Venez.* 52: 62-67.
- Bello-Pérez, L. A., M. A. Ottenhof, E. Agama-Acevedo, and I. A. Farhat. 2005. Effect of storage time on the retrogradation of banana starch extrudate. *J. Agric. Food Chem.* 53: 1081-1086.
- BeMiller, J. N. 1997. Starch modification: Challenges and prospects. *Starch/Stärke* 49: 127-130.
- Birch, G. G., and R. J. Priestley. 1973. Degree of gelatinization of cooked rice. *Starch/Stärke* 25(3): 98-100.
- Chang, Y. K., J. M. Hashimoto, R. Moura-Alcioli, and F. Martínez-Bustos. 2001. Twin-screw extrusion of cassava starch and isolated soybean protein blends. *Nahrung/Food* 45(4): 234-240.
- Chiang, B. Y., and J. A. Johnson. 1977. Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-toluidine reagent. *Cereal Chem.* 54(3): 429-435.
- Colonna, P., A. Buleon, and C. Mercier. 1987. Physically modified starches. *In: Starch: Properties and Potential*. Galliard, T. (ed). *Crit. Rev. Appl. Chem.* 13: 79-114.
- Colonna, P., J. Tayeb, and C. Mercier. 1998. Extrusion cooking of starch and starchy products. *In: Extrusion Cooking*. Mercier, C., P. Linko, and J. M. Harper (eds). Second edition. American Association of Cereal Chemists, Inc., St Paul, Minnesota, USA. pp: 247-319.

Cuadro 4. Contenido de almidón resistente (AR) en las mezclas de almidones pregelatinizados a dos velocidades de tornillo (%).

Table 4. Content of resistant starch (RS) in the blends of pregelatinized starch at two screw speeds (%).

Mezclas (%P:%M)	200 rpm	250 rpm
Testigo de plátano (100%)	5.61 ± 0.24 ^{a,A}	6.21 ± 0.10 ^{a,B}
80:20	5.50 ± 0.15 ^{b,A}	6.13 ± 0.15 ^{b,B}
60:40	4.05 ± 0.15 ^{c,A}	5.41 ± 0.19 ^{c,B}
50:50	2.32 ± 0.20 ^{d,A}	4.07 ± 0.12 ^{d,B}
40:60	2.28 ± 0.15 ^{e,A}	3.08 ± 0.12 ^{e,B}
20:80	1.58 ± 0.12 ^{f,A}	2.61 ± 0.15 ^{f,B}
Testigo de mango (100%)	1.14 ± 0.14 ^{g,A}	2.52 ± 0.12 ^{g,B}

P=almidón de plátano; M=almidón de mango. Media de cuatro repeticiones ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$); letras mayúsculas diferentes en una fila indican diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Unlu and Faller (1998) produced RS in a twin screw extruder with starch blends of maize, wheat, potato and maize flour. The blend of maize starch with a high amylose content and maize flour presented the highest content of RS; besides, the RS content in the extrusions varied with the botanical source of starch and its amylose content.

CONCLUSIONS

The extrusion process disorganized the crystalline structure of the starches present in the blend, as was observed with X-ray diffraction, infrared spectroscopy and degree of gelatinization. The PS prepared with higher screw speed (250 rpm) and with higher percentage of mango starch presented higher IAA and ISA. The PS prepared at 250 rpm and with a higher content of banana starch in the blend showed a higher RS content. The PS prepared with blends of the starches of banana and mango can be used as a nutraceutical ingredient diverse foods.

—End of the English version—



- Faisant, N., A. Buleon, P. Colonna. 1995. Digestion of raw banana starch in the small intestine of healthy humans: structural features of resistant starch. *Brit. J. Nutr.* 73: 111-123.
- Farhat, I. A., J. Protzmann, A. Becker, B. Valles-Pàmies, R. Neale, and S. E. Hill. 2001. Effect of the extent of conversion and retrogradation on the digestibility of potato starch. *Starch/Stärke* 53: 431-436.
- Flores-Gorosquera, E., F. J. García-Suárez, E. Flores-Huicochea, M. C. Núñez-Santiago, R. A. González-Soto, y L. A. Bello-Pérez. 2004. Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*). Estudio en planta piloto. *Acta Cient. Venez.* 55: 86-90.

- Fox, E., K. Shotton, and C. Ulrich. 1995. Sigma-Stat User Manual. San Rafael, CA., USA, Jandel Scientific Co (cd).
- González-Parada, Z. M., y E. E. Pérez-Sira. 2003. Evaluación físico-química y funcional de almidones de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) pregelatinizados y calentados con microondas. *Acta Cient. Venez.* 54: 127-137.
- Goñi, I., L. García-Diz, E. Mañas, and F. Saura-Calixto. 1996. Analysis of resistant starch: A method for foods and food products. *Food Chem.* 56: 445-449.
- Martínez-Bustos, F., M. López-Soto, J. J. Zazueta-Morales, y E. Morales-Sánchez. 2005. Preparación y propiedades de almidones pregelatinizados de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y jícama (*Pachyrhizus erosus*). *Agrociencia* 39: 275-283.
- Mercier, C., and P. Feillet. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. *Cereal Chem.* 52: 283-298.
- Millán-Testa, C. E., M. G. Mendez-Montealvo, M. A. Ottenhof, I. A. Farhat, and L. A. Bello-Pérez. 2005. Determination of the molecular and structural characteristics of okenia, mango, and banana starches. *J. Agric. Food Chem.* 53: 495-501.
- Nabeshima, E. H., and M. V. E. Grossmann. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. *Carbohydr. Polym.* 45: 347-353.
- Nocelo-Cen, L., and D. Betancur-Ancona. 2005. Chemical and functional properties of *Phaseolus lunatus* and *Manihot esculenta* starch blends. *Starch/Stärke* 57: 431-441.
- Paredes-López, O., M. L. Schevenin, D. Hernández-López, and A. Cárabez. 1989. Amaranth starch isolation and partial characterization. *Starch/Stärke* 41: 205.
- Pólit-Corral, P. 1996. Efecto del procesamiento por extrusión sobre almidones. *Memorias de la Conferencia internacional de almidón.* Quito Ecuador. pp: 41-56.
- Thomas, D. J., and W. A. Atwell. 1999. *Starches: Practical Guides for the Food Industry.* Eagan Press Handbook Series AACC. St. Paul, Minnesota, USA. pp: 1-94.
- Tovar, J., L. A. Bello-Pérez, P. Osorio-Díaz, y R. Rendón-Villalobos. 2006. Almidón resistente: caracterización y análisis. *In: Carbohidratos en alimentos regionales iberoamericanos.* Lajollo, F. M., y E. Wenzel de Menezes (eds). USP Sao Paulo, Brasil. pp: 63-64.
- Unlu, E., and J. F. Faller. 1998. Formation of resistant starch by a twin-screw extruder. *Cereal Chem.* 75(3): 346-350.
- Van Soest, J. J. G., D. de Wit, H. Turnois, and J. F. Vliegtharth. 1994. Retrogradation of potato starch as studied by Fourier transform infrared spectroscopy. *Starch/Stärke* 46: 453-457.
- Wen, L. F., P. Rodis, and B. P. Wasserman. 1990. Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chem.* 67: 268-275.
- Wolfgang, B., S. J. Livings, H. Gloria-Hernández, G. Fayard, B. van Lengerich, and F. Meuser. 2002. Glass transition of extruded wheat, corn and rice starch. *Starch/Stärke* 54: 393-400.
- Zobel, H. F. 1988. Starch crystal transformations and their industrial importance. *Starch/Stärke* 40(1): 1-7.