

---

# EFECTO DE LA ADICIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO SOBRE LA DEGRADACIÓN DE LAS AFLATOXINAS Y LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS DE SORGO

---

Abraham Méndez-Albores, Fernando Martínez-Bustos, José Juan Véles-Medina,  
Carolina Moreno-Ramos, Juan Carlos Del Río-García y Ernesto Moreno-Martínez

## RESUMEN

Harina de sorgo contaminada con aflatoxinas ( $AFB_1+AFB_2$ ) a una concentración total de  $140\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , fue sometida a extrusión termoplástica usando un perfil de temperatura de 60-80-100°C. El contenido de humedad (CH) de la harina fue ajustado a 20, 25 y 30% mediante la adición de diferentes cantidades de ácido cítrico (AC) acuoso a concentraciones de 0; 0,5; 1; 2; 4 y 8N. El perfil de temperatura, en combinación con el CH y la concentración de AC, afectaron significativamente la cantidad de aflatoxinas recuperadas en los extrudidos; el máximo porcentaje de eliminación fue de 35,5%. En los extrudidos procesados con altos CH y concentraciones de AC se encontraron los valores

más altos en la diferencia de color ( $\Delta E$ ), así como los valores más bajos en viscosidad. Los índices de expansión fueron favorecidos a mayores CH y altas concentraciones de AC. Los mayores valores de fuerza al corte se encontraron en los extrudidos elaborados con un mayor CH; sin embargo, no se presentaron diferencias significativas para las diferentes concentraciones de AC evaluadas. Empleando condiciones moderadas durante la extrusión en combinación con altas concentraciones de AC se obtuvieron extrudidos con aceptable pH, color, viscosidad, así como con buenas propiedades funcionales y texturales.

---

## Introducción

El sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, es considerado el quinto cultivo en orden de importancia en el mundo, por ser un cultivo bastante resistente a la sequía y tolerante a las altas temperaturas (ICRISAT/FAO, 1996). Aún cuando el sorgo es vital para millones de personas en ciertas regiones de África y Asia, es un cultivo subestimado en la mayoría de los países desarrollados, donde generalmente es empleado para la alimentación animal.

Con el incremento en la población y el decremento de los mantos acuíferos, el sorgo puede ser considerado un cultivo alternativo para la alimentación humana, debido a que con un adecuado pro-

cesamiento se pueden obtener diversos productos, tales como pastas, aperitivos y bebidas, entre otros. Desafortunadamente, el sorgo es invadido por hongos durante su cultivo y almacenamiento; por ello, uno de los factores que afectan la calidad sanitaria de los alimentos preparados a base de este cereal es la contaminación con micotoxinas producidas por especies toxígenas de ciertos hongos, entre ellos *Aspergillus flavus*, responsable de la producción de las aflatoxinas, sustancias con propiedades cancerígenas, teratógenas, y mutágenas. La Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer consideró que las aflatoxinas eran sustancias con alto poder cancerígeno en humanos (IARC, 1987).

El incremento en el número de registros respecto a la presencia de aflatoxinas en alimentos hace necesario contar con procedimientos prácticos para descontaminarlos. Un gran número de métodos han sido estudiados en conexión con su efectividad para inactivar a las aflatoxinas; el objetivo de estos métodos ha sido “remover” o “destruir” a la toxina en el material contaminado (Samarajeewa *et al.*, 1990; Rustom, 1997). Sin embargo, la mayoría de los procesos han resultado imprácticos e inseguros, y además suelen comprometer las propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales de los productos descontaminados. Consecuentemente, el objetivo de esta investigación se enfoca en la aplicación de un ácido

orgánico durante el proceso de extrusión para reducir el contenido de aflatoxinas en el sorgo y, de esta manera, buscar procedimientos aplicables para la rehabilitación de los materiales contaminados.

## Materiales y métodos

### Reactivos químicos

Ácido cítrico (AC) con 99,9% de pureza fue obtenido de Sigma (St. Louis, MO, EEUU). Los otros reactivos químicos empleados fueron de grado analítico.

### Materia prima

Se utilizó sorgo de la variedad comercial RB-3030, con un contenido de humedad de 9,7%. El contenido de hume-

---

## PALABRAS CLAVE / Ácido Cítrico / Aflatoxinas / Descontaminación / Extrusión / Sorgo /

Recibido: 06/09/2008. Modificado: 11/03/2009. Aceptado: 16/03/2009.

**Abraham Méndez-Albores.** Doctor en Ciencias, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), México. Profesor, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Dirección: UNAM-FESC. Av. J. Jiménez Cantú S/N, Col. Atlámica, Cuautitlán

Izcalli, CP. 57740, México. e-mail: albores@unam.mx  
**Fernando Martínez-Bustos.** Doctor en Ciencias, Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Profesor-Investigador, CINVESTAV-IPN, Querétaro, México.

**José Juan Véles-Medina.** Maestro en Ciencias, CINVESTAV-IPN, México. Auxiliar de investigación, CINVESTAV-IPN, Querétaro, México.  
**Carolina Moreno-Ramos.** Maestra en Ciencias, UNAM, México. Profesora, UNAM, México.

**Juan Carlos Del Río-García.** Doctor en Ciencias, UNAM, México. Profesor, UNAM, México.

**Ernesto Moreno-Martínez.** Ph.D., University of Minnesota, EEUU. Profesor, UNAM, México.

## EFFECT OF CITRIC ACID ADDITION ON AFLATOXIN DEGRADATION AND ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF EXTRUDED SORGHUM PRODUCTS

Abraham Méndez-Albores, Fernando Martínez-Bustos, José Juan Véles-Medina, Carolina Moreno-Ramos, Juan Carlos Del Río-García and Ernesto Moreno-Martínez

### SUMMARY

*Sorghum flour contaminated by aflatoxin at a concentration of 140 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  was extrusion-cooked in a single screw extruder with a temperature profile of 60-80-100°C. The moisture content (MC) of the flour was adjusted to 20, 25 and 30% by adding aqueous citric acid (CA) at concentrations of 0, 0.5, 1, 2, 4 and 8N. The temperature profile in combination with the MC and CA concentrations significantly affected the extent of aflatoxin reduction in the extruded sorghum; the maximum percentage of aflatoxin reduction was 35.5%. In extruded sorghum prepared with high MC and CA concentrations, the highest values*

*in color difference ( $\Delta E$ ) and smallest values of viscosity were found. The expansion index was favored by higher MC and CA concentrations. The highest cutting force values were found in extruded products prepared with a higher MC, but there were no significant differences between those values and the different CA concentrations evaluated. Using moderate extrusion conditions in combination with higher concentrations of CA, products were obtained with acceptable pH, color, viscosity, as well as with good textural and functional properties.*

## EFEITO DA ADIÇÃO DE ÁCIDO CÍTRICO SOBRE A DEGRADAÇÃO DAS AFLATOXINAS E AS PROPRIEDADES FUNCIONAIS DE PRODUTOS EXTRUDIDOS DE SORGO

Abraham Méndez-Albores, Fernando Martínez-Bustos, José Juan Véles-Medina, Carolina Moreno-Ramos, Juan Carlos Del Río-García e Ernesto Moreno-Martínez

### RESUMO

*Farinha de sorgo contaminada com aflatoxinas (AFB<sub>1</sub>+AFB<sub>2</sub>) na concentração total de 140 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , foi submetida ao processo de extrusão termoplástica usando um perfil de temperatura de 60-80-100°C. O conteúdo de umidade (CH) da farinha foi ajustado a 20, 25 e 30% mediante a adição de diferentes quantidades de ácido cítrico (AC) aquoso em concentrações de 0; 0,5; 1; 2; 4 e 8N. O perfil de temperatura, combinado com o CH e a concentração de AC, afetaram significativamente a quantidade de aflatoxinas recuperadas nos extrudidos; a máxima porcentagem de eliminação foi de 35,5%. Nos extrudidos processados com alto CH e concentração de AC se encontraram os valo-*

*res mais altos na diferença de cor ( $\Delta E$ ), assim como os valores mais baixos em viscosidade. Os índices de expansão foram favorecidos a maior CH e altas concentrações de AC. Os maiores valores de força ao corte se encontraram nos extrudidos elaborados com maior CH; no entanto, não se apresentaram diferenças significativas para as diferentes concentrações de AC avaliadas. Utilizando condiciones moderadas durante a extrusão em combinação com altas concentrações de AC se obtiveram extrudidos com aceitável pH, cor, viscosidade, assim como com boas propriedades funcionais e texturais.*

dad fue determinado secando porciones de 5-10g de grano entero a 103°C durante 72h, expresando la humedad en porcentaje con base al peso húmedo.

### *Cepa toxígena*

La cepa del hongo *Aspergillus flavus* Link (UNIGRAS-1231) se indujo a esporular en cajas de Petri con medio MSA (extracto de malta 2%, cloruro de sodio 6% y agar, 2%) a 25°C durante 7 días. Esta cepa es capaz de producir las aflatoxinas AFB<sub>1</sub> y AFB<sub>2</sub>. Con un bisturí se desprendieron las esporas del hongo para preparar una suspensión en agua estéril (4,5 l) con aproximadamente 100000 esporas/ml.

### *Inoculación*

Se colocaron 10kg de sorgo en contenedores plásticos con capacidad de 19 l y se adicionó el inóculo necesario para ajustar la humedad del grano a 18%. Cada contenedor se colocó horizontalmente en un agitador de rodillos durante 15min a una velocidad de 60rpm para lograr una adecuada distribución de la humedad y de las esporas en el grano. Los contenedores fueron tapados con películas de polietileno para aminorar la pérdida de humedad del grano; sin embargo, a la película de polietileno se le hicieron 10 perforaciones pequeñas para evitar la acumulación del CO<sub>2</sub> generado por la respiración de los granos

de sorgo y de los hongos, y así evitar el efecto fungistático de este gas. Posteriormente, los contenedores se incubaron a 27°C durante 24 días para el desarrollo del hongo y la producción de las aflatoxinas. Después de la incubación, se inactivó el desarrollo del hongo mediante la aplicación de un ciclo de 5h con gas de óxido de etileno a una concentración de 1000mg·l<sup>-1</sup>. Finalmente, el sorgo fue molido (Pulvex-200; malla 0,8mm; Pulvex SA, México) y deshidratado a 11,5% de contenido de humedad.

### *Extrusión*

*Acondicionamiento de las muestras.* El contenido de humedad de cada unidad ex-

perimental (700g) de sorgo molido fue ajustado a 20, 25 o 30%, mediante la adición de disoluciones de AC a concentraciones de 0; 0,5; 1; 2; 4 y 8N. Las muestras fueron homogeneizadas a baja velocidad durante 15min en un mezclador (mod. C-100; Hobart Corp., Troy, OH, EEUU). Finalmente, las muestras fueron transferidas a bolsas de polietileno y se almacenaron a 4°C durante 72h para homogeneizar el contenido de humedad.

*Condiciones de extrusión.* Se utilizó un extrusor de tornillo simple, diseñado y construido por CINVESTAV-IPN con un diámetro de cañón de 2,5cm, longitud de 42,8cm, relación de compresión del tornillo de

1:1 y una matriz cilíndrica de salida de 1,99mm de diámetro. El cañón del extrusor está equipado con cartuchos de calentamiento eléctricos (tres zonas de calentamiento independientes). La velocidad de alimentación del sorgo fue de 16rpm y la velocidad del tornillo de 30rpm, velocidades que se mantuvieron constantes a lo largo del experimento. El perfil de temperatura empleado fue de 60-80-100°C y el rango de fluctuación de la temperatura en cada zona fue de ±2°C. Cada unidad experimental fue sometida al proceso de extrusión y ~500g de material extrudido fueron colectados después de lograr un flujo estable en el extrusor.

#### Cuantificación de aflatoxinas

Para la determinación de aflatoxinas totales se procedió de acuerdo al método 991.31 de la AOAC (1995), empleando columnas de anticuerpos monoclonales (VICAM Science Technology, Watertown, MA, EEUU). Cuando la concentración de aflatoxinas era >25µg·kg<sup>-1</sup> se realizaron diluciones de los extractos antes de introducirlos en las columnas de inmunoafinidad. La cuantificación de aflatoxinas fue realizada mediante fluorimetría, posterior a reaccionar la muestra con una disolución de bromo al 0,002%. El límite de detección para aflatoxinas totales empleando las columnas de inmunoafinidad y medición por fluorescencia es de 0,5µg·kg<sup>-1</sup> (Hansen, 1990).

#### Propiedades fisicoquímicas

**pH y color.** El pH fue determinado con el método 02-52 de la AACC (AACC, 2000). El color fue evaluado con un colorímetro MiniScan XE (mod. 45/0-L; Hunter Associates, Reston, VA, EEUU). La determinación del color se hizo en las muestras en la forma de harina y las lecturas fueron tomadas por triplicado con respecto a cuatro posiciones localizadas a 90° una de

otra. Se registró el valor de L, a y b, para calcular el valor ΔE mediante la fórmula

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

donde ΔE: diferencia total de color entre la referencia y la muestra; ΔL, Δa y Δb: diferencias absolutas entre los valores L, a y b de la referencia y la muestra.

**Perfil viscoamilográfico.** Las viscosidades relativas de las suspensiones de harinas y extrudidos se determinaron con un equipo Rapid Visco Analyzer RVA-4 (Newport Scientific, Sydney, Australia). Las harinas y los extrudidos fueron deshidratados en estufa de circulación forzada de aire a 40°C durante 24h, molidas y cribadas hasta obtener un tamaño de partícula <250µ (malla 60). Para la prueba, muestras de 5g fueron suspendidas en 23g de agua destilada y se utilizó un programa de tiempos/temperaturas como sigue: el perfil inició a 50°C durante 1min, aumentando la temperatura hasta 90°C, a una velocidad de 5°C/min (8min), permaneciendo 5min a esa temperatura y posteriormente disminuyendo la temperatura hasta 50°C a la misma velocidad utilizada durante el calentamiento, permaneciendo a esa temperatura por 1min, con un tiempo total de prueba de 23min. De las curvas de viscosidad, los valores del máximo de viscosidad y de la viscosidad de retrogradación fueron registrados.

#### Propiedades funcionales de los extrudidos

**Índice de expansión (IE).** El IE se determinó dividiendo el diámetro promedio de los extrudidos entre el diámetro interior de la matriz de salida del extrusor. Se empleó un vernier digital (mod. CD-6C5; Mitutoyo Corp.) y se realizaron 10 determinaciones en cada tratamiento.

**Densidad aparente (DA).** Se pesaron fragmentos de extrudidos de ~4cm de longitud,

y se determinó el diámetro promedio y la longitud del extrudido. La información obtenida, fue empleada para calcular el volumen aparente (V) de los extrudidos con la ecuación

$$V = \frac{\pi d^2 l}{4}$$

donde d: diámetro promedio del extrudido, y l: longitud del extrudido.

La DA (g·cm<sup>-3</sup>), se determinó dividiendo el peso de la pieza entre su volumen aparente. Se realizaron 10 determinaciones por tratamiento.

#### Propiedades texturales de los extrudidos

**Fuerza al corte.** Se utilizó el analizador de textura TA-XT2 (Stable Micro Systems; Texture Technologies Corp., Scarsdale, NY, EEUU), con la punta de prueba TA-90 (cuchilla plana de 3mm de espesor y 6,93cm de ancho). Se tomaron fragmentos de extrudidos de ~4cm de longitud y se sometieron transversalmente a corte a una velocidad de 2mm·s<sup>-1</sup> con una profundidad de 6mm. Se reportaron los datos de fuerza necesaria para romper el extrudido (gf), realizando 10 determinaciones por tratamiento.

#### Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se realizó con base en un diseño factorial 3×6 con dos repeticiones; el primer factor correspondió al contenido de humedad de la muestra (20, 25 y 30%) y el segundo a la concentración de AC en el sorgo molido (0; 0,5; 1; 2; 4 y 8N). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y las medias fueron separadas empleando la prueba de Tukey con el programa *Statistical Analysis System* (SAS, 1998). Un nivel de significación de α=0,05 fue usado para distinguir diferencias significativas entre los tratamientos.

## Resultados

### Contenido de humedad

El contenido de humedad en las muestras de sorgo molido antes de la extrusión fue ajustado a los niveles deseados (19,5 ±0,13; 24,4 ±0,24 y 29,7 ±0,40%), los cuales se mantuvieron estables durante el periodo de equilibrio de humedad (Tabla I). Sin embargo, el contenido de humedad fue reducido de manera significativa después de la extrusión, observándose reducciones de 32,2; 37,7 y 44,9%, cuando las harinas fueron extrudidas con contenidos de humedad de 20, 25 y 30%, respectivamente. En estos tratamientos, el contenido promedio de humedad fue de 13,6 ±0,27; 15,6 ±0,12 y 16,5 ±0,26% (Tabla I).

### pH

La Tabla I muestra los valores de pH para las harinas de sorgo ajustadas con las diferentes concentraciones de AC. A medida que el contenido de humedad y la concentración de AC se incrementaron, se observaron valores más bajos en el pH. Las muestras sin la adición de AC (control) presentaron un valor promedio de pH de 6,13; mientras que el valor más bajo en el pH (3,72) fue observado en las muestras preparadas con 30% de humedad y 8N de AC. En el caso del pH de los extrudidos, no se observó diferencia estadística significativa debido al proceso de extrusión. En general, el pH de los extrudidos fue esencialmente el mismo registrado para el caso de las harinas antes de la extrusión (datos no presentados).

### Color

La Tabla I muestra los valores de la diferencia de color (ΔE) para el sorgo molido. En general, para cada contenido de humedad evaluado el valor más alto en el ΔE correspondió a las muestras preparadas con la adición de 8N de AC. Para las muestras ajustadas a

TABLA I  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS HARINAS Y DE LOS EXTRUDIDOS DE SORGO

Tratamiento	Ácido cítrico (N)	Harinas						Extrudidos					
		Humedad (%)		pH		Color (ΔE)		Humedad (%)		Color (ΔE)		Aflatoxinas (ppb)	
		Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Ajustado a 20%	0,0	19,34 a	0,03	6,16 a	1,15 <sup>-3</sup>	38,88 a	0,41	13,89 a	0,29	42,85 a	0,29	142,03 a	2,48
	0,5	19,66 a	0,12	5,81 b	5,8 <sup>-4</sup>	37,82 ab	0,64	13,68 a	0,42	42,98 a	0,16	135,50 b	2,17
	1,0	19,57 a	0,06	5,57 c	4,5 <sup>-4</sup>	37,92 ab	0,30	13,23 a	0,28	42,19 a	0,18	128,10 c	1,12
	2,0	19,31 a	0,10	5,21 d	3,8 <sup>-4</sup>	37,73 ab	0,28	13,82 a	0,31	42,07 a	0,07	121,73 d	1,60
	4,0	19,46 a	0,10	4,77 e	5,4 <sup>-4</sup>	38,97 a	1,11	13,32 a	0,23	42,43 a	0,22	113,36 e	0,67
	8,0	19,52 a	0,16	4,34 f	2,7 <sup>-3</sup>	40,03 c	0,13	13,50 a	0,22	42,65 a	0,31	117,80 de	2,56
Ajustado a 25%	0,0	24,45 a	0,21	6,19 a	1,2 <sup>-3</sup>	39,34 a	0,87	15,55 a	0,39	43,18 a	0,22	140,03 a	1,98
	0,5	24,08 a	0,14	5,82 b	4,2 <sup>-4</sup>	38,18 a	0,25	15,47 a	0,27	43,18 a	0,45	134,56 ac	0,51
	1,0	24,42 a	0,13	5,54 c	6,2 <sup>-4</sup>	38,76 a	0,16	15,59 a	0,15	43,28 a	0,28	131,50 cd	0,89
	2,0	24,12 a	0,01	5,09 d	3,4 <sup>-4</sup>	38,49 a	0,92	15,78 a	0,35	43,70 a	0,08	127,26 de	1,96
	4,0	24,71 a	0,06	4,48 e	6,5 <sup>-4</sup>	39,41 a	0,10	15,44 a	0,19	44,51 a	0,42	122,20 e	1,61
	8,0	24,50 a	0,12	3,97 f	4,8 <sup>-4</sup>	41,07 b	0,23	15,59 a	0,13	43,93 a	0,24	108,16 f	4,01
Ajustado a 30%	0,0	30,07 a	0,11	6,04 a	1,0 <sup>-3</sup>	38,93 a	0,46	16,16 a	0,08	46,76 a	0,36	142,46 a	3,84
	0,5	29,59 a	0,07	5,71 b	7,4 <sup>-4</sup>	38,68 a	0,11	16,69 a	0,24	46,99 a	0,41	131,0 b	1,07
	1,0	29,04 a	0,03	5,52 c	7,5 <sup>-4</sup>	38,86 a	0,85	16,41 a	0,18	46,49 a	0,02	127,43 b	0,67
	2,0	29,54 a	0,04	4,87 d	4,3 <sup>-4</sup>	38,60 a	0,26	16,87 a	0,02	46,95 a	0,65	117,26 c	1,94
	4,0	29,95 a	0,07	4,22 e	9,5 <sup>-4</sup>	38,91 a	0,42	16,37 a	0,13	46,71 a	0,66	108,63 d	1,72
	8,0	30,08 a	0,06	3,72 f	7,6 <sup>-4</sup>	42,49 b	0,19	16,62 a	0,23	46,70 a	0,17	90,33 e	1,50

Medias de tres repeticiones ± desviación estándar (D.E.). Para cada variable, medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (Tukey, α=0,05).

20, 25 y 30% de contenido de humedad y 8N de AC, el valor promedio en la diferencia de color fue de 40,0; 41,1 y 42,5 respectivamente. El efecto del proceso de extrusión en los valores de color para el caso de los extrudidos también se muestra en la Tabla I. En cada contenido de humedad, no se observó diferencia estadística significativa en el valor ΔE debido a la extrusión, aun con las diferentes concentraciones adicionales de AC. En general, a medida que se incrementó la humedad, valores ligeramente mayores en el ΔE fueron registrados. Los valores promedio en la diferencia de color para los extrudidos elaborados a 20, 25 y 30% de humedad fueron de 42,5; 43,6 y 46,8 respectivamente.

*Inactivación de aflatoxinas*

nas totales en el sorgo fue de 140μg·kg<sup>-1</sup>, la cual fue afectada por las condiciones de extrusión (Tabla I). La máxima reducción en el contenido de aflatoxinas (35,5%) fue observada en el caso de los extrudidos obtenidos con la condición de 30% de humedad y 8N de AC. En estas muestras, el contenido de aflatoxinas

fue de 90,3 ± 1,5μg·kg<sup>-1</sup>. Sin embargo, degradaciones del 22,7 y 15,9% ocurrieron con la misma concentración de AC en las muestras extrudidas con 25 y 20% de humedad, respectivamente. Estas muestras presentaron un contenido de aflatoxinas de 108,2 ± 4,0 y 117,8 ± 2,6μg·kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Por el contrario, en

las muestras control, no se observó degradación en el contenido de aflatoxinas.

*Perfiles de viscosidad*

Valor máximo de viscosidad. La Tabla II muestra los valores máximos de viscosidad para las harinas. Las muestras control, ajustadas a 20, 25 y 30% de contenido de humedad, presentaron un valor promedio en la viscosidad de 778cP. En general, para cada contenido de humedad evaluado, a medida que se incrementó la concentración de AC, se observaron valores más bajos en la viscosidad. Los extrudidos procesados con 20, 25 y 30% de humedad sin la adición de ácido, presentaron valores promedios en la viscosidad de 662, 680 y 691cP, respectivamente. Sin embargo, en los extrudidos elaborados con la adición de AC, un moderado decremento en la viscosidad fue observado a medida que se incrementó la humedad y la concentración de AC.

TABLA II  
PROPIEDADES VISCOAMILOGRÁFICAS DE LAS HARINAS Y DE LOS EXTRUDIDOS DE SORGO

Tratamiento	Ácido cítrico (N)	Harinas				Extrudidos			
		Viscosidad máxima (cP)		Retrogradación (cP)		Viscosidad máxima (cP)		Retrogradación (cP)	
		Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Ajustado a 20%	0,0	779 a	7,21	256 a	9,29	662 a	4,73	290 a	5,51
	0,5	684 b	3,05	249 a	2,52	597 b	4,58	262 b	1,53
	1,0	651 c	3,46	243 a	3,51	559 c	7,02	272 b	4,04
	2,0	604 d	5,69	245 a	5,57	514 d	2,65	265 b	4,51
	4,0	579 e	1,53	253 a	4,36	425 e	3,79	273 b	1,53
	8,0	503 f	3,61	254 a	4,73	392 f	3,79	244 c	4,51
Ajustado a 25%	0,0	792 a	3,06	237 a	6,93	680 a	8,00	274 a	3,00
	0,5	636 b	2,31	220 b	2,65	604 b	4,00	266 a	2,52
	1,0	587 c	2,31	220 b	5,29	540 c	2,00	254 a	6,00
	2,0	559 d	4,36	216 b	3,00	515 d	5,00	248 a	4,51
	4,0	560 e	5,20	231 a	1,16	513 d	3,22	188 b	4,05
	8,0	346 f	1,16	151 c	5,03	306 e	1,16	177 b	1,16
Ajustado a 30%	0,0	764 a	7,00	160 a	2,31	691 a	4,62	227 a	8,08
	0,5	609 b	6,66	197 b	6,56	581 b	1,73	195 b	2,52
	1,0	499 c	3,51	189 b	3,22	468 c	3,06	220 a	4,93
	2,0	504 c	6,43	188 b	5,51	451 d	6,43	191 b	12,01
	4,0	494 c	3,22	202 b	5,57	457 d	3,79	184 b	3,61
	8,0	244 d	0,58	131 c	11,79	200 e	1,53	142 c	4,62

La concentración inicial de aflatoxi- Medias de tres repeticiones ± desviación estándar (D.E.). Para cada variable, medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (Tukey, α=0,05).

Retrogradación. La Tabla II también muestra los valores de la viscosidad de retrogradación de las harinas. Para el caso de las muestras procesadas con 20% de humedad, no se observó diferencia estadística significativa; en promedio las muestras presentaron un valor en la retrogradación de 250cP. Sin embargo, en el caso de las muestras procesadas con 25 y 30% de humedad, los valores más bajos fueron registrados para las muestras adicionales con 8N de AC, presentando valores en la retrogradación de 151 y

131cP, respectivamente. En el caso de la viscosidad de retrogradación de los extrudidos, el valor más bajo fue registrado para las muestras acondicionadas a 20, 25 y 30% de humedad y procesadas con la adición de 8N de AC, presentando valores de 244, 177 y 142cP, respectivamente.

#### Propiedades funcionales de los extrudidos

**Índice de expansión (IE).** En general, los valores más bajos en el IE correspondieron a las muestras control y a las procesadas con bajas concentraciones de AC. Un ligero incremento en este valor fue registrado para las muestras con las mayores concentraciones de AC, de 2-8N para muestras con 20% de humedad, de 4-8N para muestras con 25% de humedad, y 8N en muestras con 30% de humedad (Tabla III).

**Densidad aparente (DA).** La DA de los extrudidos se muestra en la Tabla III. En el caso de los extrudidos obtenidos de muestras acondicionadas con 20 y 30% de humedad, el valor más bajo en la DA correspondió a las muestras procesadas con la adición de

8N de AC. Estas muestras presentaron valores de 1,02 y 1,03g·cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Sin embargo, en las muestras procesadas con 25% de humedad no se observó diferencia estadística significativa en la DA y en promedio éstas presentaron un valor de 1,07g·cm<sup>-3</sup> (Tabla III).

**Propiedades texturales.** En general, no se observó diferencia estadística en el caso de la fuerza al corte para los extrudidos obtenidos con las combinaciones de humedad y concentraciones de AC (Tabla III). La fuerza máxima requerida para romper el extrudido estuvo en el rango de 433-499gf para las muestras procesadas con 20 y 25% de humedad. Sin embargo, un ligero incremento en la fuerza al corte fue observado para las muestras procesadas con 30% de humedad, presentando valores promedio de 530gf.

#### Discusión

El contenido de humedad de la harina de sorgo fue disminuido por el proceso de extrusión. Las muestras procesadas con 20% de humedad produjeron extrudidos con un contenido de humedad pro-

medio de 13,6%, los cuales después de enfriamiento tomaron una conformación vítrea y muy estable; sin embargo, las muestras procesadas con contenidos de humedad de 25 y 30%, produjeron extrudidos con humedades de 15,6 y 16,5%, respectivamente, requiriendo una operación de secado previo a su almacenaje. Estas reducciones en el contenido de humedad son resultado de la evaporación del agua durante la extrusión (Tabla I).

El análisis del pH mostró que los valores más bajos fueron encontrados en las muestras procesadas con 8N de AC, en las tres humedades evaluadas (Tabla I). Se ha reportado que en el caso de los alimentos para el consumo animal, valores ácidos contribuyen a una adecuada utilización de los minerales (Cuca *et al.*, 1996). Choung y Chamberlain (1993) evaluaron la adición de dos diferentes niveles de ácido láctico (50 y 100g/kg de materia seca) en la dieta de vacas lecheras, estudiando su efecto en la ingesta de alimento y en la producción de leche (con y sin la suplementación post-ruminal de 230g/día de caseinato de sodio). Ambos niveles de ácido láctico

redujeron el consumo de alimento, mientras que el rendimiento de leche únicamente fue afectado con la adición de la dosis más alta de ácido láctico; sin embargo, el efecto fue suprimido cuando se suministró la caseína. En todos los tratamientos, la infusión de caseína incrementó el rendimiento de leche y la concentración de proteína se incrementó linealmente con la adición del ácido láctico en la ración. En el presente trabajo, es posible que efectos simila-

res (benéficos y perjudiciales) ocurriesen en relación con las dosis más altas de AC en el sorgo, por lo que se sugiere que éstas sean evaluadas para determinar su efecto en el detrimento de la calidad del alimento.

El proceso de extrusión afectó significativamente el color en los extrudidos. A medida que se incrementó la humedad en las muestras, valores más altos en el  $\Delta E$  fueron encontrados (Tabla I). Generalmente, los cambios en la intensidad de color son causados por la reacción de Maillard entre azúcares reductores (almidón dextrinizado) y grupos amino de las proteínas (Wen *et al.*, 1990). Consecuentemente, los altos contenidos de humedad (30%) facilitaron la reacción, intensificando el color en los extrudidos.

La concentración de aflatoxinas totales en la harina de sorgo fue de 140 $\mu$ g·kg<sup>-1</sup>. Esta concentración puede encontrarse en el sorgo destinado para la alimentación animal, siendo una de las causas principales de baja productividad. Los animales que consumen cantidades considerables de estas toxinas suelen desarrollar varios problemas de salud, dependiendo de su susceptibilidad. En general, la aflatoxicosis se caracteriza por causar debilidad, anorexia con baja tasa de crecimiento, baja ganancia de peso corporal, disminución en la producción de leche o huevos, incrementos en la susceptibilidad al estrés ambiental y microbiano, así como mortalidad (Bailey *et al.*, 1998). Los resultados señalan que la concentración de aflatoxinas en la harina de sorgo fue moderadamente afectada por las condiciones de extrusión, la humedad y la adición de AC (Tabla I). Debido a que el producto permaneció en el extrusor corto tiempo (59s), se observaron reducciones moderadas en el contenido de aflatoxinas. Estudios previos indican que se requieren altas temperaturas y

TABLA III  
PROPIEDADES FUNCIONALES Y TEXTURALES  
DE LOS EXTRUDIDOS DE SORGO

Tratamiento	Acido cítrico (N)	Índice de expansión		Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )		Fuerza al corte (gf)	
		Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Ajustado a 20%	0,0	1,56 a	0,01	1,12 a	0,02	469 a	25,87
	0,5	1,55 a	0,01	1,14 a	0,02	433 a	27,23
	1,0	1,55 a	0,01	1,12 a	0,02	439 a	12,55
	2,0	1,64 b	0,02	1,11 a	0,03	472 a	5,62
	4,0	1,62 b	0,01	1,12 a	0,01	443 a	20,96
	8,0	1,64 b	0,01	1,02 b	0,03	459 a	7,97
Ajustado a 25%	0,0	1,58 a	0,01	1,06 a	0,01	499 a	8,19
	0,5	1,58 a	0,03	1,05 a	0,02	476 a	22,67
	1,0	1,57 a	0,02	1,08 a	0,03	474 a	50,31
	2,0	1,58 a	0,01	1,08 a	0,01	465 a	13,50
	4,0	1,65 b	0,02	1,07 a	0,01	448 a	25,04
	8,0	1,64 b	0,02	1,07 a	0,03	490 a	56,51
Ajustado a 30%	0,0	1,42 a	0,02	1,17 a	0,04	538 a	16,19
	0,5	1,45 a	0,01	1,16 a	0,02	540 a	21,21
	1,0	1,41 a	0,01	1,17 a	0,07	531 a	8,77
	2,0	1,51 b	0,01	1,15 a	0,03	534 a	9,59
	4,0	1,53 b	0,01	1,14 a	0,04	524 a	3,20
	8,0	1,69 c	0,01	1,03 b	0,01	511 a	4,50

Medias de tres repeticiones  $\pm$  desviación estándar (D.E.). Para cada variable, medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0,05$ )

largos tiempos para reducir de manera significativa los niveles de aflatoxinas durante la extrusión (Castells *et al.*, 2005). Elías-Orozco *et al.* (2002) reportaron que la extrusión de maíz contaminado con AFB<sub>1</sub> (495µg·kg<sup>-1</sup>) a 87°C redujo los niveles en 46% y una eliminación mayor ocurrió cuando emplearon 0,3% hidróxido de calcio combinado con 1,5% peróxido de hidrógeno; sin embargo, altos niveles de estos reactivos afectaron negativamente la calidad del producto extrudido. Cazzaniga *et al.*, (2001) reportó que la extrusión de harina de maíz con bajos niveles de AFB<sub>1</sub> (50µg·kg<sup>-1</sup>) a temperaturas de 150 y 180°C resultó parcialmente efectiva (10–25%) para la degradación de las aflatoxinas, incluso con la adición de 1% metabisulfito. En el presente trabajo la adición de diferentes concentraciones de AC resultó en una moderada eliminación en el contenido de aflatoxinas. La más notable reducción fue observada cuando el sorgo fue extrudido con 30% de humedad y 8N de AC. Sin embargo, estas condiciones resultaron insuficientes para remover una mayor cantidad de aflatoxinas y condiciones más severas de extrusión deben ser evaluadas con este tipo de extrusor experimental.

Los perfiles de viscosidad de las harinas ajustadas con los tres contenidos de humedad sin la adición de AC (control) fueron muy similares; sin embargo, la adición de AC causó considerables cambios en los perfiles de viscosidad (Tabla II). Durante el proceso de acidificación, el AC difunde en los gránulos de almidón con la hidratación, hinchándose éstos ligeramente y permaneciendo parcialmente hidratados; por lo tanto, la hidrólisis de los gránulos parece ser la explicación más probable de la disminución en la viscosidad. Resultados similares han sido reportados para el caso del almidón de maíz con la adición de ácido

láctico (Haros *et al.*, 2004), y para el almidón de yuca después de una fermentación ácida (Numfor *et al.*, 1995). El proceso de extrusión afectó significativamente la viscosidad de los extrudidos debido a la adición de AC, el efecto térmico y la acción mecánica dentro del extrusor, lo cual resultó en una mayor degradación del almidón (Tabla II). La fase amorfa del almidón granular es heterogénea, consistente de amilosa amorfa y de regiones intercrystalinas de amilopectina densamente ramificadas, siendo las últimas altamente susceptibles a varios agentes hidrolíticos tales como enzimas y ácidos en disolución (French, 1984). De esta manera, los decrementos en las viscosidades de las harinas y los extrudidos son resultado de una disminución en el hinchamiento debido a una despolimerización parcial de la amilopectina y/o la amilosa en las regiones amorfas de los gránulos de almidón.

La viscosidad de retrogradación mide el grado de endurecimiento del almidón gelatinizado en la fase de enfriamiento y se encuentra influenciada directamente por la estructura de la amilopectina, así como por la relación amilosa/amilopectina (Ward *et al.*, 1994). Generalmente la retrogradación ocurre cuando las moléculas de almidón se reasocian y forman una estructura ordenada con una rápida cristalización de la amilosa y una lenta recristalización de la amilopectina. Kuakpetoon y Wang (2001) reportaron que la hidrólisis y la oxidación con peróxido de hidrógeno degradan las zonas amorfas de los almidones de yuca y papa, lo cual retrasa la reasociación de las cadenas de amilopectina, disminuyendo la viscosidad de retrogradación. En el presente trabajo el contenido de humedad, la concentración de AC y sobre todo la temperatura durante la extrusión fueron los factores que más influenciaron la cantidad de almidón de sorgo retrogradado (Tabla II).

En general, el análisis estadístico mostró que la concentración de AC fue la variable que tuvo el mayor efecto en el IE (Tabla III). Los extrudidos mostraron un incremento a medida que la concentración de AC fue aumentada, en cada contenido de humedad evaluado. Diversos investigadores (Moraru y Kokini, 2003; Aguilar-Palazuelos *et al.*, 2006) han señalado que el IE de los productos extrudidos con cierto contenido de almidón está asociado con la severidad del proceso y sobre todo con la gelatinización de los gránulos de almidón. Sin embargo, una de las limitantes en la expansión del sorgo son sus altos contenidos de fibra y aceite, en comparación con el maíz o el sorgo decortinado (Acosta, 2003). En este caso, la temperatura, en combinación con la humedad y la alta concentración de AC aumentaron la cantidad de almidón fragmentado, incrementando el IE. En general, la DA se encuentra inversamente relacionada con el IE. Este comportamiento fue observado para las muestras procesadas con 20 y 30% de humedad adicionadas con 8N de AC (Tabla III). Gómez *et al.* (1988) reportaron que la extrusión de diferentes variedades de sorgo decortinado a diferentes contenidos de humedad, resultó en un incremento en el IE y en una disminución en la DA de los extrudidos.

La fuerza al corte de los extrudidos no fue afectada de manera significativa por la humedad y la concentración de AC (Tabla III). Generalmente un producto extrudido tiene burbujas de aire con paredes delgadas, lo cual disminuye el trabajo mecánico necesario para producir una deformación; un incremento en la fuerza mecánica puede atribuirse a un engrosamiento de la pared de las burbujas de aire o a una disminución en su tamaño. Se obtuvieron valores ligeramente más altos en la fuerza al corte para los extrudidos

elaborados con las harinas de sorgo ajustadas a 30% de humedad; sin embargo, no fueron estadísticamente diferentes a los registrados para los extrudidos elaborados con las harinas ajustadas a 20 y 25% de humedad (Tabla III). Onwulata *et al.* (1998) reportaron que la adición de concentrado de proteína de suero de leche a las harinas de maíz, arroz y papa tenía un mínimo efecto en la textura de los productos extrudidos.

Finalmente, el procesamiento del sorgo integral presenta ventajas significativas, debido a que no existen pérdidas de materia, no se emplea energía para decorticar el grano y el extrusor consume menos potencia procesando más material por unidad de tiempo. De esta manera, el sorgo integral puede ser procesado directamente en productos expandidos con alto potencial en el mercado de los alimentos humanos y/o animales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNAM por el apoyo financiero para esta investigación a través del proyecto PACIVE N° CONS-204.

#### REFERENCIAS

- AACC (2000) *Approved Methods*. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, EEUU. pp. 15-16.
- Acosta SD (2003) White food-type sorghum in direct-expansion extrusion applications. Tesis. Texas A&M University. College Station, Texas, EEUU. 120 pp.
- Aguilar-Palazuelos E, Martínez-Bustos F, Zazueta-Morales JJ (2006) Preparation of high quality protein-based extruded pellets expanded by microwave oven. *Cereal Chem.* 83: 363-369.
- AOAC (1995) *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, MD, EEUU. pp. 20-21.
- Bailey RH, Kubena LF, Harvey RB, Buckley SA, Rottinghaus GE (1998) Efficacy of various inorganic sorbents to reduce the toxicity of aflatoxin and

- T-2 toxin in broiler chickens. *Poult. Sci.* 77: 1630-1632.
- Castells M, Marín S, Sanchis V, Ramos AJ (2005) Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: a review. *Food Addit. Contam.* 22: 150-157.
- Cazzaniga D, Basflico JC, González RJ, Torres RL, de Greef DM (2001) Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour. *Lett. Appl. Microbiol.* 33: 144-147.
- Choung J, Chamberlain DG (1993) Effects of addition of lactic acid and post-ruminal supplementation with casein on the nutritional value of grass silage for milk production in dairy cows. *Grass Forage Sci.* 48: 380-386.
- Cuca ME, Ávila EG, Pro M (1996) *Alimentación de las Aves*. Universidad Autónoma de Chapingo. Montecillo, México. pp. 3-75.
- Elías-Orozco R, Castellanos-Nava A, Gaytán-Martínez M, Figueroa-Cárdenas JD, Loarca-Piña G (2002) Comparison of nixtamalization and extrusion process for a reduction in aflatoxin content. *Food Addit. Contam.* 19: 878-885.
- French D (1984) Organization of starch granules. En Whistler RL, Paschal EF, BeMiller JN (Eds.) *Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press. Londres, RU. pp. 184-247.
- Gómez MH, Waniska RD, Rooney LW, Lusas EW (1988) Extrusion-cooking of sorghum containing different amounts of amylose. *J. Food Sci.* 53: 1818-1822.
- Hansen JT (1990) Affinity column clean-up and direct fluorescence measurement of aflatoxin M<sub>1</sub> in raw milk. *J Food Prot.* 53: 75-77.
- Haros M, Pérez OE, Rosell CM (2004) Effect of steeping corn with lactic acid on starch properties. *Cereal Chem.* 81: 10-14.
- IARC (1987) *IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans*. International Agency for Research on Cancer. Lyon, Francia. Suppl. 1. pp. 82-87.
- ICRISAT/FAO (1996) *The World Sorghum and Millet Economies: Facts, Trends and Outlook*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics / Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. pp. 1-2.
- Kuakpetoon D, Wang YJ (2001) Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. *Starch* 53: 211-218.
- Moraru CI, Kokini JL (2003) Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comp. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2: 120-138.
- Numfor FA, Walter WM, Schwartz SJ (1995) Physicochemical changes in cassava starch and flour associated with fermentation: Effect on textural properties. *Starch* 47: 86-91.
- Onwulata CI, Konstance RP, Smith PW, Holsinger VH (1998) Physical properties of extruded products as affected by cheese whey. *J. Food. Sci.* 63: 814-818.
- Rustom IYS (1997) Aflatoxin in food and feed: occurrence, legislation and inactivation by physical methods. *Food Chem.* 59: 57-67.
- Samarajeewa U, Sen AC, Cohen MD, Wei CI (1990) Detoxification of aflatoxins in foods and feeds by physical and chemical methods. *J. Food Protect.* 53: 489-501.
- SAS (1998) *Introductory Guide for Personal Computers*. Ver. 6. 12<sup>a</sup> ed. SAS Institute. Cary, NC, EEUU.
- Ward KEJ, Hosney RC, Seib PA (1994) Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. *Cereal Chem.* 71: 150-155.
- Wen LF, Rodis P, Wassermant BP (1990) Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chem.* 67: 268-275.