



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO EN ALIMENTOS
Programa de Posgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos

**Optimización de las Condiciones del Proceso de Extrusión para la
Obtención de Botanas Nixtamalizadas de Maíz Azul**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS

Presenta:

M.C. Anayansi Escalante Aburto

Hermosillo, Sonora

Junio de 2014

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

APROBACIÓN

Optimización de las Condiciones del Proceso de Extrusión para la Obtención de Botanas Nixtamalizadas de Maíz Azul

M.C. Anayansi Escalante Aburto



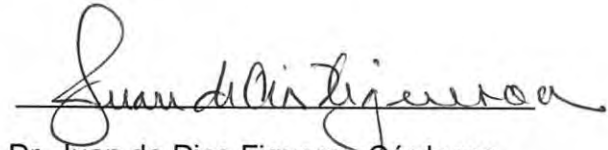
Dr. Benjamín Ramírez Wong

Director de la tesis



Dr. Jesús Manuel Barrón Hoyos

Miembro del Comité de tesis



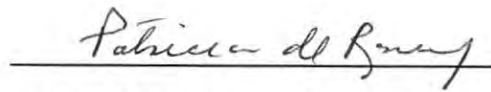
Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas

Miembro del Comité de tesis



Dr. Jaime López Cervantes

Miembro del Comité de tesis



Dra. Patricia Isabel Torres Chávez

Miembro del Comité de tesis

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Doctor en Ciencias de los Alimentos** de la Universidad de Sonora.

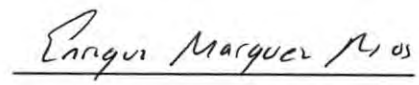
Se deposita en la biblioteca del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador de Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente



M.C. Anayansi Escalante Aburto



Dr. Enrique Márquez Ríos

Coordinador del Programa de Posgrado

Hermosillo, Sonora

Junio de 2014

AGRADECIMIENTOS

“Sean agradecidos en toda circunstancia, pues esta es la voluntad de Dios para ustedes, los que pertenecen a Cristo Jesús”, Tesalonicenses 5:18.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante el periodo de estudios de Doctorado.

A los integrantes del sínodo: Dr. Benjamín Ramírez Wong, Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas, Dr. Jesús Manuel Barrón Hoyos, Dr. Jaime López Cervantes y la Dra. Patricia I. Torres Chávez, por las acertadas aportaciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación.

Al personal administrativo y académico del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora, por su cordialidad, apoyo y amistad brindada desde el inicio de esta etapa.

Al Dr. Roberto Gutiérrez Dorado, la Universidad Autónoma de Sinaloa, al Dr. Armando Quintero Ramos, la Universidad Autónoma de Chihuahua, el Centro de Investigación e Innovación Biotecnológica, Agropecuaria y Ambiental perteneciente al Instituto Tecnológico de Sonora, y el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Hermosillo, por el apoyo brindado en la realización de diferentes análisis.

DEDICATORIA

A mis padres José y Lulú. No voy a nombrar todas las razones por la que los amo pues de ser así nunca terminaría de hacerlo, sólo voy a decir que me siento feliz de ser su hija, porque ambos son seres maravillosos con un gran corazón, los amo a los dos.

Mayanini: Mi corazón está plenamente agradecido por haber sido bendecida por tu amada presencia. Tu valor, tu amor, tu fidelidad y tus palabras tienen un valor incalculable. Bendito el día en que Dios decidió que tú fueras mi *hermana*.

A Néstor: Por casualidad nos encontramos, por nuestra elección nos hicimos inseparables.

A mi familia y amigos. Tener un lugar a donde ir, es tener un hogar. Tener a alguien a quien amar, es una familia. Teniendo ambas, es una bendición.

El primer paso de la ignorancia, es presumir de saber.

Albert Einstein

RESUMEN

Los maíces pigmentados contienen compuestos fenólicos del grupo de los flavonoides llamados antocianinas, los cuales poseen actividad antioxidante. Las botanas nixtamalizadas son altamente consumidas y desde hace algunos años, el proceso de extrusión se ha utilizado para su obtención como una alternativa a la nixtamalización tradicional. El objetivo de esta investigación, fue optimizar las condiciones del proceso de extrusión para la obtención de botanas expandidas nixtamalizadas de maíz azul integral con máximo contenido de antocianinas, expansión y color aceptables. La investigación se dividió en dos etapas. Durante la primera etapa, se evaluaron los factores que afectaron las propiedades químicas, físicas, reológicas, morfológicas, térmicas y de textura de los extrudidos nixtamalizados. Se caracterizó el maíz azul y se molió una (M1) o tres (M3) veces para obtener diferente tamaño de partícula (ITP). El maíz de M1 y M3 se acondicionó a diferente humedad de alimentación (HA, 14-20.5%), adicionando 0.3% de hidróxido de calcio. Los tratamientos acondicionados se dejaron en reposo a 4°C durante 24 h. Los extrudidos se obtuvieron en un extrusor de tornillo simple, variando la temperatura final del cañón (T, 130 ó 140°C). Los extrudidos se secaron a 60°C durante 2 h y se evaluaron mediante análisis químicos, físicos, reológicos, morfológicos, térmicos y de textura. Se utilizó un diseño de experimentos factorial de 6x2x2, obteniendo 24 tratamientos. En la segunda etapa, se optimizaron las condiciones de procesamiento en función de los siguientes parámetros de calidad: contenido de antocianinas, índice de expansión (crujencia) y color azul intenso (parámetro de color *b*). Se utilizó maíz molido de ITP 83.9 (M1) y se elaboraron los extrudidos bajo las condiciones obtenidas de una matriz de un diseño central compuesto, donde los factores fueron: humedad de alimentación (HA, 15-23%), concentración de hidróxido de calcio (CHC, 0-0.25%) y temperatura de la cuarta zona del extrusor (T, 110-150°C). Los extrudidos se secaron a 60°C durante 2 h. Las variables respuesta fueron químicas, físicas y de textura. Las condiciones de procesamiento óptimas para la obtención de las botanas nixtamalizadas, se seleccionaron en función de las variables respuesta:

antocianinas totales, índice de expansión y parámetro de color *b*. Se utilizaron las gráficas de contorno obtenidas de las variables respuesta anteriores, y se realizó una superposición de superficies para determinar la mejor combinación de los factores de procesamiento. Los resultados de la primera etapa indican que la HA, la molienda (reportada como ITP), la T, y la interacción T y HA, fueron los factores que afectaron significativamente las propiedades químicas, físicas, reológicas, morfológicas, térmicas y de textura de los extrudidos. El contenido de antocianinas totales (AT) y de cianidina 3-glucósido, fue significativamente mayor ($P < 0.05$) en los extrudidos elaborados con HA 16 y 16.5%. La viscoelasticidad de la masa elaborada con los extrudidos mostró un comportamiento mayormente elástico ($Tan \delta < 0.5$). Los análisis morfológicos y térmicos demostraron un severo daño al almidón ocasionado por la baja HA y el esfuerzo de corte dentro del extrusor. La HA afectó muy significativamente ($P < 0.01$) la densidad aparente, el índice de expansión (IE) y el esfuerzo de corte máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$). El extrudido elaborado con T 130°C, maíz de M1, y HA 16%, fue el mejor tratamiento debido a que presentó el contenido más elevado de AT (239.94 mg/kg) y un IE de 2.30. Los resultados de la segunda etapa, indicaron que las condiciones óptimas de procesamiento fueron: HA 16.94%, T 141.89°C (cuarta zona del extrusor), y CHC 0.09%. Con estas condiciones se estimaron los valores para las variables respuesta: contenido de AT de 160 mg/kg, IE de 2.66 y parámetro de color *b* de 0.10. Para la validación experimental en el extrusor de las condiciones óptimas, se elaboraron los extrudidos de maíz azul utilizando maíz blanco como control. Los extrudidos nixtamalizados de maíz azul obtenidos presentaron un contenido de AT de 158.8 mg/kg, un IE de 3.6 y un parámetro de color *b* de -0.45. Al comparar los extrudidos de maíz azul con los de maíz blanco, los primeros presentaron un 96.8% más AT, una expansión 1.9 veces mayor y un parámetro de color *b* más bajo. Se concluye que es posible la optimización del proceso de extrusión para obtener una botana expandida de maíz azul integral con antocianinas, mayor valor nutrimental y características de textura y color aceptables.

ABSTRACT

Pigmented maize varieties contain considerable amounts of phenolic compounds, of the flavonoid group named anthocyanins with recognizable antioxidant activity. Maize-based snacks are highly popular and the extrusion process, as an alternative for the traditional nixtamalization, has been used for obtaining good quality products. The objective of this research, was to establish optimum conditions for the extrusion processes, when applied to blue corn, for the preparation of high quality nixtamalized expanded snacks. Quality parameters considered were: a high total anthocyanin content (TA), intense blue/purple colour (color parameter *b*), and acceptable expansion index. This research project was divided in two main parts. In the first part, the factors affecting the chemical, physical, rheological, morphological, thermal and textural properties of the nixtamalized extrudates, were evaluated. Raw blue corn was firstly analyzed by a proximal analysis. Raw corn was then ground (M1 or M3) to obtain different particle size index (PSI). Raw ground corn from different particle size, were conditioned at different moisture content (FM, 14-20.5%), with the addition of 0.3% of calcium hydroxide. The conditioned samples were stored at 4°C during 24 h. The blue corn extrudates were produced, using a single screw extruder, with variations of the final temperature of the barrel (130 or 140°C). The final extrudates were oven dried at 60°C for 2 h. Extrudates were evaluated in their chemical, physical, rheological, morphological, thermal and textural characteristics. A factorial experimental design 6x2x2 was used, resulting in a total of 24 final treatments. In the second part of this research, processing conditions were investigated, based on the following quality parameters: total anthocyanin content (TA), expansion (crispiness), and an intense blue color. Ground raw corn from M1 (PSI 83.9) was used, and the extrudates were elaborated with selected conditions, obtained from a central composite design matrix, where the factors were: FM (15-23%), calcium hydroxide concentration (CHC, 0-0.25%), and the fourth temperature zone (T, 110-150°C). Results indicated that the FM, followed by the particle size (reported as PSI), T, and the T and FM interaction, were the processing factors that showed a more significant

effect in the chemical, physical, rheological, morphological, thermal and textural properties of the final extrudates. The content of total anthocyanins (TA) and cyanidin 3-glucoside, were significantly higher ($P < 0.05$) in the extrudates prepared with HA 16 and 16.5%. The viscoelasticity of the dough prepared from these extrudates showed ($\tan \delta < 0.5$) mostly an elastic behavior. Morphological and thermal analyses demonstrated severe damage produced in the starch fraction, caused by the FM and the shear stress within the extruder. The FM had a highly significant ($P < 0.01$) effect on the apparent density, expansion index (EI) and on the maximum shear stress (σ_{max}). Extrudates produced with T 130°C, M1 (PSI 83.9) and FM 16%, were considered the best set of conditions, since these conditions produced extrudates with the highest TA (239.94 mg/kg) content and EI of 2.30. Analyzing results from the second part of this research, it was found that the optimum processing conditions were: FM 16.94%, T 141.89°C (fourth zone of the extruder), and CHC 0.09%. Under these processing conditions, the following estimated values were: TA content of 160 mg/kg, EI of 2.66, and color parameter *b* of 0.10. For the experimental validation of the optimum processing conditions for best quality of the blue corn extrudates, white corn was used as a control. Blue corn nixtamalized expanded extrudates, obtained from the best processing conditions, had a TA content of 158.8 mg/kg, EI of 3.6, and a color *b* parameter of -0.45. When extrudates from both corn sources were compared, blue corn produced extrudates with 96.8% more AT, an IE 1.9 greater, and a color parameter *b* lower (intense blue). This research demonstrated that it was possible to establish optimum extrusion processing conditions to produce expanded snacks from blue corn with high levels of anthocyanins, improved nutritional value and quite acceptable textural and sensory properties.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
CONTENIDO	x
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABLAS	
NOMENCLATURA	
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
Generalidades del Maíz.....	4
Definición y origen.....	4
Clasificación.....	4
Producción.....	5
Morfología del grano.....	5
Pericarpio.....	5
Pedicelo.....	8
Endospermo.....	8
Germen.....	8
Composición química.....	8
Carbohidratos.....	10
Azúcares.....	10
Almidón.....	10
Extracto etéreo.....	10
Proteínas.....	10
Fibra dietética.....	11
Maíces Pigmentados.....	11
Características químicas del maíz azul.....	12
Antocianinas.....	13
Características químicas.....	13
Tipos.....	15
Actividad biológica.....	16
Factores que intervienen en la estabilidad de las antocianinas.....	20
pH.....	20
Temperatura.....	23
Procesamiento del Grano.....	27
Nixtamalización tradicional.....	27
Ventajas y desventajas.....	27
Productos obtenidos.....	28
Botanas nixtamalizadas.....	28
Nixtamalización por extrusión.....	29
Variables que afectan el proceso.....	31

CONTENIDO (Cont...)	Página
Materia prima.....	31
Tamaño de partícula.....	31
Humedad de alimentación.....	32
Temperatura del cañón.....	32
Velocidad del tornillo.....	32
Geometría del dado.....	33
Ventajas y desventajas.....	33
Productos obtenidos.....	33
Botanas extrudidas nixtamalizadas.....	33
Textura en Botanas Expandidas.....	34
Cambios Químicos en Productos Extrudidos de Maíz Pigmentado.....	36
Almidón.....	36
Antocianinas.....	38
Antecedentes Sobre Extrudidos a Base de Maíces Pigmentados Producidos por Extrusión.....	39
Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).....	40
Diseños experimentales para ajustar modelos de segundo orden.....	45
Optimización de respuesta múltiple.....	45
HIPÓTESIS	47
OBJETIVOS	48
General.....	48
Particulares.....	48
MATERIALES Y MÉTODOS	49
Experimentos Preliminares.....	49
Efecto de las Condiciones de Procesamientos Sobre las Propiedades de Extrudidos de Maíz Azul.....	51
Materia Prima.....	51
Reactivos.....	51
Caracterización química del grano.....	51
Contenido de humedad (H).....	51
Contenido de almidón total (ALT).....	51
Contenido de proteína.....	53
Extracto etéreo.....	53
Perfil de ácidos grasos.....	53
Contenido de ceniza.....	54
Contenido de fibra dietética total.....	54
Contenido de antocianinas totales.....	54
Análisis de cianidina 3-glucósido (C3G).....	54
Caracterización física del grano.....	55
Dimensiones.....	55
Peso de mil granos (PMG).....	55
Peso hectolítrico (PHL).....	55
Color.....	56
Proceso de molienda.....	56

CONTENIDO (Cont...)· **Página**

Evaluación del maíz molido.....	56
Contenido de humedad (H).....	58
Color.....	58
Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	58
Índice de tamaño de partícula.....	58
Obtención de los extrudidos.....	60
Acondicionamiento.....	60
Proceso de nixtamalización por extrusión.....	60
Evaluación de los extrudidos nixtamalizados.....	62
Análisis químicos.....	62
Índice de absorción de agua (IAA).....	62
Índice de material soluble (IMS).....	63
Análisis físicos.....	63
Densidad aparente (DA).....	63
Índice de expansión.....	63
Análisis reológicos.....	64
Viscosidad máxima (VM).....	64
Método dinámico oscilatorio.....	64
Análisis morfológico.....	66
Análisis térmico.....	66
Análisis de textura.....	67
Esfuerzo de corte máximo (ECM).....	67
Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	67
Optimización de las Condiciones de Procesamiento para la Obtención de Extrudidos.....	69
Materia Prima.....	69
Reactivos.....	69
Proceso de molienda.....	69
Obtención de los extrudidos.....	69
Acondicionamiento.....	69
Proceso de nixtamalización por extrusión.....	70
Evaluación de los extrudidos nixtamalizados.....	72
Análisis químicos.....	72
pH.....	72
Análisis de antocianinas específicas.....	72
Análisis físicos.....	74
Índice de expansión (IE).....	74
Análisis de textura.....	74
Optimización del proceso de extrusión y validación.....	74
Validación de las condiciones óptimas del proceso y evaluación de los extrudidos.....	75
Análisis químicos.....	75
Análisis físicos.....	75
Análisis de textura.....	75

CONTENIDO (Cont...)	Página
Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	75
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
Efecto de las Condiciones de Procesamiento en las Propiedades de Extrudidos de Maíz Azul.....	78
Características del Maíz Azul.....	78
Propiedades químicas.....	78
Propiedades físicas.....	83
Características del Maíz Azul Molido.....	83
Propiedades químicas y físicas.....	83
Propiedades químicas de los extrudidos nixtamalizados.....	88
Contenido de humedad (H).....	88
Contenido de antocianinas totales (AT).....	91
Contenido de cianidina 3-glucósido (C3G).....	96
Índice de absorción de agua (IAA).....	100
Índice de material soluble (IMS).....	104
Propiedades físicas.....	109
Color.....	109
Índice de expansión (IE).....	114
Densidad aparente (DA).....	117
Propiedades reológicas.....	118
Viscosidad máxima (VM).....	118
Viscoelasticidad.....	127
Características morfológicas.....	133
Propiedades térmicas.....	138
Análisis de textura.....	139
Esfuerzo de corte máximo (ECM).....	139
Optimización de las Condiciones de Procesamiento para la Obtención de Extrudidos.....	143
Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de humedad (H).....	143
Efecto de la HA, T y CHC sobre el pH.....	146
Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de antocianinas totales (AT).....	148
Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de cianidina 3-glucósido (C3G).....	151
Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de cianidina 3,5-diglucósido (C3,5diG).....	154
Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de pelargonidina 3-glucósido (Pel3G).....	155
Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>L</i>	159
Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>a</i>	162
Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>b</i>	166
Efecto de la HA, T y CHC sobre el índice de expansión (IE).....	169
Efecto de la HA, T y CHC sobre la densidad aparente (DA).....	173
Efecto de la HA, T y CHC sobre el esfuerzo de corte máximo (ECM).....	175

CONTENIDO (Cont...)	Página
Optimización del proceso de extrusión.....	178
Validación de las condiciones óptimas de procesamiento.....	179
Discusión General.....	187
CONCLUSIONES	189
RECOMENDACIONES	191
REFERENCIAS	193
ANEXO 1. Extrudidos Expandidos Obtenidos en la Primera Etapa de la Investigación.....	208
ANEXO 2. Extrudidos Expandidos Obtenidos en la Segunda Etapa de la Investigación.....	209
ANEXO 3. Artículo de Revisión.....	210
ANEXO 4. Artículo Experimental Publicado.....	219
ANEXO 5. Artículo Experimental Enviado.....	228

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Producción total de maíz en México en el año 2012.....	6
2	Principales partes anatómicas del grano de maíz.....	7
3	Estructura de las antocianidinas en frutas y vegetales.....	14
4	Estructura química de la cianidina 3-O- β -glucósido.....	19
5	Formas químicas y color de las antocianinas en función del pH	21
6	Reacción de degradación de las antocianinas. Donde $R_1= H$ o sacárido, R_2 y $R_3= H$ o metilo.....	22
7	Posible mecanismo de degradación térmica de la pelargonidina 3-glucósido y cianidina 3 glucósido.....	25
8	Componentes de un extrusor de tornillo simple.....	30
9	Representación de la cocción del almidón y su proceso de transformación	37
10	Superficie de respuesta tridimensional donde indicando el rendimiento esperado (η) como una función de temperatura (x_1) y la presión (x_2).....	42
11	Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.....	43
12	Diagrama de flujo general de la investigación.....	50
13	Maíz azul criollo, cosecha 2011.....	52
14	Evaluación de parámetros de color en granos.....	57
15	Maíz azul molido de: (A) primera; y (B) tercera molienda.....	59
16	Separador de tamices utilizado para la determinación de DTP.....	51
17	Extrusor de tornillo simple y obtención de los extrudidos expandidos.....	61
18	Equipo para evaluar la viscoelasticidad de los extrudidos.....	68
19	Análisis de textura de los extrudidos de maíz azul.....	58
20	Concentración de los extractos de las muestras de extrudidos para el análisis de antocianinas específicas por HPLC-UV- DAD.....	73
21	Modelo empírico de la interacción entre los factores de procesamiento y las variables respuesta.....	77
22	Abundancia relativa de ácidos grasos mayoritarios en el maíz azul.....	80
23	Distribución de tamaño de partícula del maíz azul molido de la primera (M1) y tercera (M3) molienda.....	87
24	Efecto de la HA y la T sobre el IAA de extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda.....	103
25	Efecto de la HA y el ITP sobre IAA en los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz molido de diferente ITP.....	105
26	Efecto de la HA y la T sobre el IMS de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda.....	106

Figura	LISTA DE FIGURAS (Cont...)	Página
27	Efecto de la HA y el ITP sobre el IMS de extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz molido de diferente ITP.....	108
28	Efecto de HA y la T sobre la VM de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda.	121
29	Efecto de la HA y el ITP sobre la VM de los extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente ITP.....	123
30	Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz de la primera molienda (M1, ITP 83.9) y 130°C.....	125
31	Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la primera molienda (M1, ITP 83.9) y 140°C.....	125
32	Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la tercera molienda (M3, ITP 94.1) y 130°C.....	126
33	Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la tercera molienda (M3, ITP 94.1) y 140°C	126
34	Efecto de la HA y la T sobre el Tan δ de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda.	130
35	Efecto de la HA y la T sobre el Tan δ de los extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente ITP.....	132
36	Micrografías de maíz azul (1,500 x) de: (A) ITP 83.9; y (B) ITP 94.1.....	134
37	Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 83.9, temperatura final del extrusor de 130°C y HA de: (A) 14; (B) 16; y (C) 20.5%.....	134
38	Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 83.9, temperatura final del extrusor de 140°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.....	136
39	Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 94.1, temperatura final del extrusor de 130°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.....	136
40	Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 94.1, temperatura final del extrusor de 140°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.....	137
41	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de humedad en los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	147

Figura	LISTA DE FIGURAS (Cont...)	Página
42	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de antocianinas totales (AT) de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	149
43	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de C3G de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	153
44	Gráficas de superficie y contorno del efecto la HA, T y CHC sobre el contenido de C3,5diG de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y la T; (B) HA y la CHC; y (C) T y CHC.....	156
45	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de Pel3G en los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	158
46	Gráficas de superficie y contorno del efecto la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>L</i> de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	163
47	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>a</i> de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	165
48	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color <i>b</i> de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	168
49	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el IE de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	171
50	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre la DA los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	174
51	Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el esfuerzo de corte máximo de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.....	177
52	Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores HA y T, para la obtención de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul.....	180

Figura	LISTA DE FIGURAS (Cont...)	Página
53	Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores HA y CHC, para la obtención de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul	181
54	Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores T y CHC, para la obtención los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul.....	182
55	Botanas expandidas nixtamalizadas elaboradas con: (A) maíz azul; y (B) blanco utilizando las condiciones óptimas del proceso de extrusión.....	184

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Composición química de las distintas partes del grano de maíz...	9
2	Diseño experimental para la extrusión con diferentes combinaciones de los factores de procesamiento.....	71
3	Composición química del maíz azul.....	79
4	Contenido de antocianinas en maíz azul.....	82
5	Propiedades físicas del maíz azul.....	84
6	Propiedades químicas y físicas del maíz con diferente molienda	85
7	Índice de tamaño de partícula (ITP) en fracciones de maíz azul de M1 y M3.....	89
8	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de humedad de extrudidos de maíz azul.....	90
9	Contenido de humedad (H) de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.....	92
10	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de antocianinas totales de extrudidos de maíz azul	93
11	Contenido de antocianinas totales (AT) en extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.....	95
12	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de cianidina 3-glucósido de extrudidos de maíz azul.....	97
13	Contenido de cianidina 3-glucósido (C3G) en extrudidos nixtamalizados de maíz azul elaborados con diferente T, ITP y HA.....	99
14	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el índice de absorción de agua e índice de material soluble de extrudidos de maíz azul.....	101
15	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre los parámetros de color de los extrudidos nixtamalizados.....	111
16	Parámetros de color L , a y b en extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.....	112
17	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de de la T, ITP y HA sobre el índice de expansión y la densidad aparente de extrudidos nixtamalizados de maíz azul.....	115
18	Propiedades físicas de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.....	116
19	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre la viscosidad máxima de extrudidos de maíz azul.....	119

Tabla	LISTA DE TABLAS (Cont...)	Página
20	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre los parámetros viscoelásticos de los extrudidos nixtamalizados de maíz azul	128
21	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el esfuerzo de corte máximo de extrudidos nixtamalizados de maíz azul.....	140
22	Esfuerzo de corte máximo de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.....	141
23	Coefficientes de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción), análisis de varianza y coeficientes de determinación, mostrando la relación entre los factores de procesamiento y las propiedades químicas de los extrudidos.....	144
24	Diseño experimental para el proceso de extrusión mostrando las diferentes combinaciones de HA, T y CHC, y el promedio obtenido para cada una de las propiedades químicas evaluadas en los extrudidos expandidos nixtamalizados.....	145
25	Coefficientes de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción), análisis de varianza y coeficientes de determinación, mostrando la relación entre los factores de procesamiento y las propiedades físicas y de textura de los extrudidos.....	160
26	Diseño experimental para el proceso de extrusión, mostrando las diferentes combinaciones de las variables de procesamiento y los valores promedio de las propiedades físicas y de textura evaluadas en los extrudidos.....	161
27	Valores de predicción y promedio de las evaluaciones químicas, físicas y de textura en los extrudidos expandidos nixtamalizados obtenidos con las condiciones óptimas de procesamiento.....	185

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado	Unidades
<i>a</i>	Parámetro de color, rojo (+) verde (-)	
ALT	Almidón total	%
AT	Antocianinas totales	mg/kg
<i>b</i>	Parámetro de color, amarillo (+) azul (-)	
bs	Base seca	
CHC	Concentración de hidróxido de calcio	%
C3G	Cianidina 3 glucósido	mg/kg
C3,5diG	Cianidina 3,5 diglucósido	mg/kg
DA	Densidad aparente	g/cm ³
DTP	Distribución de tamaño de partícula	%
ECM	Esfuerzo de corte máximo, $\sigma_{\text{máx}}$	kPa
G'	Módulo de elasticidad	Pa
G''	Módulo de almacenamiento	Pa
HA	Humedad de alimentación	%
HPLC-FID	Cromatografía líquida de alta resolución acoplada a detector de ionización de flama, por sus siglas en inglés	
HPLC-UV-DAD	Cromatografía líquida de alta resolución acoplada a detector ultravioleta y arreglo de diodos	
IAA	Índice de absorción de agua	peso de gel/ g muestra seca
IE	Índice de expansión	
IMS	Índice de material soluble	% sólidos solubles secos
ITP	Índice de tamaño de partícula	
<i>L</i>	Parámetro de color, blanco (100) negro (0)	
M1	Maíz de la primera molienda	
M3	Maíz de la tercera molienda	
Pe13G	Pelargonidina 3 glucósido	mg/kg
PMG	Peso de mil granos	g
PHL	Peso hectolítrico	kg/hL
T	Temperatura	°C
Tan δ	Tangente del ángulo de fase	
T_i	Temperatura inicial	°C
T_p	Temperatura pico	°C
T_f	Temperatura final	°C
VM	Viscosidad máxima	cP
ΔH_{gel}	Entalpía de gelatinización	J/g

INTRODUCCIÓN

El maíz es una gramínea que representa uno de los cereales más importantes en el mundo. Principalmente se utiliza para consumo humano, aportando la mayor parte de las calorías totales a la dieta de la población de países en desarrollo, siendo sus productos la base de su alimentación.

Existe una gran diversidad de maíces originarios de México. Dentro de las 59 razas descritas en el país se encuentran los maíces pigmentados, éstos presentan colores claros, como blanco y amarillo; y tonalidades negra, morada, azul, roja, entre otras. Contienen altos niveles de compuestos fenólicos (antocianinas), lo cual les confiere un valor agregado. En este contexto, existen estudios que adjudican propiedades nutraceuticas a ciertas variedades, debido a su contenido de sustancias con actividad biológica benéfica (antioxidante). Estas sustancias presentan una acción positiva en la salud neutralizando radicales libres, moléculas que intervienen en el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas.

Por otra parte, la tecnología más utilizada para el procesamiento del maíz es la nixtamalización tradicional. Su principal ventaja incluye el incremento del valor nutrimental de los productos obtenidos. Entre las desventajas se encuentran: una gran producción de agua residual altamente alcalina, en la cual se pierde gran cantidad de sólidos solubles. Además, durante el lavado del nixtamal se remueve gran cantidad de pericarpio, componente anatómico del grano constituido principalmente por polisacáridos no degradables.

Los productos nixtamalizados obtenidos de maíz pigmentado presentan en adición a lo anterior, una disminución hasta del 100% en el contenido de antocianinas durante el procesamiento, debido principalmente al elevado pH de la solución de cocimiento y a las altas temperaturas.

En México, Estados Unidos y otros países de Latinoamérica, los productos nixtamalizados como tortillas y botanas, representan una industria en franco crecimiento y con grandes ingresos económicos. Generalmente, las botanas

nixtamalizadas son freídas, proceso que incrementa el aporte calórico del producto. Además, se adicionan elevadas cantidades de sodio, colorantes y saborizantes artificiales, por lo que el consumo generalizado y frecuente de estos productos resulta perjudicial para la salud a mediano y largo plazo. Como una alternativa para la elaboración de estos productos, se ha propuesto la utilización de maíces pigmentados debido su alto contenido de antocianinas en comparación con el maíz blanco.

El proceso de extrusión de granos es comúnmente utilizado en la industria para producir alimentos tipo botana. El principio fundamental de la extrusión se basa en la aplicación de calor y trabajo mecánico en el material sólido, el cual es posteriormente convertido a un fluido, promoviéndose la termoplastificación y formado del material para la obtención de un producto prácticamente terminado.

La extrusión ha demostrado ser una alternativa versátil que facilita y reduce el tiempo de producción, además, no produce efluentes contaminantes. Una de las principales ventajas de la producción de botanas mediante este proceso, se debe a que el producto final no se somete al proceso de freído para obtener una textura crujiente. En cuanto al aporte de fibra dietética, las botanas extrudidas de maíz integral conservan todos sus componentes anatómicos, por lo que su contenido de estos compuestos, es mayor que en las botanas elaboradas mediante nixtamalización tradicional.

La situación actual del país demanda a la comunidad científica el desarrollo e innovación de métodos alternativos de procesamiento de alimentos, que den como resultado una mejora en las propiedades de los productos obtenidos. Diversos investigadores han desarrollado tecnologías más sencillas y eficientes, para conservar las características propias (nutrimentales y sensoriales) de los productos nixtamalizados.

En la presente investigación se realizó la optimización de las condiciones del proceso de extrusión, para la producción de botanas expandidas elaboradas con maíz azul integral en función de los siguientes parámetros de calidad: contenido de

antocianinas, índice de expansión (crujencia) y color (parámetro *b*). Esto con la finalidad de elevar el valor funcional y nutrimental de las botanas desarrolladas y proporcionar productos alternativos con mayor potencial benéfico para los consumidores, haciendo de estos alimentos una nueva generación de “productos nutraceuticos” de fácil manufactura e impacto positivo en la salud de la población.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Generalidades del Maíz

Definición y origen

El maíz pertenece a la especie *Zea* de la familia de las gramíneas, es una planta anual dotada de un amplio sistema radicular fibroso (FAO, 1993). Botánicamente, el grano o semilla (*Zea mays* L.) es un fruto seco e indehiscente denominado cariósido, en el cual el embrión está adherido a todos los componentes del óvulo desarrollado. Fue una de las primeras plantas cultivada por los agricultores hace 7,000-10,000 años, proviene del teocintle (*Zea mays* sp. *mexicana* L.) que crece de manera silvestre en la Mesa Central de México (Wilkes, 1989). La evidencia más antigua del maíz como alimento humano procede de algunos lugares arqueológicos de México, donde algunas mazorcas pequeñas estimadas en más de 5,000 años de antigüedad, fueron encontradas en cuevas de habitantes primitivos (Paliwal & Granados, 2001).

Clasificación

De acuerdo a Figueroa et al. (2013), existen varias clasificaciones raciales enfocadas desde perspectivas botánica, genética, agronómica, citológica y taxonómica, con énfasis en descriptores fenotípicos de la mazorca o grano. Sin embargo, una de las clasificaciones más utilizadas es la de Sturtevant (1899). Este autor propuso siete grupos principales de maíz (dentado, cristalino, dulce, harinoso, reventado, ceroso y tunicado), cinco de los cuales se basaron en la composición del endospermo de los granos. Con respecto a la selección por calidad de grano, los maíces con alto valor agregado son los que presentan características especiales de calidad que aumentan el beneficio para el usuario (Gómez et al., 2006). Dentro de este grupo se encuentra el maíz azul, como fuente de pigmentos (antocianidinas) y antioxidantes naturales, utilizado para hacer tortillas, tostadas y botanas (Salinas et al., 2007; De la Parra et al., 2007).

Producción

La producción mundial de este cereal en el año 2012 fue de 875' 098, 631 toneladas. Los principales países productores fueron: Estados Unidos (32%), China (24%), Brasil (8%), UE-27 (7%) y Argentina (3%) (FAOSTAT, 2014. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>. Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

En la Figura 1, se presenta la producción total en México para este cereal en el año 2012, la cual fue de 34'170,540 toneladas (SIAP, 2014). En lo que respecta a granos pigmentados, actualmente no se cuenta con estadísticas oficiales acerca de la producción nacional y mundial. En nuestro país, se estima una cosecha anual de 300 mil toneladas de granos pigmentados (Antonio et al., 2004). Entre los principales estados productores de maíz azul se encuentran: Puebla, Hidalgo, Chiapas (Salinas et al., 2012), México (Salinas et al., 2010), Sinaloa y Tlaxcala (Agama-Acevedo et al., 2011).

A pesar de que se han desarrollado varias investigaciones que involucran la utilización de maíces pigmentados y sus propiedades funcionales, no existen datos oficiales por parte de organismos gubernamentales acerca de la producción. Lo anterior invita a realizar un estudio de campo serio por parte del máximo organismo en cuestión de cultivos y producción de granos (SIAP) en nuestro país.

Morfología del grano

La morfología se conforma principalmente de cuatro partes anatómicas: pericarpio, pedicelo, endospermo y germen (FAO, 1993) (Figura 2).

Pericarpio. Se compone de un grupo de células de pared gruesa, alargadas y petrificadas que forman un tejido denso y duro. Debajo de esta estructura, existe una capa de células esponjosas, tubulares y transversales, continua con las células esponjosas del pedicelo.

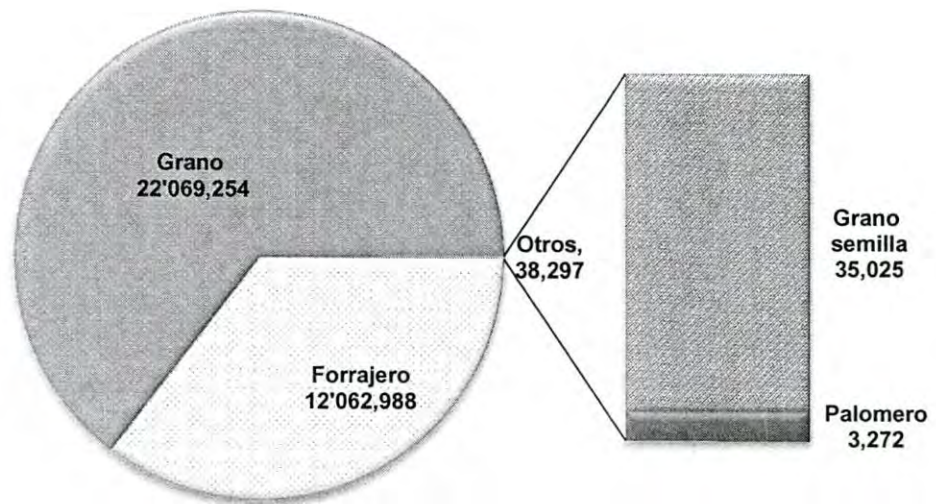


Figura 1. Producción total de maíz en México en el año 2012.

Fuente: SIAP, 2014. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.

(Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

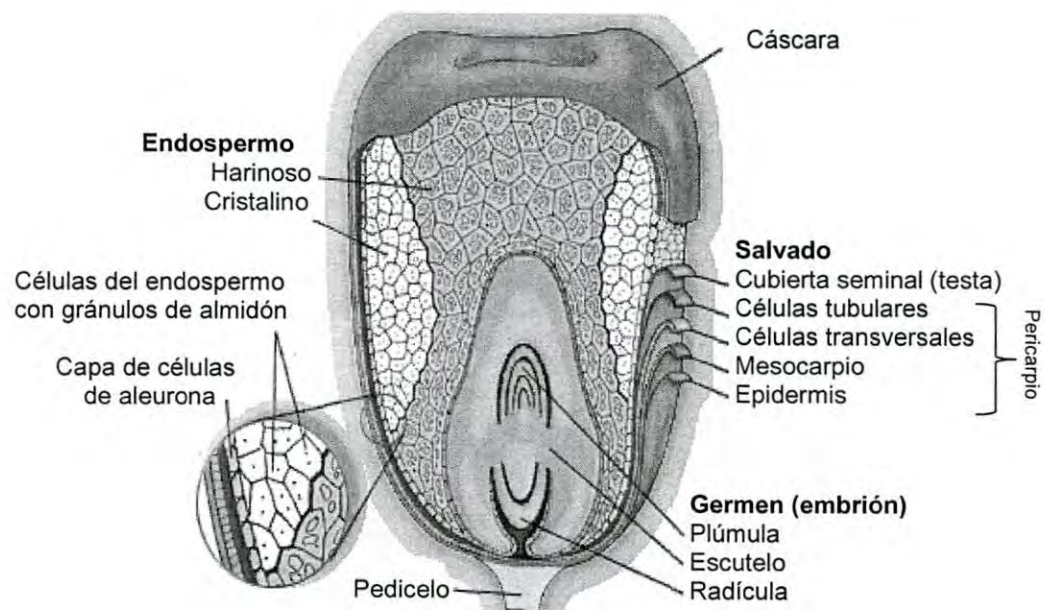


Figura 2. Principales partes anatómicas del grano de maíz.

Fuente: Adaptado de <http://www.intechopen.com/books/scanning-electron-microscopy/the-application-of-scanning-electron-microscope-sem-to-study-the-microstructure-changes-in-the-field>. (Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

Después de esta capa se encuentra una membrana cerosa delgada conocida como cubierta externa de la semilla, que hacia el interior contiene un tejido de células gruesas llamado capa de células de aleurona. Todos los componentes del pericarpio constituyen aproximadamente el 5.2% del peso seco del grano (Paliwal & Granados, 2001).

Pedicelo. Es la parte que se une al olote a través de una estructura esponjosa, adaptada para una rápida absorción de agua. Entre esta capa y la base del germen se encuentra un tejido negro conocido como capa hilar, que funciona como mecanismo sellante durante la maduración del grano (Reyes, 1990). Constituye un 0.8% del peso total del grano (Watson, 1987).

Endospermo. Representa aproximadamente el 82% del grano en base seca, está compuesto por alrededor de 86% almidón. Dentro de esta estructura se encuentran dos regiones: una harinosa y otra córnea, generalmente en una relación de 2:1. La región harinosa está conformada por células grandes, gránulos redondos y una delgada matriz proteica. El endospermo córneo tiene pequeñas células y gránulos de almidón, además de una densa matriz proteica (Jackson & Shandera, 1995). Este componente anatómico tiene un efecto fundamental en el uso final del grano, y proporciona las características específicas del producto durante su procesamiento.

Germen. Es el embrión u órgano reproductor del grano, se compone de plúmula, radícula y escutelo. El escutelo constituye el 90% del germen y funciona como almacén de nutrientes y hormonas, los cuales son movilizados hacia la plúmula por enzimas sintetizadas en la etapa inicial de germinación. Todas las células del embrión y el escutelo son activadas metabólicamente durante una hidratación. Esta parte del grano, conforma aproximadamente el 11% del peso del grano (Paliwal & Granados, 2001).

Composición química

La composición química del grano depende principalmente de las partes que lo constituyen (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de las distintas partes del grano de maíz.

Componente (%)	Endospermo	Germen	Pericarpio	Pedicelo
Almidón	87.6	8.3	7.3	5.3
Extracto etéreo	0.8	33.2	1.0	3.8
Proteínas	8.0	18.4	3.7	9.1
Cenizas	0.3	10.5	0.8	1.6
Azúcares	0.6	10.8	0.3	1.6
Fibra	2.7	18.8	86.9	78.6

Fuente: Paliwal & Granados (2001).

Carbohidratos. El maíz es una fuente importante de estos compuestos, los cuales se encuentran principalmente en el endospermo. Se dividen en dos tipos: carbohidratos simples o azúcares, y carbohidratos complejos o polisacáridos (almidón y celulosa).

Azúcares. Estos compuestos son estructuras sencillas en forma de glucosa, sacarosa y fructosa. Se encuentran en cantidades que varían del 1 al 3% del grano (FAO, 1993).

Almidón. Constituye aproximadamente el 73% del peso del grano. Está conformado por dos polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina. La amilosa es una molécula esencialmente lineal compuesta de unidades de glucosa, representando alrededor del 25-30% del almidón. La molécula amilopectina presenta unidades de glucosa aunque en forma ramificada, y constituye aproximadamente entre el 70-75% del almidón (Jackson & Shandera, 1995).

Extracto etéreo. El aceite del grano se encuentra principalmente en el germen, en valores del 3 al 18%. Posee un bajo nivel de ácidos grasos saturados: palmítico y esteárico con valores medios de 11% y 2%, respectivamente. Contiene niveles relativamente elevados de ácidos grasos poli-insaturados, fundamentalmente de ácido linoléico con un valor del 24% (FAO, 1993).

Proteínas. Constituyen aproximadamente del 8-10% del grano, se encuentran principalmente en el germen. La principal proteína en el maíz es una prolamina denominada zeína. Estos compuestos están formados al menos por cinco fracciones distintas. Las albúminas, las globulinas y el nitrógeno no proteico totalizan aproximadamente el 18% el total de nitrógeno con proporciones del 7.5 y 6%, respectivamente.

La fracción de prolamina soluble, constituye el 52% del nitrógeno del grano. La globulina conforma el 25% de las proteínas. Normalmente, una fracción reducida del 5% es nitrógeno residual (Hoseney, 1998).

Fibra dietética. La fibra es un conjunto de productos que, a excepción de las ligninas (polímeros de alcoholes aromáticos), están constituidos por polisacáridos no degradables. La fibra dietética total incluye dos porciones diferentes, fibra insoluble y fibra soluble. La fibra insoluble está conformada por celulosa, hemicelulosa y lignina. La fibra soluble de forma natural contiene pectinas, gomas y mucílagos. Los componentes más importantes de la pared celular del maíz desde el punto de vista nutricional, son el pericarpio y el pedicelo, los cuales son fuente importante de fibra dietética. (Bressani et al., 1989). Después del almidón, las proteínas y las grasas, la fibra dietética es el componente que se encuentra en mayores cantidades en el maíz (FAO, 1993).

Es importante destacar que dependiendo del grupo al que pertenezca determinada variedad de maíz, este presentará características químicas y físicas específicas, lo que determinará el tipo de procesamiento y el uso al que será destinado. Aunado a lo anterior, las propiedades funcionales de los granos también dependerán de su composición química, como es el caso de los maíces coloreados o pigmentados.

Maíces Pigmentados

Existe una gran diversidad de maíces de pigmentados originarios de México, los cuales se encuentran dentro de las 59 razas descritas en el país con base en caracteres morfológicos y polimorfismos de isoenzimas (Sánchez et al., 2000). Este tipo de maíces se cultivan también en otros países de Sudamérica, como es el caso de las regiones Andinas de Bolivia y Perú. Además, se ha reportado su cultivo en ciertas provincias de China únicamente con propósito ornamental.

El grano de maíz puede diferir significativamente en color de blanco a amarillo, anaranjado, rojo, púrpura, azul, negro y café. Las variaciones en el color se atribuyen a diferencias genéticas en sus componentes (pericarpio, aleurona, germen y

endospermo). El pericarpio puede ser transparente, anaranjado, rojo, rojo pálido, rojo oscuro, café o variado; la capa de aleurona puede ser transparente, rojo púrpura, púrpura o café; el germen puede ser transparente, amarillo, rojo-anaranjado o púrpura; el endospermo es igualmente incoloro o amarillo, anaranjado o rojo-anaranjado. En los granos de endospermo pigmentado, el pericarpio y la aleurona deben ser transparentes para que el verdadero color del endospermo pueda ser observado (Watson & Ramstad, 1987).

Características químicas del maíz azul

En su mayoría, este tipo de grano es típicamente harinoso. El endospermo es de textura suave, y posee mayor valor nutrimental debido a que su contenido de minerales es mayor que el de otras variedades. Además, contiene altos niveles de lisina (2.3 mg/g, bs) en comparación con dos variedades comerciales de maíz amarillo (1.4 mg/g, bs) y blanco (1.6 mg/g, bs). Así, los maíces de color azul representan una fuente más completa de proteínas en comparación con los maíces blanco y amarillo (Dickerson, 2003). Generalmente, los pigmentos se concentran en su mayoría en la capa de células de aleurona, haciendo que los granos presenten un color más oscuro parecido al negro (Betrán et al., 2001).

El pericarpio del grano es translúcido, al retirar el estrato unicelular que constituye la capa aleurona, el resto del endospermo carece de pigmentación (Salinas et al., 2010). También se ha sugerido la presencia de pigmentos en el germen de ciertas variedades de maíz (Betrán et al., 2001). Los maíces pigmentados contienen compuestos fenólicos, principalmente del grupo de los flavonoides denominados antocianinas (Masuoka et al., 2012). Las antocianinas se encuentran contenidas en el pericarpio, la capa de aleurona e incluso en el endospermo de los granos de maíz (Betrán et al., 2001). Estos compuestos le proporcionan a sus productos un valor nutracéutico, por lo que desde hace algunos años se ha incrementado el cultivo, uso y estudio de este tipo de granos (Ruíz-Torres et al., 2008).

Antocianinas

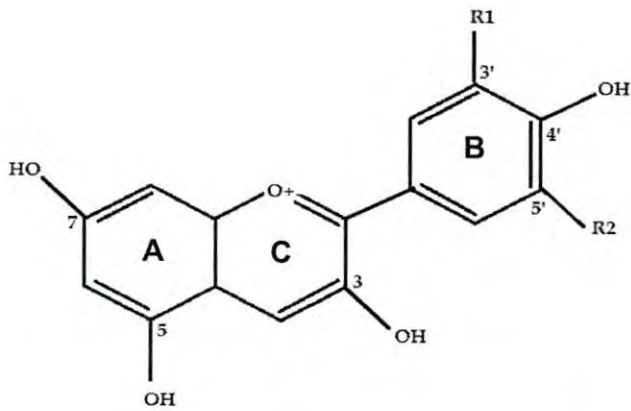
Características químicas

Las antocianinas son pigmentos ampliamente distribuidos en las plantas pertenecientes a los flavonoides, un subgrupo importante de los compuestos fenólicos. El término antocianina es derivado de los vocablos griegos *anthos* (flor) y *kyáneos* (azul). Estos compuestos son los responsables de los colores azul, púrpura y rojo en plantas comestibles, principalmente cereales y frutas (Escribano-Bailón et al., 2004). En maíz, la conversión enzimática de las leucoantocianidinas a antocianidinas está controlada por el gen *anthocyaninless2* (*a2*). La transformación de *a2* en la capa de aleurona mediante bombardeo de partículas con el ADN_c de *a2*, conlleva a la producción de células pigmentadas (Cone, 2007).

La forma aglicona de las antocianinas o antocianidina posee una estructura basada en el ion flavilio ó 2-fenilbenzopirillium, que presenta grupos hidroxilo y metoxilo en diferentes posiciones (Figura 3). Consta de un esqueleto carbonado en forma C-6 (anillo A)- C-3 (anillo B)- C-6 (anillo C), cuya estructura forma un anillo cromano unido a un segundo anillo aromático (B) en la posición dos (Horbowicz et al., 2008).

El tipo de antocianidina formado depende del grado o nivel de hidroxilación o metoxilación del anillo (B) de la molécula (Garzón, 2008). El color de las antocianinas depende del número y posición de los grupos sustituyentes en la molécula. Un aumento en la cantidad de grupos hidroxilo produce pigmentos de tonos azules, por el contrario, el predominio de grupos metoxilo origina una tonalidad roja (Stintzing et al., 2002). Se han descrito de 12 a 17 antocianidinas diferentes, sin embargo, solo seis se encuentran comúnmente en frutas, vegetales y cereales como el maíz (De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta, 2008).

Las antocianidinas no se acumulan como tal en las plantas sino en forma glucosilada, es decir, unidas a azúcares, en cuyo caso son denominadas antocianinas. El azúcar presente en la molécula le confiere gran solubilidad y cierta estabilidad.



Tipo de Antocianidina	R1	R2
Cianidina	OH	H
Delfinina	OH	OH
Malvidina	OCH ₃	OCH ₃
Peonidina	OCH ₃	H
Petunidina	OH	OCH ₃

Figura 3. Estructura de las antocianidinas en frutas y vegetales.

Fuente: Adaptada de De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta (2008).

Generalmente, la molécula de azúcar se encuentra unida en la posición 3 de grupo fenólico, aunque también puede presentarse en las posiciones 5 y 7 (Salinas et al., 2010). Con base al número de moléculas de azúcares presentes en su estructura, las antocianinas se clasifican en: mono-glucosiladas, di-glucosiladas y tri-glucosiladas. Por lo tanto, los tipos de azúcares presentes son mono, di o tri-sacáridos. Así, los monosacáridos más comunes son pentosas, como la arabinosa y xilosa; o bien hexosas, de las cuales la D-glucosa es la más frecuente, aunque también se encuentran presentes la galactosa o ramnosa. Los disacáridos que más se presentan son la gentobiosa, soforosa, sambubiosa y rutinosa. Los trisacáridos reportados pueden ser lineales como la gentotriosa, o bien ramificados como xilosilrutinosa o glicosilrutinosa (Strack & Wray, 1989).

Las antocianinas pueden encontrarse en forma acilada debido a la acilación de los residuos de azúcares con derivados de ácidos orgánicos alifáticos como el succínico, málico, malónico, oxálico y acético. Además, se pueden encontrar unidas a ácidos cinámicos como el *p*-cumárico, sináptico, ferúlico y caféico. Las formas no aciladas son menos estables que las antocianinas que presentan uno o más grupos acilo (De Pascual-Teresa et al., 2002).

Tipos

Los tipos de antocianinas más importantes encontrados en el maíz azul son la cianidina 3-glucósido, cianidina 3-galactósido, pelargonidina 3-glucósido y malvidina 3-glucósido (Salinas et al., 2003). Estos compuestos se derivan principalmente de la cianidina y pelargonidina, ambas antocianidinas han sido identificadas en maíces azules originarios de Bolivia. Por su parte, Castañeda-Ovando et al. (2010) encontraron en esta coloración de grano como principales componentes a la cianidina 3-glucósido-*p*-cumarato, peonidina 3-glucósido, cianidina 3-glucósido, pelargonidina 3-glucósido y la antocianidina pelargonidina.

Nakatani et al. (1979) aislaron e identificaron las antocianinas de granos de maíz morado peruano, encontrando como la principal antocianina a la cianidina 3-

glucósido. Además, se han descrito otras formas glucosiladas de esta antocianina, como pelargonidina, peonidina y delfinina (Mazza & Miniati, 1993).

Los maíces de color morado provenientes de Perú y Bolivia, han sido los más estudiados en lo que respecta al perfil de antocianinas. Al parecer, este tipo de coloración produce un mayor rendimiento de antocianinas al momento de su extracción. Se han identificado tres tipos antocianinas no aciladas: la cianidina 3-glucósido, pelargonidina 3-glucósido y peonidina 3-glucósido (Yang et al., 2009). Con respecto a las antocianinas aciladas, se identificó a la cianidina 3-(6''malonilglucósido), pelargonidina 3-(6''-malonilglucósido), peonidina 3-(6''-malonilglucósido), cianidina 3-(6''-etilmalonilglucósido), pelargonidina 3-(6''-etilmalonilglucósido) y peonidina 3-(6''-etilmalonilglucósido) (De Pascual-Teresa et al., 2002).

Por su parte Aoki et al. (2002) al igual que otros autores, reportaron a la cianidina 3-O- β -D-glucósido como la principal antocianina en extractos etanólicos obtenidos de maíz morado peruano. También confirmaron la presencia de otras cinco antocianinas más: pelargonidina 3-O- β -D-glucósido, peonidina 3-O- β -D-glucósido, cianidina 3-O- β -D-(6-malonil-glucósido), pelargonidina 3-O- β -D-(6-malonil-glucósido) y peonidina 3-O- β -D-(6-malonil-glucósido). Estos autores concluyeron que los derivados de la cianidina constituyen aproximadamente el 70 % de las antocianinas del grano. En diferentes provincias de China se ha detectado la presencia de cianidina 3-O-glucósido-2-malonilglucósido, peonidina 3-(malonilglucósido) y la peonidina 3-(dimalonilglucósido) en cinco híbridos de maíz morado. Además, se comprobó que estos compuestos son estables en un rango amplio de tiempos y temperaturas, por lo que pudieran presentar una mayor estabilidad durante su procesamiento (Zhao et al., 2008).

Actividad biológica

Existe evidencia científica que sugiere efectos antioxidantes de las antocianinas, disminuyendo el riesgo de la incidencia y desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas como la diabetes tipo 2 y algunos tipos de cáncer (Liu, 2007). Los compuestos antioxidantes promueven la salud, disminuyendo especies reactivas que

de otra manera ocasionarían efectos metabólicos dañinos. En este aspecto, la mayoría de las especies reactivas de oxígeno (ERO, moléculas químicamente reactivas) son consideradas dañinas. Lo anterior sugiere que maximizando las concentraciones de antioxidantes, se podría minimizar el riesgo de desarrollar ciertas enfermedades (Finley et al., 2011).

El término “antioxidante” posee diferentes connotaciones, por ejemplo, para los bioquímicos y nutricionistas, el término sugiere un compuesto capaz de inhibir las ERO's generados metabólicamente. Sin embargo para los científicos en alimentos, implica una sustancia utilizada con características funcionales (retardar la oxidación). Otros investigadores, lo aplican para describir alimentos o sustancias con valores elevados en las mediciones de ensayos de capacidad de inhibición de radical, como la prueba de capacidad de absorbanza del radical oxidativo (ORAC, por sus siglas en inglés) (Flinley et al., 2011).

En general, la actividad biológica de las antocianinas, antocianidinas y/o alimentos ricos en estos compuestos se puede manifestar en diferentes niveles: prevención de enfermedad cardiovascular, anticancerígena, antitumoral y antimutagénica; interfiriendo con la absorción de glucosa y protección de las células pancreáticas; protección contra daño hepático y gástrico; efecto positivo en la visión nocturna y contra la miopía, cataratas y degeneración macular; actividad antimicrobiana y antiviral; y efecto contra procesos neurodegenerativos (De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta, 2008).

Las razas de maíz presentan variantes en función al tipo de coloración del grano, el cual está determinado por la presencia de ciertos compuestos con actividad biológica de tipo antioxidante (Irani et al., 2003). Los granos integrales de maíces pigmentados contienen compuestos fitoquímicos de tipo lipofílico e hidrofílico, los cuales se concentran en el pericarpio y el germen (Adom & Liu, 2002), lo que en consecuencia, cambia el contenido de flavonoides, polifenoles, fitoesteroles, carotenos, xantófilas y otros compuestos nutracéuticos que benefician la salud.

Los compuestos fenólicos específicos de color rojo y morado, encontrados en el pericarpio y capa de aleurona de granos de cereales, son las proantocianidinas y antocianinas, moléculas hidrofílicas bioactivas (Min et al., 2012). Las antocianinas son capaces de prevenir daño oxidativo causado por las ERO's en el ADN, proteínas, lípidos y otras macromoléculas (De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta, 2008). La cianidina 3-glucósido (Figura 4) es la antocianina mayoritaria en el maíz azul. Esta antocianina ha mostrado una alta capacidad de inhibición de radicales libres incluso el doble que Trolox, un compuesto altamente antioxidante (Kuskoski et al., 2003). El maíz morado peruano posee mayor capacidad antioxidante y mejores cinéticas anti-radicales libres que los arándanos (*Vaccinium myrtillus* L.), en contenidos similares de antocianinas y compuestos fenólicos.

López-Martínez et al. (2011), evaluaron la actividad antioxidante de extractos de antocianinas de maíces blanco, rojo, azul y morado. Encontraron que la variedad morada presentó el mayor porcentaje (70%) de actividad anti-radical, seguida de las variedades roja, azul y blanco. Por su parte Aguayo-Rojas et al. (2012), evaluaron la actividad antioxidante de granos de tres variedades de maíz pigmentado de color amarillo, rojo y azul. Estos autores reportaron que los fitoquímicos ligados, contribuyeron entre 64.7 y 74.5% en la actividad antioxidante hidrofílica total.

En otro estudio realizado por Lee et al. (2010), se evaluó la capacidad antioxidante de extractos obtenidos de 18 variedades de maíz. Estos autores concluyeron que las variedades de coloración morada y amarilla, mostraron un mayor efecto secuestrante de ERO's de entre 24 y 57%.

Recientemente, se han evaluado extractos de antocianinas obtenidos de ciertas variedades de maíces pigmentados criollos (rojo y azul), encontrándose una elevada actividad antioxidante en comparación con los genotipos amarillo y blanco. Además, se reportó una correlación positiva entre el contenido de antocianinas y la inhibición de mutagenicidad inducida con 2-aminoantraceno en dos cepas (TA98 y TA100) de *Salmonella typhimurum* (Mendoza-Díaz et al., 2012).

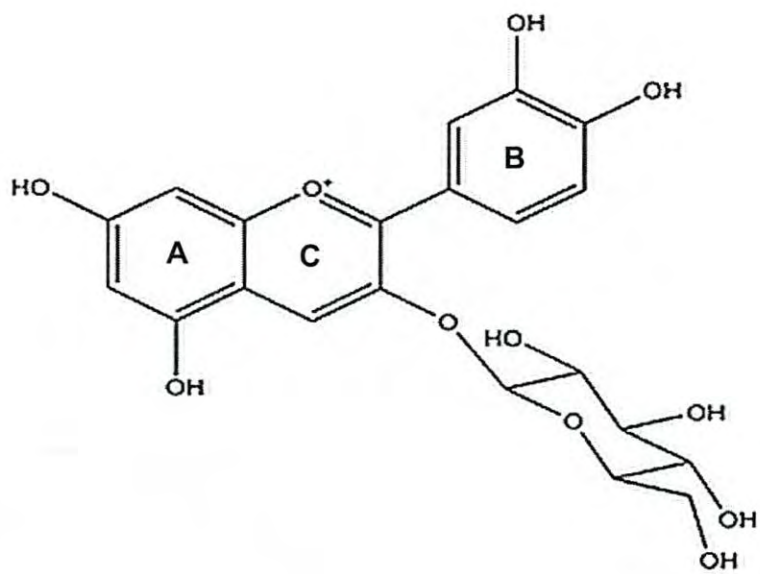


Figura 4. Estructura química de la cianidina 3-O-β-glucosido.

Fuente: Adaptada de De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta (2008).

Es de gran interés científico lograr la retención de la mayor cantidad de estos compuestos en los productos elaborados con este tipo de maíces. Sin embargo, como se expondrá a continuación, las antocianinas son afectadas por ciertas condiciones de procesamiento. Lo anterior, dificulta el desarrollo de productos que conserven en su totalidad las antocianinas contenidas en los granos pigmentados.

Factores que intervienen en la estabilidad de las antocianinas

pH. Los cambios en este factor producen grandes modificaciones de color en las antocianidinas, debido al gran número de reacciones que ocurren en los alimentos y a la adición de ciertos compuestos que cambian el entorno químico. Las antocianidinas pueden encontrarse en diferentes formas químicas, las cuales dependen del pH del entorno (Figura 5).

En soluciones acuosas y a pH 1, el catión flavilio (color rojo) es la especie predominante y contribuye en las coloraciones púrpura y roja. Entre pH de 2 a 4, prevalecen las especies inestables quinoidales azules sin carga. Si el pH incrementa (hasta 5), la ionización de los grupos hidroxilo forma especies inestables azules de tipo quinoidal aniónica (Bąwoska-Barzak, 2003).

Sin embargo, cuando el pH se encuentra entre 5-6, se pueden observar dos especies incoloras llamadas pseudobase carbinol y chalcona. Lo anterior ocurre por hidratación del esqueleto de la antocianidina en la posición 2. Las antocianidinas se pueden degradar a pH mayor de 7, dependiendo de sus grupos sustituyentes (Figura 6).

A valores de pH entre 4-6, coexisten cuatro formas estructurales de antocianidinas: catión flavilio, base quinoidal anhidra, base carbinol incolora y chalcona (color amarillo pálido). El equilibrio entre las bases quinoidales y el carbinol, ocurre vía catión flavilio. Cuando el pH incrementa, también lo hace la cantidad de base anhidra bajo condiciones más ácidas, donde la especie predominante es el ion flavilio (rojo) (Cooper-Driver, 2001).

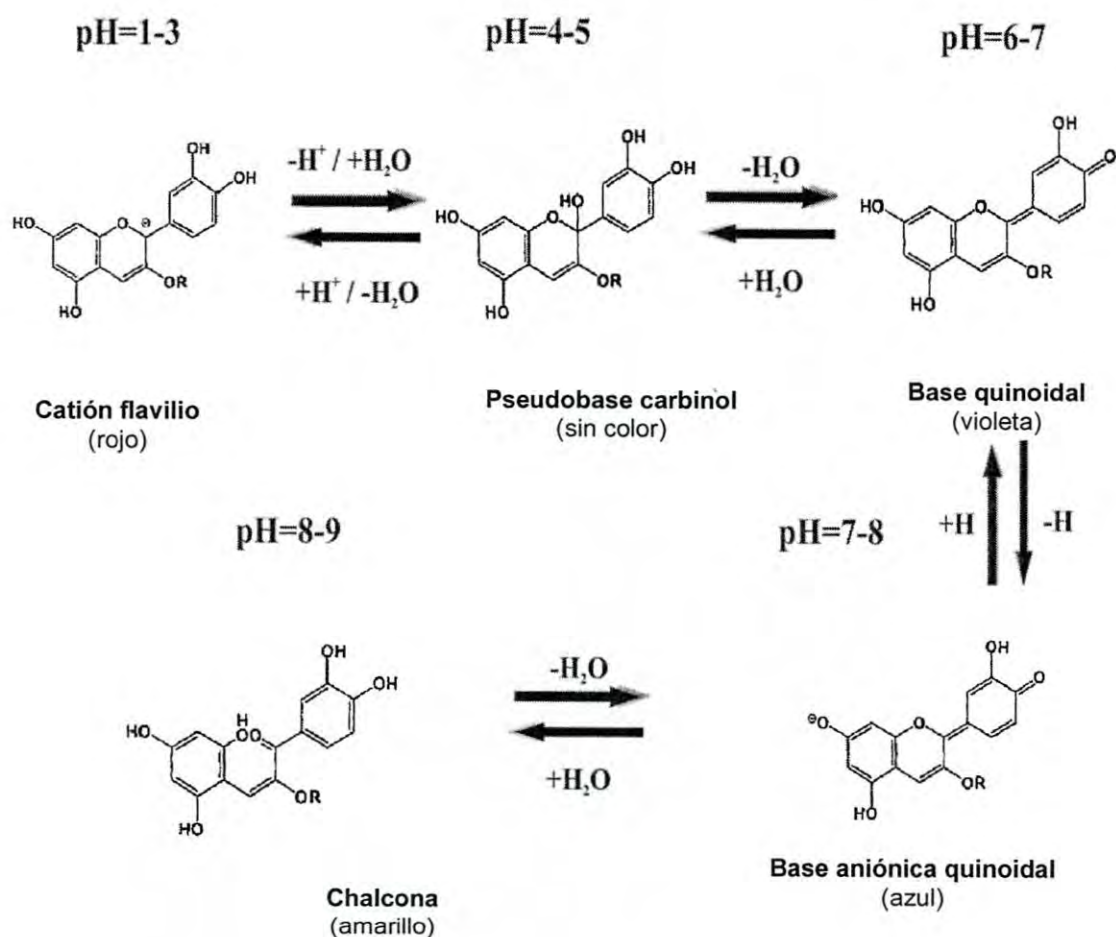


Figura 5. Formas químicas y color de las antocianinas en función del pH.

Fuente: Adaptada de <http://www.intechopen.com/books/the-mediterranean-genetic-codegrapevineand-olive/production-of-anthocyanins-in-grape-cell-cultures-a-potential-source-of-raw-material-forpharmaceuti>. (Fecha de consulta: marzo 15, 2014).

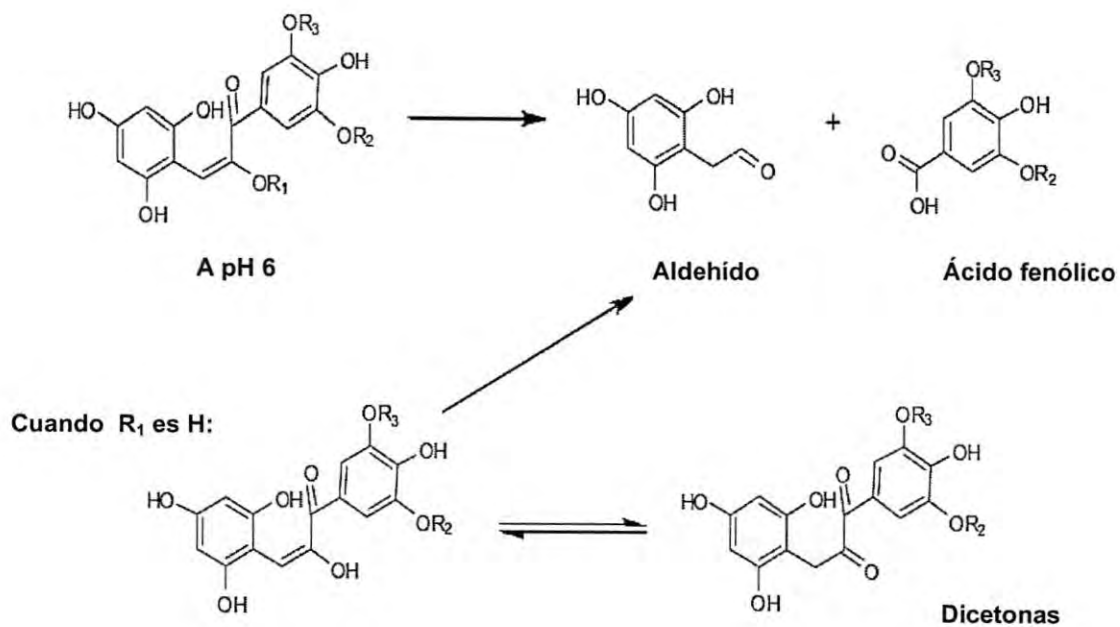


Figura 6. Reacción de degradación de las antocianinas. Donde R₁= H o sacárido, R₂ y R₃= H o metilo.

Fuente: Adaptada de Castañeda-Ovando et al. (2009).

La estabilidad de las antocianidinas es afectada por los sustituyentes del anillo B y la presencia de grupos metoxilo o hidroxilo adicionales, los cuales disminuyen la estabilidad de la aglicona en medio neutro, por lo tanto, la pelargonidina es la antocianina más estable (Fleschhut et al., 2006). En contraste con las agliconas, los derivados de monoglucósidos y mayormente diglucósidos son más estables en condiciones de pH neutras. Este comportamiento se explica debido a que las moléculas de azúcar evitan la degradación de intermediarios inestables a ácidos fenólicos y compuestos aldehído (Fleschhut et al., 2006).

Ciertas investigaciones acerca de la estabilidad de las antocianinas y la variación del color respecto al pH, concluyen que los cambios en la coloración de estos compuestos en la región alcalina son más significativos debido a su inestabilidad (Cabrita et al., 2000). Las antocianinas con sustituyentes acilo, son más estables durante el procesamiento y almacenamiento que otros pigmentos naturales. Esta mayor estabilidad ha sido atribuida a la superposición de los grupos acilo con el anillo pirilium del catión flavilio, lo que reduce la susceptibilidad de un ataque nucleofílico del agua y la subsecuente formación de una pseudobase o chalcona (copigmentación intramolecular).

La completa estabilización del color es alcanzada cuando las antocianinas se encuentran unidas preferentemente a ácidos aromáticos en vez de ácidos alifáticos (Giusti & Wrolstad, 2003). Además, los complejos más estables son formados cuando los ácido aromáticos están sustituidos en el anillo B del catión flavilio, en vez de la unión en el anillo A (Yoshida et al., 2002).

Temperatura. El tratamiento térmico afecta el contenido de antocianidinas y antocianinas. El mínimo procesamiento de frutas, vegetales o cereales puede afectar la estructura de las antocianidinas, cambiando su estabilidad química, induciendo o inhibiendo su biosíntesis (De Pascual-Teresa & Sánchez-Ballesta, 2008).

Las antocianinas se tornan transparentes o de colores tenues durante el calentamiento, debido a que las cuatro especies químicas cambian a formas transparentes como base carbinol y chalcona. Sin embargo, el grado de degradación

por efecto de la temperatura depende de varios factores relacionados con la estructura de las antocianinas y el pH (Andrés-Bello et al., 2013). Se ha demostrado que las antocianinas aciladas son más estables durante su calentamiento a 80°C, que las antocianinas que no poseen grupos acilos unidos a su estructura (Dyrby et al., 2001).

La magnitud del incremento en la temperatura tiene un efecto significativo en la estabilidad de las antocianinas. En un estudio reportado por Sadilova et al. (2006) se observó que los extractos de antocianinas de sauco (*Sambucus nigra* L.) presentaron una alta sensibilidad al tratamiento térmico. Después de 3 h de calentamiento a 95°C, se retuvo sólo el 50% de los pigmentos. Varios estudios han reportado una destrucción de antocianinas de tipo logarítmico con un incremento aritmético de la temperatura (Rhim, 2002; Brownmiller et al., 2008).

De la degradación térmica de las antocianinas, puede resultar una variedad de especies dependiendo de la severidad y naturaleza de la fuente de calor. Se conoce relativamente poco sobre los mecanismos de degradación, pero la estructura química y la presencia de otros ácidos orgánicos tienen un efecto específico. La velocidad de degradación de antocianinas incrementa durante el procesamiento y el almacenamiento conforme la temperatura aumenta (Patras et al., 2010). Lo anterior sugiere como primer paso en la degradación de las antocianinas, la apertura del anillo pirilium y la formación de una molécula de chalcona.

Se ha propuesto también como la etapa inicial de degradación, la hidrólisis de la molécula de azúcar y la formación de una aglicona. Además, las antocianinas se pueden destruir por calentamiento formando una estructura de chalcona, que se pudiera transformar más adelante en un derivado de cumarina glucósido con la pérdida del anillo B (Adams, 1973). El mecanismo probable de degradación térmica de dos antocianinas comunes (pelargonidina 3-glucósido y cianidina 3-glucósido) se presenta en la Figura 7.

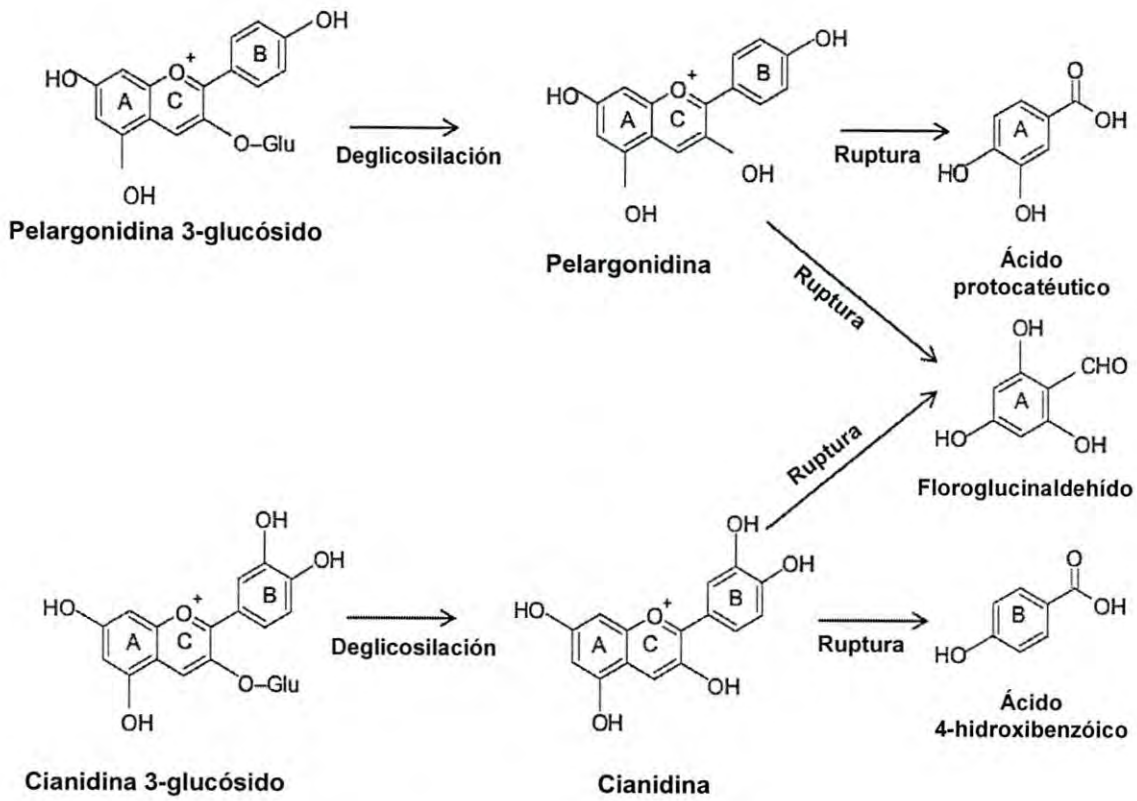


Figura 7. Posible mecanismo de degradación térmica de la pelargonidina 3-glucósido y cianidina 3-glucósido.

Fuente: Adaptada de Patras et al. (2010).

El enlace de la aglicona y el azúcar es más lábil que otros enlaces glucosídicos a pH de 2-4. Sin embargo, a pH 1 todos los enlaces glucosídicos son susceptibles a la hidrólisis, por ejemplo, el calentamiento de la cianidina 3-rutinoso resulta en la formación de ramnosa y glucosa, pero solo trazas de rutinosa. En un estudio realizado por Seeram et al. (2001), se demostró que la temperatura elevada en combinación con un alto pH, causa la degradación de antocianinas contenidas en cerezas (*Prunus avium* L.), resultando tres derivados del ácido benzoico. Sin embargo, otro estudio reportado por Von-Elbe & Schwartz (1996) sugiere que los 3,5 diglucósidos de cumarina, son productos comunes de la degradación térmica de las antocianinas con sustituciones de 3-5 diglucósidos. La degradación de antocianinas bajo condiciones de calentamiento isotérmico sigue una cinética de primer orden. La mayoría de los estudios citados anteriormente se llevaron a cabo bajo condiciones isotérmicas a temperaturas mayores de 100°C.

Sin embargo, la degradación de estos compuestos en alimentos sólidos y semisólidos como las frutas, granos y cereales no es isotérmica, por lo que el modelo de la cinética debería incluir un historial de tiempo y temperatura (Mishra et al., 2008). Debido a lo anterior, la velocidad de degradación constante y la energía de activación durante los sistemas de calentamiento isotérmico y no-isotérmico, dependen de la estabilidad de la antocianina en cuestión. Esto a su vez es dependiente de la composición, estructura, propiedades fisicoquímicas y la presencia de otras flavonas o ácidos orgánicos presentes en los alimentos (Patras et al. 2010).

Se puede obtener una mayor estabilidad en las antocianinas, aplicando periodos cortos de calentamiento durante el procesamiento y utilizando bajas temperaturas de almacenamiento. Se puede asumir entonces, que los rangos de temperaturas aplicadas durante el procesamiento y almacenamiento de alimentos que contienen pigmentos antociánicos, es un factor que presenta un efecto altamente significativo en la degradación de los mismos (Patras et al., 2010).

En conclusión, las antocianinas son moléculas altamente inestables, lo que dificulta su procesamiento en condiciones que requieran de altas temperaturas y altos niveles de pH. La mayor parte de las operaciones unitarias aplicadas para procesar el grano de maíz, utilizan elevadas temperaturas y la alcalinización del medio para obtener productos con características sensoriales específicas. La aplicación de estos procesos para la obtención de productos elaborados con maíces pigmentados, disminuye significativamente el contenido antocianinas en el producto terminado.

Procesamiento del Grano

Nixtamalización tradicional

La tecnología para producir tortillas y otros derivados del maíz es muy antigua y se ha transmitido de generación en generación, este proceso se denomina nixtamalización (del náhuatl, nextli, cal de cenizas y tamalli, masa cocida de maíz) (Cabrera, 1992).

Por lo general, los granos de maíz son cocidos con agua y cal para formar nixtamal. De manera más específica, los granos (1 kg) se cuecen con agua (3 L/kg de maíz) y cal (hidróxido de calcio, 1%) a temperatura de ebullición, durante 15-40 minutos. Posteriormente, el maíz cocido (nixtamal) se deja reposar durante 12-20 horas. La solución de cocimiento y resultante del reposo se conoce como nejayote. El nixtamal es lavado para eliminar el nejayote (exceso de agua, cal, fragmentos de pericarpio y sólidos solubles). Finalmente, se muele en molinos de piedra para obtener masa de la cual se elaboran una gran variedad de productos (Martínez-Flores et al., 2006).

Ventajas y desventajas. Las ventajas de procesar el maíz utilizando el método de nixtamalización tradicional, radican en la obtención de productos con sabor característico, que muy difícilmente se consigue a través de otro tipo de procesos. Una de las principales desventajas del proceso tradicional, se atribuye a la remoción y/o desecho de ciertos componentes del grano (pericarpio y otros sólidos solubles) a través del nejayote. Además, esta solución de lavado contiene grandes cantidades de cal o hidróxido de calcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), por lo que es considerado un efluente

contaminante debido a su elevado pH. Las grandes cantidades de este producto de desecho, se han convertido en un problema para el medio ambiente (Salmerón-Alcocer et al., 2003).

Productos obtenidos. La tortilla es el principal alimento producido a partir de maíz nixtamalizado. En México, la principal forma de consumir este grano es en tortillas y productos derivados de ella, por ejemplo: tacos, sopes, enchiladas, huaraches, tostadas, botanas y otros (Reyes, 1990).

Botanas nixtamalizadas. El mercado de botanas en Latinoamérica reportó ventas totales al finalizar el 2007 de US \$ 2,597.8 millones, lo que representó un aumento del 37.8% entre el 2006 y 2007. En el año 2012, las ganancias generadas por este mercado lograron US \$ 3,210.3 millones (Euromonitor, 2012). Las botanas son definidas como “una comida ligera, un alimento consumido entre comidas regulares, o un alimento apropiado para ingerirse como bocadillo” (Lusas & Rooney, 2001).

Las botanas de mayor consumo en la actualidad son aquellas elaboradas mediante el proceso de freído, incrementando el valor calórico total del producto. Además, los aceites utilizados en su elaboración, incrementan el contenido de ácidos grasos libres que producen reacciones de auto-oxidación y compuestos como acrilamida y acroleína, sustancias que presentan un efecto carcinógeno en humanos (Medeiros et al., 2011). Por otro lado, el proceso de nixtamalización tradicional conlleva una disminución en el contenido de fibra dietética, este nutrimento posee un efecto benéfico para la salud, el cual ha sido reportado por diversos autores (Escudero & González, 2006). Lo anterior en conjunto con la problemática actual de salud, no presenta un panorama prometedor ya que el aumento en el consumo de estos productos, incrementa simultáneamente la incidencia y desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas.

Actualmente se dispone de procesos alternativos a la nixtamalización tradicional, entre los que se encuentran la nixtamalización fraccionada (Cortés-Gómez et al., 2006), ecológica (Figuroa et al., 2011) y por extrusión (Martínez-Bustos et al., 1996; Figuroa et al., 2006). En estos procesos, los granos de maíz se someten a un

tratamiento térmico-alkalino en presencia de exceso o limitada cantidad de agua. Además, se adicionan compuestos diferentes al hidróxido de calcio para incrementar el pH durante el procesamiento. Estas tecnologías, se enfocan a la reducción del tiempo de procesamiento y a minimizar la emisión de efluentes contaminantes.

Nixtamalización por extrusión

La extrusión es un proceso térmico-mecánico en el cual, un material es colocado en una tolva de alimentación y forzado a pasar a través un tornillo sin fin rotatorio dentro de un cañón estacionario. El material procesado sale a través de un orificio denominado dado, el cual posee una forma específica (Figura 8).

El equipo de extrusión puede ser considerado como un reactor de tornillos debido a las transformaciones físicas, químicas y bioquímicas que se presentan en el material, en donde al mismo tiempo se llevan a cabo operaciones de transporte, mezclado, orientación y formado.

El principio fundamental de la extrusión, se basa en la aplicación de calor y trabajo mecánico (esfuerzo de corte) en el material sólido que posteriormente es convertido a un fluido, donde se promueve la termoplastificación del mismo (Harper, 1989; Ríaz, 2000). Las condiciones de corte y alta temperatura dentro del canal del tornillo, resultan en la mezcla del material e involucran reacciones químicas que constituyen el proceso de cocimiento (Gopalakrishna & Jaluria, 1992).

Durante la nixtamalización por extrusión, una mezcla previamente acondicionada de ingredientes conformada por maíz (50-90%), agua (10-50%) e hidróxido de calcio (para obtener el sabor característico de los productos nixtamalizados) en diferentes concentraciones (0-3%), es introducida al equipo a través de la tolva de alimentación. El tornillo mezcla los ingredientes y por su paso a través del cañón de calentamiento y el esfuerzo de corte, se produce el cocimiento de los mismos. Finalmente, el material sale a través del dado con forma definida. De esta manera y variando los factores del proceso se puede obtener una gran variedad de productos (Serna, 2009).

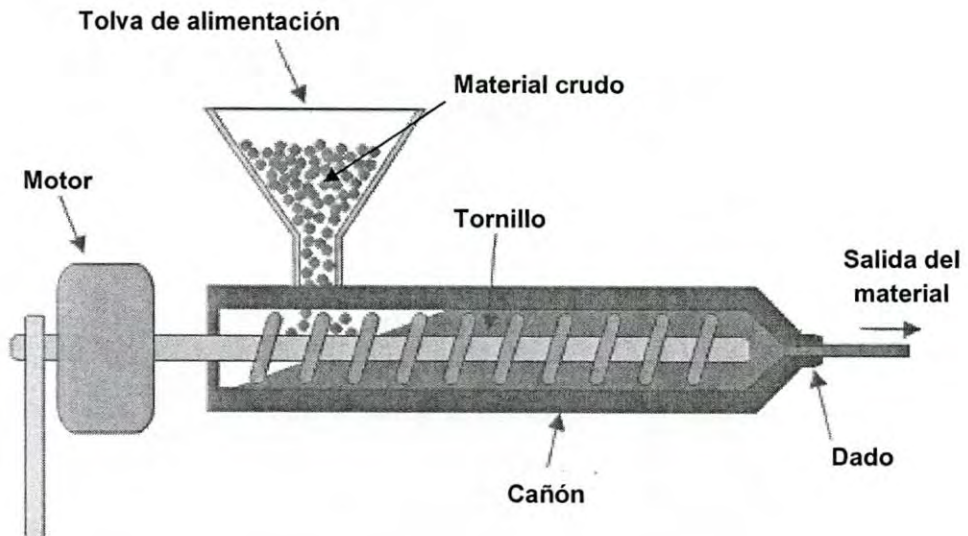


Figura 8. Componentes de un extrusor de tornillo simple.

Fuente: Adaptado de <http://www.textoscientificos.com/imagenes/extrusion.gif>.

(Fecha de consulta: abril 4, 2014).

Variables que afectan el proceso. Existen varios factores que afectan las propiedades químicas, físicas y de textura de los productos extrudidos. A continuación se describen algunos de los más importantes.

Materia prima. Los productos extrudidos se producen generalmente de maíz desgerminado o parcialmente desgerminado. El maíz es un cereal relativamente fácil de extrudir, debido a que desarrolla una textura y sabor agradables (Lusas & Rooney, 2001). En general, las propiedades de los ingredientes afectan las características de los productos terminados en una gran variedad de formas, algunas de las cuales se describen a continuación:

- a) Las grasas, aceites y lípidos disminuyen la expansión.
- b) La fibra reduce la expansión, particularmente la fibra insoluble.
- c) Los almidones con alta proporción de amilosa, desarrollan productos más densos y duros.
- d) Los almidones con alta proporción de amilopectina, desarrollan productos con mayor expansión y más ligeros.

Tamaño de partícula. Antes de la extrusión es necesaria una premezcla o acondicionamiento de los ingredientes, en este caso el material introducido al extrusor se compone de maíz molido o harinas de maíz, las cuales presentan diferentes granulometrías, es decir, no presentan un tamaño de partícula uniforme. Al separar las mezclas de maíz molido acondicionado en fracciones, se observan partículas de diversos tamaños o diferente distribución de tamaño de partícula (DTP, %).

Frecuentemente para obtener botanas expandidas, debe predominar un cierto tamaño de partículas que posea determinadas características fisicoquímicas (bajo índice de absorción de agua e índice de material soluble y bajo porcentaje de almidón dañado), las cuales son importantes en la fabricación de productos derivados de este grano. Así, el material acondicionado que se introduce al extrusor es una mezcla de diferentes tamaños de partícula que aportan diferente

funcionalidad, y que se preparan bajo condiciones en las cuales los factores del proceso se mantienen fijas una vez estandarizadas las formulaciones.

Además, es necesario establecer el tiempo de reposo del maíz molido-agua-cal para promover una completa hidratación de las moléculas de almidón. Este cambio funcional, probablemente se relaciona con diferencias en las características intrínsecas de los polímeros que forman el almidón de estas fracciones. Entre las principales propiedades fisicoquímicas asociadas con la funcionalidad de las harinas se encuentran: la DTP, pH, capacidad de absorción de agua y reología de la masa (Fernández et al., 2010). La mínima incorporación de aditivos con tamaño de partícula muy fino, como el silicato de calcio o carbonato de calcio, resulta en productos expandidos con mayor cantidad de células (burbujas) y con mayor uniformidad (Eastman & Lee, 2005).

Humedad de alimentación. Al incrementar el contenido de humedad en la mezcla de ingredientes se reduce la presión en el dado, lo que resulta en un producto con menor grado de cocción y menos expansión (mayor densidad). Además, aumenta la viscosidad de la mezcla y se incrementa la velocidad de flujo a través del extrusor (Eastman & Lee, 2005). Durante el acondicionamiento, el agua se adiciona y se mezcla con el maíz molido. El agua puede ser añadida hasta en un 50% p/p, pero usualmente se utilizan entre 10 y 25%. Bajo estas condiciones, no ocurre el completo hinchamiento de los gránulos de almidón, ocasionando solo un reacomodo molecular (Lillford, 2008).

Temperatura del cañón. El cañón es un contenedor con forma de tubo dentro del cual gira el tornillo del extrusor. Posee chaquetas o zonas de calentamiento/enfriamiento para la circulación de agua fría, vapor u otro medio de calentamiento como aceite (algunos equipos poseen calentadores eléctricos directos) (Riaz, 2000). Al incrementar la temperatura de las diferentes zonas de calentamiento, se crea un producto con una textura más suave (Eastman & Lee, 2005).

Velocidad del tornillo. Esta variable afecta la capacidad de transferencia del tornillo y la velocidad de producción. La velocidad puede modificarse para variar la velocidad

de corte mecánico y producir diferentes texturas en un alimento con la misma formulación. Por ejemplo, al incrementar la velocidad del tornillo se origina una mayor presión en el dado, lo que produce materiales con mayor estructura celular, aumentando la expansión y disminuyendo la densidad (Eastman & Lee, 2005).

Geometría del dado. Esta variable es de gran importancia en el tamaño, forma y densidad de los productos durante su creación. El dado causa una resistencia al flujo, provocando una retro-mezcla hasta que la presión de la extrusión excede el efecto ejercido por el dado. Generalmente, el incremento en la dimensión de la apertura causa una reducción en la temperatura de la mezcla y un menor cocimiento, por el contrario, la disminución en la apertura del dado, incrementa la temperatura de la mezcla y el grado de cocimiento (Eastman & Lee, 2005).

Ventajas y desventajas. Las ventajas de la nixtamalización por extrusión, en comparación con el proceso tradicional son: la nula producción efluentes contaminantes, el requerimiento de menores tiempos de procesamiento, la utilización de menores cantidades de agua, un menor gasto de energía, y un mayor rendimiento de productos. Asimismo, con un solo equipo se puede producir una gran cantidad de productos semi-terminados y terminados.

La principal desventaja consiste en la dificultad para la optimización y control del proceso, así como la uniformidad en la calidad de la materia prima. Sin embargo, una vez establecidos estos factores la operación resulta ser sencilla. Adicionalmente, se requiere de una fuerte inversión económica para la adquisición del equipo dependiendo de sus características y finalidad.

Productos obtenidos. Uno de los principales productos obtenidos por extrusión de cereales son las botanas, aunque también se elaboran harinas extrudidas nixtamalizadas, entre otros productos.

Botanas extrudidas nixtamalizadas. En general, la manufactura de botanas se puede dividir en tres grandes categorías: a) productos enteros, b) productos nixtamalizados, y c) productos extrudidos. Esta última categoría se puede subdividir en

dos rubros: productos expandidos directos, productos obtenidos a través de pellets y masa formadas en el extrusor para ser terminadas con otro tipo de tratamiento térmico (por ejemplo, freído), denominados “de tercera generación” (Serna, 2003).

Textura en Botanas Expandidas

La textura se define como la respuesta primaria de la sensación táctil a estímulos físicos que resultan del contacto entre alguna parte del cuerpo y el alimento. La sensación táctil (tacto) es el método primario para sentir la textura pero la kinestesia (sentido de movimiento y posición) y algunas veces la vista (grado de compresión, velocidad de flujo) y el sonido (asociado con lo crocante, crujencia o textura quebradiza) también son utilizadas para evaluar la textura (Bourne, 2002).

La aceptación o rechazo en el mercado de un nuevo producto extrudido está directamente relacionada con ciertos atributos sensoriales, donde la textura representa un papel muy importante (Pamies et al., 2000). El consumidor moderno ha desarrollado un gusto especial por las botanas elaboradas a base de maíz nixtamalizado. La mayor parte de estos productos presentan un bajo contenido de humedad (Serna-Saldívar, 2009). En este tipo de productos, se desea una adecuada expansión o hinchamiento del mismo, lo que da como resultado uno de los atributos más importantes: la crujencia. Varios autores coinciden en que esta característica es influenciada por las propiedades estructurales de los alimentos. De hecho, los elementos microestructurales como el tamaño, número y densidad de las burbujas de aire o células, gránulos de almidón, formación de proteínas y matrices de biopolímeros, contribuyen mayormente a la calidad de los alimentos. La extrusión es una tecnología utilizada para producir una gran variedad de botanas expandidas con estructura celular (Aguilera, 2005).

De acuerdo a Heindenreich et al. (2004), la crujencia se percibe a través de la combinación de sensaciones táctiles, kinestésicas, visuales y auditivas, las cuales

representan la clave en la textura de las botanas con bajo contenido de humedad obtenidas por expansión directa. Por otra parte, la crujencia está relacionada con la caída súbita de la fuerza durante el proceso de masticación, esta característica se basa en la propagación de la fractura en materiales quebradizos. Cuando se aplica una fuerza en una botana expandida, ocurre la ruptura de la estructura celular, generando un sonido típico que contribuye a la sensación de crujencia. Los alimentos que presentan esta característica, usualmente generan curvas irregulares de esfuerzo-deformación (Vickers & Bourne, 1976).

Se ha reportado una correlación negativa entre la fuerza de corte requerida para la fractura y la expansión de cereales inflados. Utilizando un analizador universal de textura con una sonda Warner-Bratzel, se asoció la curva fuerza-deformación obtenida con la microestructura del alimento, basándose en que el número de picos antes de la fractura, estaba directamente relacionado con la porosidad del extrudido. Este método fue propuesto como una herramienta útil para la determinación de la crujencia y fragilidad (Stanley, 1986).

Por otra parte Onwulata & Konstance (2006), reportaron que controlando la humedad de alimentación durante la extrusión, existe un efecto positivo de la homogeneidad del tamaño de partícula en los atributos de calidad de extrudidos como el índice de expansión, porosidad y fuerza a la ruptura.

La expansión y las propiedades mecánicas (esfuerzo de corte, fuerza a la ruptura, resistencia a la ruptura o fractura, entre otras) de los extrudidos han sido ampliamente estudiadas. El esfuerzo de ruptura de extrudidos de cereales correlacionó positivamente con la densidad aparente, esta última se encuentra relacionada con la estructura del poro y la expansión. Sin embargo, los valores de esfuerzo y la densidad del producto no son constantes, debido a las reacciones en los componentes de los alimentos durante la extrusión (Guy & Horne, 1987).

Las variables de extrusión son factores críticos en las propiedades mecánicas de los extrudidos de cereales. En los materiales de alimentación, un incremento en el

contenido de proteína o gluten, amilosa y contenido de humedad, resulta en una mayor rigidez y dureza en los productos obtenidos. Para el maíz extrudido, un elevado contenido de humedad incrementa la fuerza a la ruptura o el esfuerzo de impacto. Otras variables del sistema como la temperatura de fusión del almidón y la presión en la cabeza el dado, son derivados de los factores del proceso. La temperatura de fusión corresponde a la desaparición de la estructura cristalina nativa del almidón a bajos niveles de humedad, la cual varía en función del contenido de humedad y del material utilizado. Las variables respuesta más afectadas en los extrudidos son el índice de expansión, solubilidad, propiedades mecánicas, entre otras (Ryu & Ng, 2001).

Cambios Químicos en Productos Extrudidos de Maíz Pigmentado

Durante la extrusión se producen diferentes transformaciones en los componentes químicos del maíz, principalmente en la fracción de almidón y las antocianinas. Las tecnologías desarrolladas se enfocan a preservar o retener un mayor contenido de antocianinas en productos nixtamalizados, lo que tiene como finalidad proporcionar un beneficio adicional a la salud de la población.

Almidón

En el proceso de extrusión, los materiales a base de almidón presentan cambios en sus propiedades físicas a través de dos mecanismos: a) formación de nuevos agregados estructurales ocasionados por la pérdida de la estructura nativa, originando cambios en la viscosidad por efecto de la absorción de agua; y b) pérdida de la reorganización estructural, cuando durante el proceso los tratamientos son severos y se presentan pérdidas en sus propiedades físicas (viscosidad, solubilidad y absorción de agua) (Olkku et al., 1983). La transformación del almidón durante la extrusión se describe en la Figura 9. La etapa de gelatinización en el almidón ocurre de manera uniforme a niveles de 20% de humedad. Por otra parte, de manera contraria y a bajos contenidos de humedad se acelera el proceso de gelatinización derivado del alto esfuerzo de corte ejercido por el tornillo, la consecuente generación de calor, y la ruptura mecánica de los gránulos de almidón (Vasanthan et al., 2001).

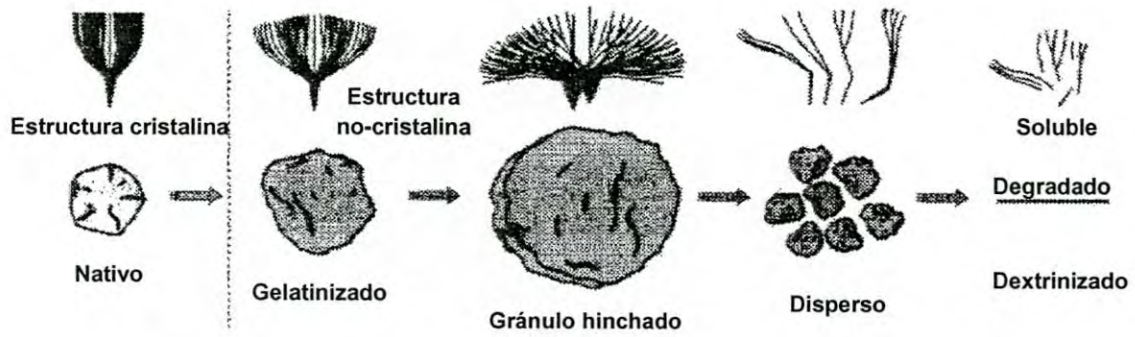


Figura 9. Representación de la cocción del almidón y su proceso de transformación.

Fuente: Adaptado de Strahm (2000).

Cuando el almidón se somete a la acción del esfuerzo de corte y temperatura elevada, se obtiene un material termoplástico fundido, en donde se modifica la estructura granular cristalina.

La relación amilosa-amilopectina en el almidón afecta las propiedades de textura de los productos extrudidos. La amilopectina es la molécula responsable principalmente de la expansión, dando lugar a la producción de extrudidos translúcidos y frágiles. La amilosa en cambio, es la molécula responsable de producir un extrudido con mayor dureza y baja expansión (Murray et al., 1968).

Antocianinas

El contenido de antocianinas se reduce significativamente durante la extrusión, debido al efecto de reacciones de polimerización y pardeamiento (Singh et al., 2007). Estas reacciones son producidas por las altas temperaturas empleadas durante el procesamiento. Sin embargo, aunque el contenido total de antocianinas disminuye durante la extrusión, se ha reportado un incremento en la formación de monómeros y dímeros debido al rompimiento de la matriz alimenticia (Khanal et al., 2009).

Así mismo Khanal et al. (2009), observaron un incremento considerable en el contenido de monómeros y dímeros de antocianinas, generados por la conversión de algunos oligómeros y polímeros de alto nivel a oligómeros de niveles menores. Estos autores, reportaron un incremento de 120% en el contenido de monómeros de extractos de antocianinas adicionadas a una matriz alimenticia extrudida, a una temperatura de cañón de 170°C y velocidad de tornillo de 200 rpm. Dicho incremento se produjo incluso, cuando el contenido total de antocianinas presentó una disminución significativa de entre 18 y 53%. Este tipo de comportamiento se ha presentado en otros productos como galletas y pan, elaborados mediante la extrusión de otros cereales integrales como el sorgo (Gu et al., 2008).

Las variables de extrusión como la temperatura, velocidad del tornillo y tiempo de residencia son considerados factores críticos durante el procesamiento en la formación de monómeros, dímeros y trímeros (Khanal et al., 2009). A pesar de las

pérdidas de pigmentos registradas durante la extrusión, algunos autores han reportado que es posible retener una cantidad suficiente de antocianinas durante la producción de un alimento elaborado a partir de maíz morado (Camire et al., 2002).

Antecedentes Sobre Extrudidos a Base de Maíces Pigmentados Producidos por Extrusión

Actualmente, no existen en el mercado botanas expandidas directamente elaboradas con maíces pigmentados. La producción de las botanas elaboradas a partir de este tipo de maíces, se ha enfocado a las obtenidas de masa elaborada por el método de nixtamalización tradicional, las cuales son sometidas al proceso de freído a profundidad o por aspersion. Esto provoca la pérdida de hasta el 100% de las antocianinas contenidas en el grano, además de un incremento calórico ocasionado por la incorporación de aceite. Desde hace algunos años y atendiendo esta problemática, se han desarrollado estudios e investigaciones en este respecto, enfocándose principalmente a los diferentes tipos de procesamiento, para evitar la degradación total o parcial de las antocianinas contenidas en los granos pigmentados.

Al elaborar una botana expandida directamente a base de maíz pigmentado y utilizando el método de nixtamalización por extrusión, se esperaría preservar una mayor cantidad de las antocianinas contenidas en el grano. En la obtención de extrudidos nixtamalizados expandidos para producir botanas, se optimizan las variables del proceso de extrusión y el contenido de Ca(OH)_2 , para obtener botanas con mayor contenido de antocianinas, y con una textura similar a la de productos encontrados en el mercado.

La nixtamalización por extrusión se ha utilizado para la obtención de tortillas de maíz amarillo, azul y rojo para ser comparados con sus similares producidos mediante el proceso tradicional. Se logró preservar una mayor cantidad de antocianinas en las tortillas elaboradas con maíces de color amarillo y rojo, mientras que las tortillas de maíz azul perdieron la misma cantidad de antocianinas que las procesadas mediante

el proceso tradicional (Mora-Rochin et al., 2010). Es importante destacar, que el contenido de antocianinas en el maíz azul fue significativamente mayor que en los granos rojos, amarillos y blancos.

Aguayo-Rojas et al. (2012), evaluaron el contenido de antocianinas y capacidad antioxidante de tortillas obtenidas a partir de harinas producidas de maíces mexicanos de varios colores (blanco, amarillo, rojo y azul), mediante la nixtamalización por extrusión. El maíz azul presentó el contenido de antocianinas más elevado (275.2 mg/kg, equivalentes de cianidina 3-glucósido, bs) en comparación con los demás maíces, reportando una pérdida de estos compuestos del 53.5 % en las tortillas extrudidas. Se concluyó que el cocimiento alcalino por extrusión permite una mayor retención de compuestos fenólicos y por tanto, mayor capacidad antioxidante en las tortillas producidas.

Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

La MSR es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas que son útiles para el modelo y análisis de problemas en los que la respuesta de interés, es afectada por diversas variables (Montgomery, 2004). Se utiliza para desarrollar, mejorar y optimizar procesos. Además, tiene aplicaciones importantes en el diseño, desarrollo y formulación de nuevos productos, así como en la mejora de productos ya existentes (Myers et al., 2009).

La MRS se aplica en situaciones donde varios factores influyen potencialmente una medida de desempeño o característica de calidad del producto o del proceso. Esta medición del desempeño o característica es llamada respuesta. Las aplicaciones reales de la MSR involucran más de una respuesta. Los factores de entrada son llamados variables independientes, y se encuentran sujetas al controlador para propósitos de un experimento (Myers et al., 2009). Considere que se quiere encontrar los niveles de temperatura (x_1) y presión (x_2) que maximicen el rendimiento de un proceso (y). El rendimiento del proceso es una función de los niveles de la temperatura y la presión:

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

Donde ε representa el error observado en la respuesta y . Si la respuesta esperada se denota por $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$, entonces a la superficie representada por

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2)$$

se llama superficie de respuesta. Por lo general la superficie de respuesta se representa gráficamente como se observa en la Figura 10, donde η se grafica contra los niveles de x_1 y x_2 .

Para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie como se presenta en la Figura 11. En la gráfica de contorno se trazan las líneas de respuesta constante en el plano x_1, x_2 . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta (Montgomery, 2004). En la mayoría de los problemas de MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera función entre la respuesta (y) y el conjunto de variables independientes.

Por lo general se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

En general, la variable respuesta (y) puede relacionarse con k regresores, el modelo anterior representa un modelo de regresión lineal múltiple con k regresores. A los parámetros $\beta_j, j= 0, 1, \dots, k$ se les llama coeficientes de regresión. Este modelo describe un hiperplano en el espacio de k dimensiones de los regresores $\{x_j\}$.

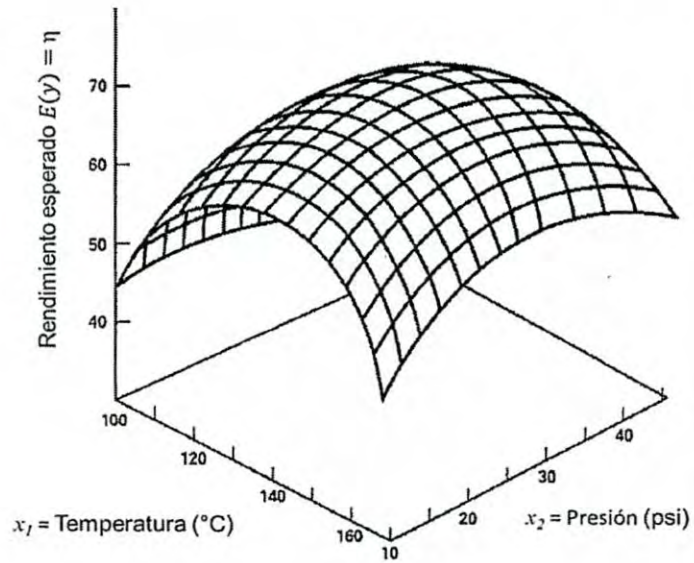


Figura 10. Superficie de respuesta tridimensional representando el rendimiento esperado (η) en función de la temperatura (x_1) y la presión (x_2).

Fuente: Adaptado de: Montgomery (2004).

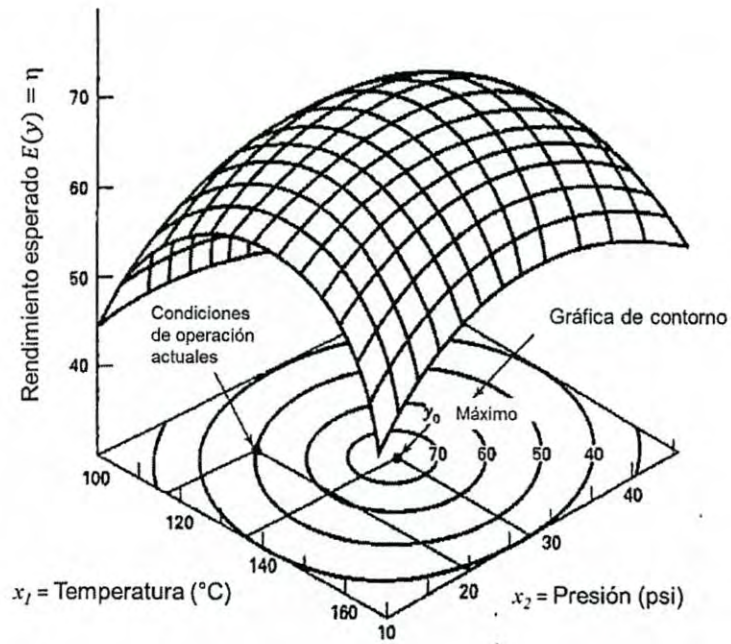


Figura 11. Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.

Fuente: Adaptada de Montgomery (2004).

El parámetro β_j representa el cambio esperado en la respuesta (y), para un cambio unitario en x_j cuando las variables independientes restantes x_i ($i \neq j$) se mantienen constantes.

Si hay curvatura en el sistema, entonces debe utilizarse un polinomio de orden superior, tal como el modelo de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Dónde y es variable respuesta, β_0 representa la constante, β_{ki} el coeficiente de regresión lineal, β_{kii} el coeficiente de regresión cuadrático, β_{kji} el efecto de interacción de las variables; y ε , el error experimental.

En casi todos los problemas de MSR, se utiliza uno de estos modelos o ambos. Desde luego es probable, que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes, pero en una región relativamente pequeña suelen funcionar bastante bien.

La MSR es un procedimiento secuencial. Algunas veces, cuando se está en un punto de la superficie de respuesta que se encuentra apartado del óptimo, como sería el caso de las condiciones de operación actuales, el sistema presenta una curvatura moderada y el modelo de primer orden será el apropiado. El objetivo de este caso es llevar al investigador de una manera rápida y eficiente, por la trayectoria del mejoramiento hasta la vecindad general del óptimo. Una vez que se ha encontrado la región del óptimo, puede emplearse un modelo más elaborado, como el de segundo orden y llevarse a cabo un análisis para localizar esta región. El último objetivo de la MSR, es determinar las condiciones de operación óptimas del sistema o determinar una región de espacio de los factores, en la que se integren los requerimientos de operación.

Diseños experimentales para ajustar modelos de segundo orden

El diseño central compuesto (DCC) es utilizado para ajustar un modelo de segundo orden. En general, el DCC consta de un factorial 2^k , con n_F corridas, $2k$ corridas axiales y n_C corridas centrales. El DCC fue propuesto por Box & Wilson como una alternativa al factorial. Básicamente consiste de un núcleo factorial 2^k , cuyos niveles de los factores se codifican con +1 y -1, así como niveles α que pueden variar de acuerdo al número de factores a evaluar y garantiza además, una propiedad estadística de rotabilidad (Mora, 2000).

El despliegue práctico de un DCC surge con frecuencia a través de la experimentación secuencial. Es decir, se ha usado un diseño 2^k para ajustar un modelo de primer orden. Este modelo presentó falta de ajuste, y después se agregaron corridas axiales para permitir la incorporación de términos cuadráticos en el modelo. El DCC es muy eficiente para ajustar el modelo de segundo orden. Hay dos parámetros en el diseño que deben especificarse: la distancia de α de las corridas axiales al centro del diseño y el número de puntos centrales n_C (Montgomery, 2004).

Optimización de respuesta múltiple

La optimización se define como las condiciones que proveen de un valor óptimo (máximo o mínimo) en función de ciertas variables sujetas a restricciones previamente impuestas (Altan et al., 2008).

Generalmente, el investigador necesita reducir el número de corridas requeridas en un diseño estándar de superficie de respuesta. Gran parte del desarrollo de los diseños generados por computadora, se deriva del trabajo de Kiefer & Wolfowitz (1960) en la teoría de los diseños óptimos. Por diseño óptimo se entiende un diseño que es "mejor" con respecto a algún criterio (Montgomery, 2004).

La consideración simultánea de respuestas múltiples involucra primeramente, construir un modelo de superficie para cada respuesta. Posteriormente, se requiere encontrar un conjunto de condiciones de operación que de alguna manera, optimicen

todas las respuestas o al menos las mantenga en los rangos deseados (Myers et al., 2009).

El Software comercial Design Expert (2005) se utiliza para analizar cada una de las respuestas, el programa computa la suma de cuadrados de los términos lineal y cuadrático en el modelo. Basado en un valor pequeño de P para el término cuadrático, se puede decidir ajustar el modelo de segundo orden para la variable respuesta. La salida del programa muestra el modelo final en términos de las variables actuales y codificadas (Myers et al., 2009).

En una superficie de respuesta tridimensional y su gráfica de contorno para una respuesta y , que comprende dos factores de procesamiento, es relativamente fácil observar, que el punto óptimo (máximo) para esa respuesta se encuentra a ciertas condiciones o niveles de los factores de procesamiento. Cuando existen pocas variables de procesamiento, funciona la técnica de superposición de superficies de contorno para encontrar la combinación de la región de condiciones óptimas de procesamiento para cada variable respuesta (Myers et al., 2009).

En estas gráficas, el investigador puede observar si los límites representan a las condiciones de procesamiento adecuadas para la optimización. Además, existe un número de combinaciones de condiciones de los factores de procesamiento, que pueden resultar en un proceso satisfactorio. El investigador puede entonces, examinar la gráfica de contorno que determine las condiciones de operación apropiadas. Sin embargo, cuando existen más de tres factores en el diseño, la superposición de superficies de contorno se dificulta, debido a que la gráfica de contorno es bidimensional, y $k-2$ de las variables o factores del diseño se deben mantener constantes para la construcción de la gráfica (Myers et al., 2009).

HIPÓTESIS

La optimización de las condiciones del proceso de extrusión producirá botanas expandidas nixtamalizadas de grano integral de maíz azul con máximo contenido de antocianinas, máximo índice de expansión y mínimo parámetro de color *b* (azul intenso).

OBJETIVOS

General

Optimizar las condiciones del proceso de extrusión, para la elaboración de botanas expandidas nixtamalizadas de grano integral de maíz azul (*Zea mays* L.) con alto contenido de antocianinas, máximo índice de expansión y mínimo parámetro de color *b* (azul intenso).

Particulares

1. Evaluar el efecto de la temperatura, molienda y humedad de alimentación, sobre las propiedades químicas, físicas, reológicas, morfológicas, térmicas, y de textura de extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul integral.
2. Optimizar el proceso de extrusión aplicando la metodología de superficie de respuesta (MSR), considerando como condiciones de procesamiento la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio; para la obtención de un extrudido con un máximo contenido de antocianinas, máximo índice de expansión, y un mínimo valor del parámetro de color *b*.
3. Validar las condiciones óptimas del proceso de extrusión, evaluando las propiedades químicas, físicas y de textura en las botanas expandidas nixtamalizadas de maíz azul comparándolas con otras elaboradas con maíz blanco.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en dos etapas: 1) Evaluación del efecto de las condiciones de procesamiento sobre las propiedades de extrudidos de maíz azul, y 2) Optimización de las condiciones de procesamiento para la producción de extrudidos. En la Figura 12, se presenta el diagrama de flujo general de la investigación.

Experimentos Preliminares

Antes de iniciar la primera etapa de la investigación y establecer las variables definitivas, se realizaron experimentos con diferente número de moliendas del maíz azul y la extrusión, para determinar los factores de procesamiento de mayor efecto en las variables respuesta. En lo que respecta a la molienda del maíz, se realizaron de 1 hasta 5 moliendas. Se evaluaron rangos de humedad de alimentación de 11-30%, velocidad de alimentación de 25-60 rpm, velocidad del tornillo de 100-180 rpm, y diámetro de dado de 2-4 mm. Además, se utilizó un rango de temperaturas de la cuarta zona extrusor (final) de 110-150°C.

Finalmente, después de analizar los resultados de los experimentos preliminares, se seleccionaron los siguientes factores y niveles de procesamiento: maíz molido de la primera o tercera molienda, humedad de alimentación (14, 15, 16, 16.5, 18.5 ó 20.5%) y temperatura de la cuarta zona del extrusor de 130 ó 140°C.

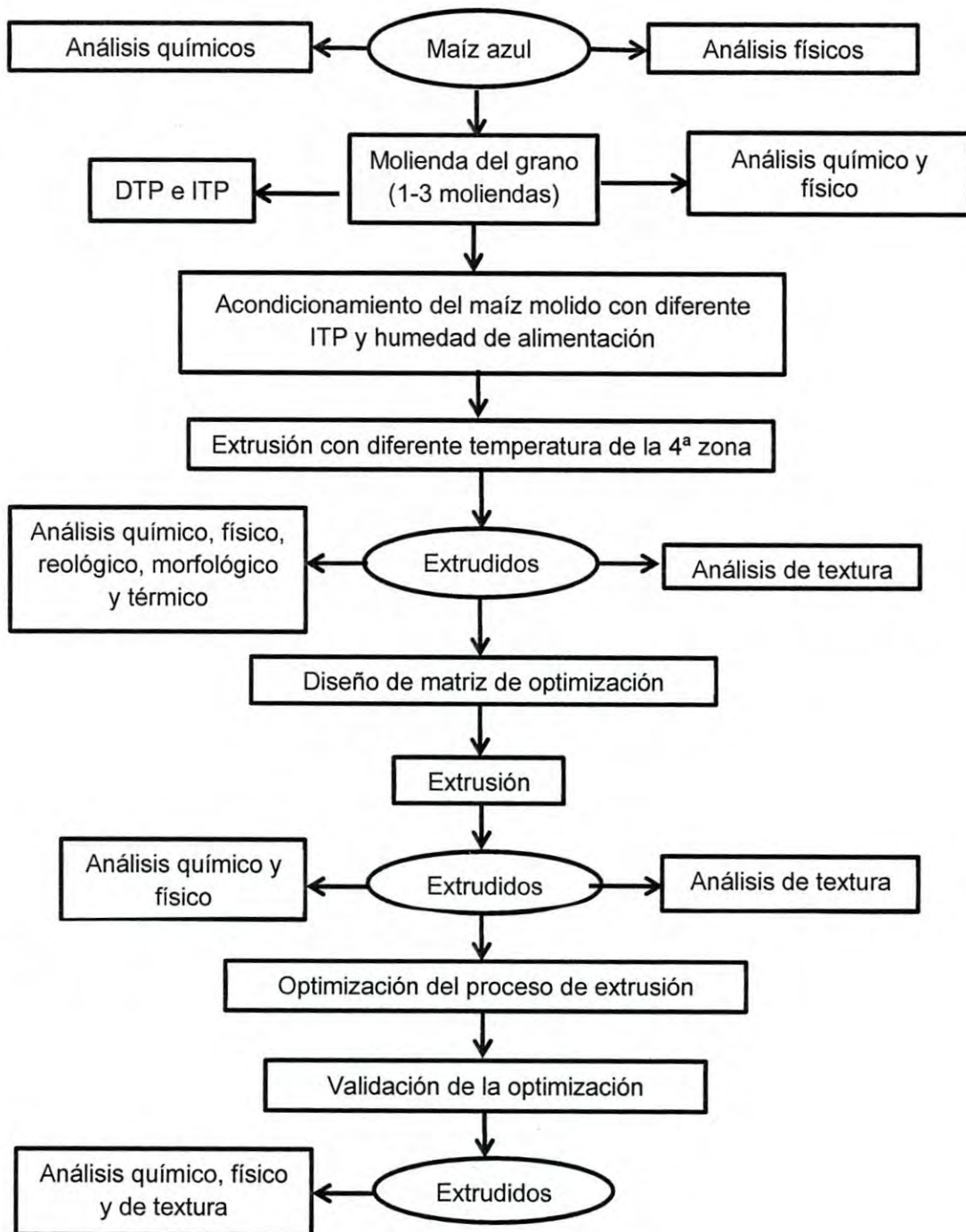


Figura 12. Diagrama de flujo general de la investigación.

Efecto de las Condiciones de Procesamiento Sobre las Propiedades de Extrudidos de Maíz Azul

Materia prima

Se utilizó maíz azul criollo (cosecha, 2011) obtenido en Toluca, Estado de México (Figura 13). Los granos se limpiaron (Clipper BLOUNT/Ferrell-Ross, Modelo M2BC; Bluffon Inc., USA) retirando granos quebrados e impurezas. El maíz limpio se almacenó a 5°C en bolsas de polietileno selladas y en completa oscuridad hasta su utilización.

Reactivos

Se utilizó cal comercial (Calhidra de Sonora, SA de CV, Hermosillo, Son. México) y agua destilada. Para la determinación de HPLC-DAD-UV, se utilizó un estándar de cianidina 3-glucósido (kuromanin chloride, Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA). Los solventes utilizados (grado HPLC) fueron ácido fórmico (Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA), metanol y acetonitrilo (J. T. Baker Inc.). En el análisis de HPLC-FID, se utilizaron estándares de ácidos grasos PUFA No. 3. Los reactivos (grado HPLC) fueron: tolueno, K_2CO_3 , y Na_2SO_4 anhídrido (J. T. Baker Inc.).

Caracterización química del grano

Contenido de humedad (H). Esta determinación se define como la pérdida de masa que un producto experimenta en condiciones determinadas, este parámetro interviene en muchas de las propiedades de los alimentos. Se utilizó el método 44-01 (AACCI, 2000), y el contenido de humedad se expresó en %. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

Contenido de almidón total (ALT). Se determinó con el Kit comercial Total Starch (Método 76-13 AACCI, 2000, Megazyme, International Irlanda). El contenido de ALT se expresó en %. El análisis se realizó por triplicado.



Figura 13. Maíz azul criollo, cosecha 2011.

Contenido de proteína. Se utilizó una muestra de aproximadamente 0.1 g de maíz entero molido, la cual se analizó en un determinador de nitrógeno (Modelo FP-528, LECO Corp. MI, U.S.A), donde se cuantificó el contenido de nitrógeno de forma sistematizada y automatizada. El equipo consta de una cámara de oxígeno donde se lleva a cabo la combustión a una temperatura de 850°C, una celda de termoconductividad y un microprocesador para llevar a cabo los cálculos y controlar los parámetros operativos. En análisis se basa en el método de combustión Dumas (AOAC-990.03, 1984). El contenido de proteína se expresó en %, utilizando un factor de conversión $N \times 6.25$ (Serna-Saldívar, 2009). Se realizaron tres determinaciones de este análisis.

Extracto etéreo. El contenido en grasa bruta de un producto, se define como la parte del mismo extraíble por éter etílico u otro solvente como hexano en condiciones determinadas. Incluye además de la grasa, otras sustancias solubles en el solvente utilizado. Para esta determinación se utilizó el método 30-20 (AACCI, 2000), y el resultado se expresó en %. La prueba se realizó por triplicado.

Perfil de ácidos grasos. Para realizar esta determinación se utilizó la metodología descrita por Núñez-Gastélum et al. (2011). Se pesaron 50 mg de aceite de maíz azul (obtenido de la extracción en Soxhlet). Se utilizó un cromatógrafo de gases (Varian 3800, Melbourne, Victoria, Australia) equipado con detector FID y una columna capilar (CP-Sil 88, 60m x 0.25 mm, Varian). Las condiciones en el equipo fueron: volumen de inyección, 1 μ L; temperatura del inyector, 220°C; gas portador, helio; temperatura del detector, 235°C. El gradiente de temperatura en el horno de la columna inició a 120°C por 1 min y se incrementó a una velocidad 3°C/min hasta alcanzar 170°C, se mantuvo en esta temperatura por 1 min y finalmente ascendió a 235°C. Los picos individuales de los ácidos grasos (AG) se identificaron por comparación con los tiempos de retención de AG del estándar de referencia PUFA (Poli-Unsaturated Fatty Acids) No. 3. La abundancia relativa de cada AG se estimó en proporción al área del pico identificado y se expresó en %. La determinación se realizó por triplicado.

Contenido de ceniza. Es el residuo obtenido después de la incineración de un producto en condiciones determinadas. Se utilizó el método 08-01 (AACCI, 2000) y el contenido de ceniza se expresó en %. La determinación se realizó por triplicado.

Contenido de fibra dietética total. La fibra dietética engloba todo tipo de sustancias sean fibrosas o no, y que por tanto, incluye celulosa, lignina, pectinas, gomas, entre otros. Se utilizó el Kit comercial Total Dietary Fiber Assay (Sigma-Aldrich Química, S. de R.L. de C.V., México). Este análisis está basado en el método 985.29 (AOAC, 1997), combinando determinaciones enzimáticas y gravimétricas. El contenido de fibra dietética total se expresó en %. La determinación se realizó por triplicado.

Contenido de antocianinas totales (AT). Se utilizó el método de Abdel-Aal y Hucl (1999). Se pesaron 3 g de maíz molido en un tubo de 50 mL para centrifuga y se agregaron 24 mL de etanol acidificado (etanol con HCl 1N, 85:15 v/v). La solución se ajustó a pH 1 con HCl 4 N y se agitó por 15 min, posteriormente se centrifugó a 27,200 x g durante 15 min (Thermo Scientific, Model Heraes Biofuge Primo R., Alemania). Este procedimiento se realizó dos veces. El sobrenadante de la segunda centrifugación se separó en un tubo y el volumen se ajustó hasta 50 mL con etanol acidificado. Se midió la absorbancia a 535 nm (contra blanco reactivo) en un espectrofotómetro de UV-visible (Varian Australia PT LTD, Cary 50 CONC, Australia). El contenido de antocianinas totales se reportó como mg/kg. El análisis se realizó por triplicado.

Análisis de cianidina 3-glucósido (C3G). La preparación del estándar se realizó de la siguiente manera: el estándar de C3G (1 mg) se disolvió en 10 mL de una solución de metanol y agua (50% v/v), posteriormente se prepararon alícuotas de 1 mL. Se realizó una curva de calibración para la C3G, en concentraciones de 0.025 hasta 0.1 mg/mL.

Para la extracción de las antocianinas, se mezclaron 400 mg de maíz molido con 1 mL de metanol-HCl (10%, v/v) en un microtubo y se agitaron a 4°C durante 30 min. Posteriormente, los microtubos se mantuvieron a 4°C durante 12 h en ausencia de luz y después se agitaron durante 1 h. Las muestras se centrifugaron (Eppendorf AG,

modelo 5415D, Hamburgo, Alemania) a 5,000 rpm durante 5 min y el sobrenadante se centrifugó nuevamente a 12,000 rpm durante 10 min. Los extractos se mantuvieron en viales ámbar hasta su análisis.

Se utilizó un equipo HPLC con detector UV-DAD (Varian ProStar, Modelo 410, Palo Alto, CA). La separación se realizó en una columna de fase inversa (Waters, Spherisorb ODS-2, 5 μ , 250 x 46 mm, Irlanda). Las fases móviles fueron: B, ácido fórmico (5%) y C, metanol. Los gradientes del análisis fueron: 0-6 min, 15% B; 6-20 min, 15-22% B; y 20-35 min, 22-30% B. La velocidad de flujo fue de 1.5 mL/min; temperatura de la columna, 35°C; longitud de onda de detección 525 nm; inyección, 20 μ L. El contenido de C3G se reportó en mg/kg. La determinación se realizó por duplicado.

Caracterización física del grano

Dimensiones. La evaluación de estos parámetros es utilizada para la estimación del porcentaje de extracción (rendimiento grano/harina). Las mediciones realizadas fueron: largo, ancho y espesor del centro del grano. Se utilizó un instrumento de medición Vernier (Digimatic, Mitutoyo Corp., Japón), con un rango de medida entre 0.01-150 mm. Los resultados de las mediciones se reportaron en mm. Las determinaciones se realizaron en 25 granos tomados al azar.

Peso de mil granos (PMG). Este parámetro permite conocer indirectamente el llenado de grano y el rendimiento de la harina. Se utilizó el método descrito por Serna-Saldívar (2003). Se colectaron muestras de 1000 granos tomados de manera aleatoria y se pesaron en una microbalanza (OHAUS Triple Beam, serie 700/800, Polonia) con una precisión de 0 + 0.001 g. El PMG se reportó en g. La determinación se realizó por triplicado.

Peso hectolítrico (PHL). Esta determinación, es una de las principales características físicas de los granos e intervienen en la definición de calidad o grado. Se realizó de acuerdo al método 55-10, AACCI (2000). Se calculó el peso hectolítrico

(peso/volumen) de acuerdo con el volumen del recipiente utilizado en la prueba. El resultado se expresó en kg/hL. Este análisis se realizó por triplicado.

Color. Los granos se dispusieron con el germen hacia abajo en cajas petri de 3.5 cm de diámetro y 1 cm de altura (Figura 14). Se evaluaron los parámetros *L* (luminosidad, mayor 100, menor 0), *a* (+ rojo, - verde) y *b* (+ amarillo, - azul. se utilizó un colorímetro Hunter Lab (Miniscan XE Plus, Hunter Association Laboratories, U.S.A.). La prueba se realizó por triplicado.

Proceso de molienda

Para obtener el maíz molido 1 ó 3 veces, se procedió de la siguiente manera: se pesaron 7 kg de maíz azul y se molieron utilizando una malla con abertura de 0.8 mm, en un molino de 6 aspas y coraza acanalada (Modelo 200, Pulvex S.A. de C.V., serial 1030401, México, D.F). Posteriormente, se separaron 3 kg del maíz molido al finalizar la molienda, se colocaron en una bolsa de polietileno y se denominó "maíz de la primera molienda, M1". El resto del maíz (3kg) se pasó por el molino dos veces más, se colocó en una bolsa de polietileno y se denominó "maíz de la tercera molienda, M3" (Figura 15).

Las bolsas de polietileno separadas con el maíz molido de la primera y tercera molienda, se sellaron para evitar la pérdida de humedad y se almacenaron en ausencia de luz (para evitar la degradación de las antocianinas) a 5°C en una cámara de refrigeración hasta su utilización. Las moliendas M1 y M3, se realizaron con la finalidad de obtener muestras con diferente índice y distribución de tamaño de partícula.

Evaluación del maíz molido

En el maíz obtenido de la primera (M1) y tercera molienda (M3), se realizaron las siguientes determinaciones.



Figura 14. Evaluación de parámetros de color en granos.

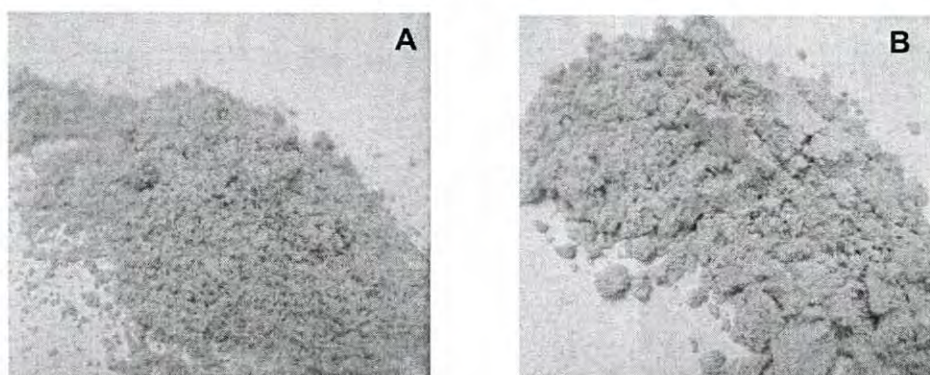


Figura 15. Maíz azul molido de: (A) primera; y (B) tercera molienda.

Contenido de humedad (H). Se evaluó contenido de humedad, utilizando la metodología descrita en las página 51.

Color. Los parámetros *L*, *a* y *b* se determinaron mediante el procedimiento descrito en la página 56.

Distribución de tamaño de partícula (DTP). Este parámetro es importante para la determinar la funcionalidad de las harinas obtenidas y su aplicación en la elaboración de ciertos productos. Se obtuvo utilizando un separador de tamices (Figura 16) (Rotachoc, Chopin Instruments, serial 46902, Villeneuve-La-Garenne, France), pasando 50 g del material molido a través de los siguientes tamices: No. 20 (841 µm), 40 (420 µm), 60 (250 µm), 80 (177 µm), 100 (149 µm) y fondo (<149 µm) (Platt et al., 2010).

Las fracciones de maíz molido retenidas en cada malla se pesaron para obtener la DTP utilizando la siguiente ecuación:

$$DTP = \frac{\text{gramos detenidos en cada malla}}{\text{muestra inicial de harina}} \times 100 \quad (5)$$

El resultado de esta determinación se reportó en %. El análisis se realizó por triplicado.

Índice de Tamaño de Partícula (ITP). Entre más alto es el ITP, mayor cantidad de partículas finas se encuentran en el material evaluado. Se calculó de acuerdo a lo reportado por Bedolla & Rooney (1984) utilizando la siguiente fórmula:

$$ITP = \sum[(FNOM_i)(\% DTP) + \dots + (FNOM_n)(\% DTP)] \quad (6)$$

Dónde:

FNOM: Factor de número de malla y DTP: Distribución del tamaño de partícula (%).



Figura 16. Separador de tamices utilizado para la determinación de la DTP.

El factor de número de malla se asignó de acuerdo al número de la serie de tamices U.S.: 0.2, malla No 20; 0.4 malla No 40; 0.6 malla No 60; 0.8 malla No 80; 1.0 malla No 100 y fondo. El % de retención de cada malla se obtuvo en el análisis de DTP (página 58). La determinación se realizó por triplicado.

Obtención de los extrudidos

Acondicionamiento. Lotes de muestra de 250 g de maíz de las molindas M1 y M3 se colocaron individualmente en una mezcladora (Kitchen Aid, Modelo MK45SSWH, St. Joseph, Michigan, U.S.A), se adicionó cal (0.3% p/p) y agua destilada hasta alcanzar contenidos de humedad de 14, 15, 16, 16.5, 18.5 ó 20.5% (p/p). Una vez acondicionado, cada lote se reposó durante 12 h a 4°C en ausencia de luz, en un refrigerador comercial (Whirlpool, Modelo 2155060-A, Benton Harbor, Michigan, U.S.A.), esto con el fin de obtener una mejor hidratación de los gránulos de almidón.

Proceso de nixtamalización por extrusión. Cada lote acondicionado de maíz molido con cal y diferente contenido de humedad, fue procesada con el fin de obtener un producto expandido. Se utilizó un extrusor de tornillo simple (Figura 17) (Brabender Instruments, Model E 19/25 D, OHG Duisburg, Duisburg, Germany).

El equipo consta de un cañón separado en 4 zonas independientes de calentamiento/enfriamiento (1,300 W cada una). Las temperaturas en el cañón fueron: 60, 80, 110°C en la primera, segunda y tercera zona, respectivamente. La temperatura de la cuarta zona fue de 130 ó 140°C. La velocidad de alimentación fue de 50 rpm. La velocidad del tornillo se mantuvo constante a 120 rpm. Se utilizó el tornillo número 3 (razón de compresión 3:1) y un dado con diámetro de 4 mm. Las condiciones de operación se seleccionaron de combinaciones factoriales de las siguientes variables de procesamiento: 2 ITP (M1 o M3), 6 humedades de alimentación (14, 15, 16, 16.5 18.5 ó 20.5%) y 2 temperaturas en la cuarta zona del extrusor (130 ó 140°C).



Figura 17. Extrusor de tornillo simple y obtención de los extrudidos expandidos.

La combinación de estos factores resultó en un total de 24 tratamientos. Cada tratamiento fue colocado en la tolva de alimentación del extrusor con las condiciones antes mencionadas y se obtuvieron los expandidos de maíz azul. Una vez obtenidos los materiales expandidos, se seccionaron en piezas de 3 centímetros de largo y se enfriaron a temperatura ambiente (25°C) durante 1 h. Posteriormente, se secaron en un secador tipo túnel (sin marca) a una temperatura de 60°C durante 2 horas (Anexo 1). Los extrudidos se almacenaron en bolsas de polietileno y se mantuvieron a 5°C en ausencia de luz.

Evaluación de los extrudidos nixtamalizados

Análisis químicos. Los extrudidos se molieron (Moulinex, modelo 980-18, Bagnolet, Cedex, Francia) y se almacenaron en bolsas de polietileno selladas a 5°C hasta su análisis. A estos materiales, se les determinó el contenido de humedad (página 51), contenido de antocianinas totales y contenido de cianidina 3-glucósido (página 54). Adicionalmente, se realizaron los siguientes análisis:

Índice de absorción de agua (IAA). Esta determinación se realizó de acuerdo al procedimiento descrito por Anderson et al. (1969) con una modificación, que consistió en la utilización de agua destilada a una temperatura de 25°C, la cual era originalmente de 30°C. Para obtener el IAA se aplicó la siguiente ecuación:

$$IAA = (PG - PMbs - PMS)/PMbs \quad (7)$$

Dónde:

PG: peso del gel (g), PMbs: peso de la muestra en base seca (g) y PMS: peso del material solubilizado (g).

El IAA se reportó como peso del gel/g de muestra seca. Los análisis se realizaron por duplicado. Este parámetro también se evaluó en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda (como control).

Índice de material soluble (IMS). Se define como la cantidad de sólidos solubles recuperados mediante la evaporación del sobrenadante en el análisis de IAA. Se realizó mediante el método reportado por Anderson et al. (1969), utilizando la siguiente ecuación:

$$IMS = \left(\frac{[\text{peso de sólidos solubles secos}]}{[\text{peso de la muestra}]} \right) \times 100 \quad (8)$$

El IMS se expresó como % de sólidos solubles secos. Los análisis se realizaron por duplicado. Este parámetro también se evaluó en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda (como control).

Análisis físicos. Se determinaron los parámetros de color L , a y b , mediante el procedimiento descrito en la página 56. Además, se realizaron las siguientes determinaciones:

Densidad aparente (DA). Esta determinación se calculó como la razón entre el peso (g) y el volumen (cm^3) de extrudidos individuales de 3 cm de longitud. El volumen se calculó asumiendo que los extrudidos son geoméricamente equivalentes a un cilindro. El resultado se reportó en g/cm^3 . Se obtuvieron 40 mediciones de este parámetro.

Índice de expansión (IE). Para esta determinación se utilizaron muestras de extrudidos segmentados de 3 cm de longitud. Se midió el diámetro del centro de los mismos utilizando un vernier digital (Mitutoyo Corp., modelo CD-6 CS, Japón). Este parámetro se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{\text{diámetro del extrudido en mm}}{4 \text{ mm}} \quad (9)$$

Se realizaron 40 mediciones de cada tratamiento.

Análisis reológicos. Para evaluar las características reológicas de los extrudidos se realizaron los siguientes análisis:

Viscosidad máxima (VM). Una muestra de 3.5 g (14% de humedad) de extrudido molido de cada tratamiento, se pesó en un recipiente de aluminio y se le adicionaron 25.5 mL de agua destilada. Se utilizó un equipo analizador rápido de viscosidad (Rapid Visco Analyser, modelo Super 4, Newport Scientific). La muestra se mezcló con una paleta agitadora de plástico y se analizó mediante una rampa de calentamiento: la temperatura inicial fue de 50°C, posteriormente, se incrementó a 95°C manteniéndose a esta temperatura durante 5 min. Finalmente, la temperatura disminuyó nuevamente hasta alcanzar 50°C. El parámetro de interés fue la viscosidad máxima (pico), la cual se expresó en cP. El análisis se realizó por duplicado. Estos parámetros también en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda (como control).

Método dinámico oscilatorio. Muestras de 3 g de cada tratamiento de extrudidos, se mezclaron con agua destilada hasta alcanzar 50% de humedad. La masa obtenida reposó durante 15 minutos, en una bolsa de polietileno sellada a 25°C. Se evaluó la viscoelasticidad de las masas utilizando el método dinámico en el modo de barrido de frecuencia, utilizando un reómetro (Rheometrics Scientific, modelo RSF III, Piscataway, NJ, USA) (Figura 18), aplicando el procedimiento reportado por Platt-Lucero et al. (2010).

Para realizar el análisis se procedió como sigue: la muestra reposada se colocó entre dos platos paralelos de 25 mm de diámetro, con una separación entre platos (gap) de 2.5 mm y se cubrió con petrolato para evitar la pérdida de humedad. Se aplicó un barrido dinámico de frecuencia de 0.1 a 100 rad/s, a una deformación constante de 0.04% y a una temperatura de 25°C. Esta deformación se encuentra dentro de la región lineal de viscoelasticidad.

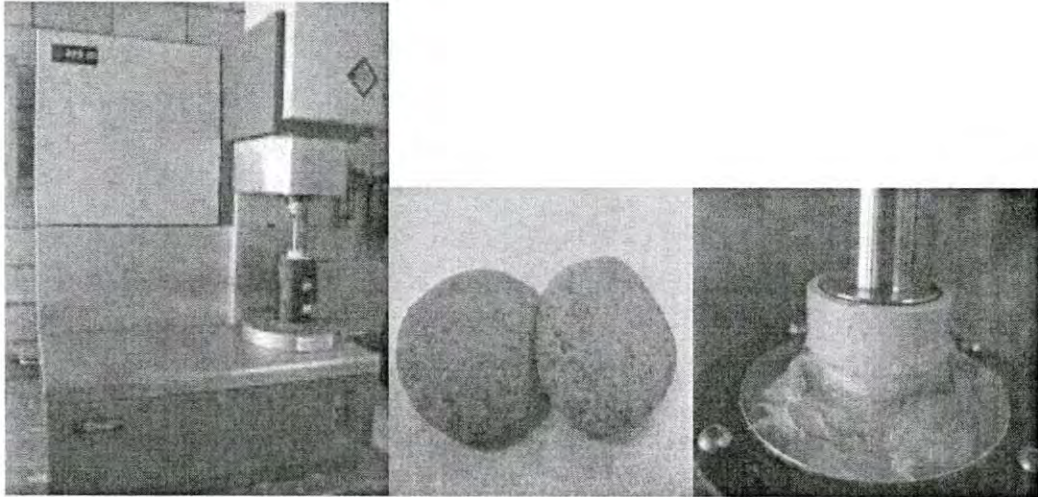


Figura 18. Equipo para evaluar la viscoelasticidad de los extrudidos.

Los parámetros viscoelásticos obtenidos fueron: módulo de elasticidad (G' , Pa), módulo de pérdida (G'' , Pa) y la tangente del ángulo de fase o tangente de pérdida ($\tan \delta$). Este parámetro se define como la razón entre el módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento (G''/G'). Cuando el ángulo de fase se aproxima a cero, el material se comporta mayormente como un sólido elástico. Por otro lado, si el ángulo se aproxima a 1.57 radianes (90°) el material se comporta de manera similar a un fluido newtoniano. Valores intermedios entre 0 y 90° son para materiales viscoelásticos. Las determinaciones se realizaron por duplicado. Estos parámetros también se evaluaron en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda (como control).

Análisis morfológico. Muestras de extrudido molido con tamaño de partícula de 0-15 mm, se fijaron con cinta adhesiva y se cubrieron con una lámina de oro al alto vacío, utilizando un evaporador de vacío (Desk II) a una presión de 7.031×10^{-2} kg/cm². Las muestras fueron examinadas utilizando un microscopio de barrido electrónico (JSM-5800LV, JEOL, Akaishima, Japón), equipado con un detector de electrón secundario, a una velocidad de aceleración de 10 kV. Este análisis se realizó en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda. Se observaron a magnificaciones de 350 x y 1,500 x.

Análisis térmico. Se pesaron 2 mg de extrudido molido de cada tratamiento en un crisol de aluminio y se agregaron 20 μ L de agua destilada, posteriormente el crisol se selló herméticamente. Se utilizó un calorímetro (TA Instruments, moldeo Q-200, Crawley, UK), aplicando una rampa de temperatura de 30-110°C a una velocidad de 5°C/min. Los termogramas obtenidos se analizaron con el Software Universal Analysis (TA Instruments, Crawley, UK). Los parámetros térmicos obtenidos de los termogramas fueron: temperatura de inicio de la gelatinización del almidón (T_i), temperatura pico (T_p), temperatura final (T_f), las cuales se expresaron en °C. La entalpía de gelatinización (ΔH_g) se obtuvo integrando el área bajo la curva y se reportó en J/g. Se utilizó un crisol vacío como referencia. El análisis se realizó por duplicado. Estos parámetros también se evaluaron en el maíz azul molido de la primera y tercera molienda (como control).

Análisis de textura. Las características de textura de los extrudidos elaborados se realizaron utilizando la siguiente determinación:

Esfuerzo de corte máximo (ECM). Para evaluar este parámetro se utilizaron muestras de extrudidos de 3 cm de longitud. El ECM se determinó en un analizador de textura (TA-XT Plus, Texture Technology Corporation, Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra) (Figura 19). Los extrudidos individuales se colocaron en una plataforma y se sometieron a compresión para evaluar el esfuerzo de corte utilizando la sonda Warner-Bratzler (Type P/75, Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra) hasta el rompimiento del extrudido. Las condiciones aplicadas en la prueba fueron: velocidad del cabezal del analizador de textura de 2.5 mm/s, recorriendo una distancia de 20 mm. Los resultados se expresaron como esfuerzo de corte máximo (kPa), utilizando la fuerza máxima registrada para romper el extrudido y el área transversal del mismo. Se realizaron 40 determinaciones de este análisis.

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de experimentos factorial de 6x2x2. Los factores fueron: índice de tamaño de partícula con dos niveles (M1 ó M3), humedad de alimentación con seis niveles (14, 15, 16, 16.5, 18.5 ó 20.5 %) y temperatura de la cuarta zona del extrusor con dos niveles (130 ó 140°C), dando como resultado 24 tratamientos en total.

A los datos obtenidos de todas las determinaciones se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confiabilidad del 95%. Para ver diferencias entre medias de tratamientos específicos se aplicó la prueba de Tukey ($P < 0.05$). El análisis estadístico se llevó a cabo con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2002).

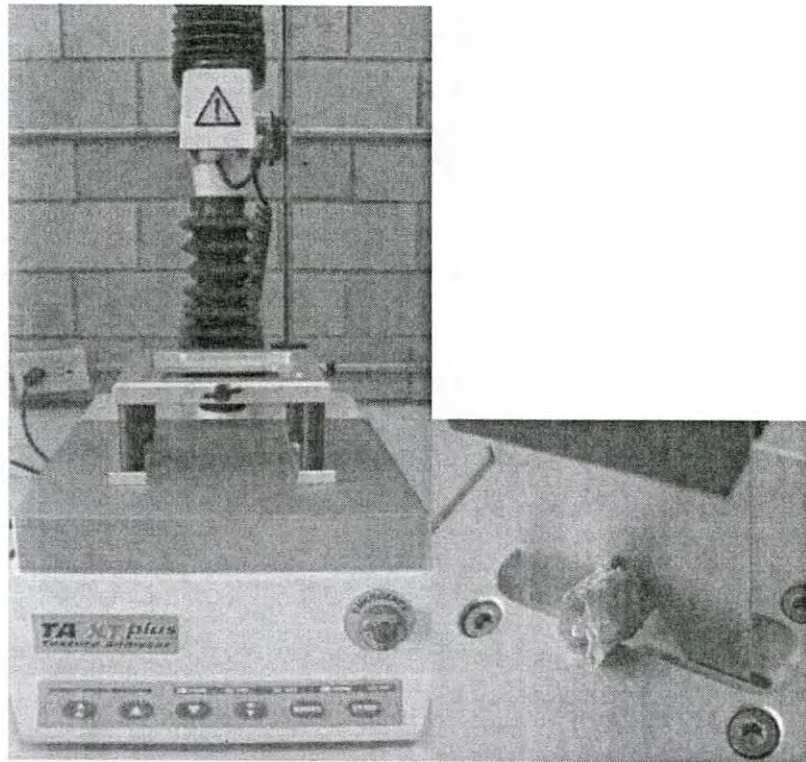


Figura 19. Análisis de textura de los extrudidos de maíz azul.

Optimización de las Condiciones de Procesamiento para la Obtención de Extrudidos

Materia prima

En esta etapa de la investigación se utilizó el mismo material vegetativo referido en la página 51.

Reactivos

Se utilizó cal comercial (Calhidra de Sonora, SA de CV, Hermosillo, Son. México) y agua destilada. Para las determinaciones de HPLC-UV-DAD, se utilizaron estándares de cinco antocianinas: cianidina 3, 5 diglucósido (cyanin chloride), cianidina 3 glucósido (kuromanin chloride), cianidina 3 galactósido (idaein chloride), pelargonidina 3 glucósido (callistepin chloride) y malvidina 3 glucósido (oenin chloride). Además, se utilizó ácido fórmico (Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA), metanol y acetonitrilo (J. T. Baker Inc.). Todos los reactivos fueron grado HPLC.

Proceso de molienda

Para obtener el maíz molido se procedió de la siguiente manera: se pesaron 10 kg de maíz azul y se colocaron en la tolva de alimentación de un molino de 6 aspas y coraza acanalada (Modelo 200, Pulvex S.A. de C.V., serial 1030401, México, D.F), utilizando una malla con abertura de 0.8 mm. Al finalizar la molienda, la muestra de maíz molido se colocó en una bolsa de polietileno y se selló para evitar la pérdida de humedad, denominándose M1. Posteriormente, se almacenó en ausencia de luz (para evitar la degradación de las antocianinas) a 5°C en una cámara de refrigeración hasta su utilización.

Obtención de los extrudidos

Acondicionamiento. Se pesaron veinte lotes (tratamientos) de 300 g de maíz molido con un ITP de 83.9 (M1). Cada tratamiento se homogeneizó individualmente en una mezcladora (Kitchen Aid, Modelo MK45SSWH, St. Joseph, Michigan, USA) durante 5 min. Durante el mezclado y de acuerdo al tratamiento, se adicionaron diferentes

concentraciones de hidróxido de calcio (0-0.25% p/p) y agua destilada (15-23% p/p) (Tabla 2). Los tratamientos de maíz acondicionado se almacenaron en bolsas de polietileno selladas y se mantuvieron en ausencia de luz a 5°C durante 12 h antes de la extrusión.

Proceso de nixtamalización por extrusión. Cada lote de muestra acondicionada con diferente humedad de alimentación (14-23%) y concentración de hidróxido de calcio (0-0.25%), fue procesado en un extrusor de tortillo simple (Brabender Instruments, Modelo E19/25 D, OHG Duisburg, Duisburg, Alemania) con la finalidad de obtener un producto expandido.

Las temperaturas dentro del cañón en la primera, segunda y tercera zona fueron: 60, 80, 110°C respectivamente, mientras que en la cuarta zona del extrusor, la temperatura se fijó de acuerdo al diseño de experimentos (110-150°C) (Tabla 2). Se utilizó una velocidad de alimentación de 50 rpm, velocidad del tornillo de 130 rpm, un tornillo No. 3 (razón de compresión nominal 3:1 y diámetro de 19 mm) y un dado de 3 mm de diámetro.

Las condiciones de operación se fijaron según el diseño de experimentos presentado en la Tabla 2, las cuales derivaron en un total de 20 tratamientos. Cada uno de los tratamientos fue alimentado en la tolva del extrusor para obtener los expandidos de maíz azul. Finalmente, los extrudidos expandidos se seccionaron en piezas de 3 cm de largo y se enfriaron a temperatura ambiente (25°C) durante 1 h. Posteriormente, las muestras se secaron a 60°C en un secador de túnel (sin marca) durante 2 h, y se almacenaron en ausencia de luz a 5°C en bolsas de polietileno selladas hasta su análisis.

Tabla 2. Diseño experimental para la extrusión con diferentes combinaciones de los factores de procesamiento.

Tx ^a	Factores de procesamiento		
	HA (%) X ₁	T (°C) X ₂	CHC (%) X ₃
1	19 (0) ^b	130 (0)	0.13 (0)
2	15 (-1.682)	130 (0)	0.13 (0)
3	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)
4	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)
5	21.38 (1)	141.89 (1)	0.2 (1)
6	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)
7	19 (0)	130 (0)	0.25 (1.682)
8	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)
9	19 (0)	130 (0)	0 (-1.682)
10	21.38 (1)	141.89 (1)	0.05 (-1)
11	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.05 (-1)
12	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.2 (1)
13	23 (1.682)	130 (0)	0.13 (0)
14	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.2 (1)
15	19 (0)	110 (-1.682)	0.13 (0)
16	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.2 (1)
17	19 (0)	150 (1.682)	0.13 (0)
18	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)
19	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)
20	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)

^a Tx, tratamiento; HA, humedad de alimentación; T, temperatura; CHC, concentración de hidróxido de calcio

^b Los números en paréntesis corresponden a los valores codificados

Evaluación de los extrudidos nixtamalizados

Análisis químicos. Se evaluó el contenido de humedad y el contenido de antocianinas totales, utilizando los métodos reportados en las páginas 51 y 54, respectivamente. Además se realizaron las siguientes determinaciones:

pH. Se utilizó el método 02-52 (AACCI, 2000). Se molieron 10 g de extrudido y se colocaron en un vaso de precipitado. Posteriormente, se agregaron 100 mL de agua recién hervida a 25°C. La solución se agitó y se realizó la lectura del pH, utilizando un potenciómetro (Corning, modelo 440, New York, U.S.A.). La evaluación se realizó por triplicado.

Análisis de antocianinas específicas. La preparación de estándares se realizó de la siguiente manera. Se utilizaron estándares de cinco antocianinas: cianidina 3, 5 diglucósido (cyanin chloride), cianidina 3 glucósido (kuromanin chloride), cianidina 3 galactósido (idain chloride), pelargonidina 3 glucósido (callistepin chloride) y malvidina 3 glucósido (oenin chloride). Cada estándar individual (1 mg) se disolvió en 10 mL de una solución de metanol y agua (50% v/v), posteriormente se prepararon alícuotas de 1 mL. Se realizaron curvas de calibración para cada uno de los estándares en concentraciones de 0.025 hasta 0.1 mg/mL.

Para la extracción de antocianinas, se pesaron 2 g de extrudido molido (Moulinex modelo 980-18, Francia) en un tubo para centrifuga de 50 mL, se agregaron 20 mL de etanol acidificado (etanol + HCl 1 N, 85:15 v/v) y se agitaron (Wrist Action Shaker modelo 75, Burrell Corp. EUA) durante 1 h. Posteriormente, la solución se centrifugó (Thermo Scientific, Modelo Heraes Biofuge Primo R., Alemania) a 27,200 x g por 15 min, el sobrenadante se recuperó en un tubo de 50 mL. Al residuo se le agregaron 20 mL de etanol acidificado, y se sometió a las mismas condiciones anteriores de agitación y centrifugación. El sobrenadante obtenido de la segunda centrifugación, se agregó en el tubo que contenía la solución de la primera extracción. Los 40 mL de extracto recuperado se concentraron hasta obtener un volumen de 10 mL a 40°C en un evaporador de nitrógeno (N Evap™ 112, Organomation Associates, Inc., EUA) (Figura 20).



Figura 20. Concentración de los extractos de las muestras de extrudados para el análisis de antocianinas específicas por HPLC-UV-DAD.

Los extractos concentrados se pasaron por una membrana de 0.45 μm (Merk, Millipore, Darmstadt, Alemania) y se almacenaron a 2°C en viales ámbar hasta su análisis. Se obtuvieron 3 extractos de cada muestra. Se utilizó un equipo de HPLC con detector UV y DAD (Agilent Technologies, modelo 1260 Infinity, Alemania). La separación se realizó en un columna de fase inversa C-18 (Waters, Modelo Spherisorb ODS-2, 5 μm , 250 x 46 mm, Irlanda). Las fases móviles fueron A, metanol y B, ácido fórmico al 5%. El gradiente utilizado fue 0-30 min 25% A, 75% B; 31-60 min 40% A, 60% B. La velocidad de flujo fue 1.5 mL/min; temperatura de columna, 35°C; longitud de onda de detección, 535 nm; y volumen de inyección, 20 μL . Se obtuvieron los cromatogramas donde el área bajo la curva representó la concentración en mg/kg de cada antocianina. El análisis se realizó por triplicado.

Análisis físicos. Las determinaciones realizadas fueron: color (*L*, *a* y *b*) (página 56) densidad aparente (página 63) mediante los métodos descritos previamente. Además se realizaron las siguientes determinaciones:

Índice de expansión (IE). Se realizó mediante el procedimiento descrito en la página 63 con una modificación, la cual consistió en la medida del diámetro del dado que en este caso fue de 3 mm y el cual originalmente fue de 4mm.

Análisis de textura. Este procedimiento se realizó según la metodología descrita en la página 67.

Optimización del proceso de extrusión y validación

Para realizar este procedimiento, se utilizó el Software Design Expert V.7.0.0 (Stat-Ease, Minneapolis, MN). Primeramente, se seleccionaron tres variables respuesta: antocianinas totales (maximizar), índice de expansión (maximizar) y parámetro de color *b* (minimizar). Lo anterior con la finalidad de obtener un extrudido con un máximo contenido de antocianinas totales, máxima expansión y parámetro de color *b* más intenso (minimizar).

Una vez que se obtuvieron las gráficas de contorno, se aplicó la superposición de superficies para encontrar la combinación de la región de condiciones óptimas de procesamiento (Myers, 2009), las cuales fueron: humedad de alimentación (HA), concentración de hidróxido de calcio (CHC) y temperatura (T) de la cuarta zona del extrusor. Se obtuvieron tres gráficas de contorno y se estableció la selección de la combinación de las condiciones óptimas de procesamiento.

Validación de las condiciones óptimas del proceso y evaluación de los extrudidos

La validación de las condiciones de extrusión estimadas por el modelo, se evaluaron experimentalmente en el equipo elaborando los extrudidos de maíz azul. Adicionalmente, se elaboraron extrudidos con las mismas condiciones utilizando maíz blanco como control.

Análisis químicos. Se evaluó el contenido de humedad (página 51), contenido de proteína (página 53), contenido de antocianinas totales (página 54), y contenido de antocianinas específicas (página 72).

Análisis físicos. Se determinó el color (L , a , b) (página 56), densidad aparente e índice de expansión (página 73), mediante los métodos descritos previamente.

Análisis de textura. Se evaluó el esfuerzo de corte máximo, utilizando el método reportado en la página 67.

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental de composición central de tres factores y cinco niveles. Los factores de procesamiento fueron: humedad de alimentación, HA (X_1 , 15-23%), concentración de hidróxido de calcio, CHC (X_2 , 0-0.25%) y temperatura final del extrusor, T (X_3 , 110-150°C). Las variables respuesta evaluadas en los extrudidos fueron: contenido de humedad (%), pH, contenido de antocianinas totales (mg/kg), contenido de cianidina 3,5-diglucósido (C3,5diG, mg/kg), contenido de cianidina 3 glucósido (C3G, mg/kg), contenido pelargonidina 3-glucósido (Pel3G,

mg/kg), color (L , a , b), índice de expansión (IE), densidad aparente (g/cm^3) y esfuerzo de corte máximo (ECM, kPa). El modelo empírico que representa la interacción entre las variables independientes (factores de procesamiento) y las variables respuesta, se muestra en la Figura 21.

La expresión matemática modela las variables respuesta (Y_1 - Y_{12}) cuando el valor de k cambia de 1 a 12. Dónde β_{k0} representa la constante, β_{ki} el coeficiente lineal, β_{kij} el coeficiente cuadrático, β_{kji} el efecto de interacción de las variables, y ε el error experimental.

A todos los datos obtenidos de las determinaciones de las variables respuesta se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confiabilidad del 90%. Además para cada determinación, se realizó un análisis de regresión y los factores de procesamiento no significativos ($P < 0.1$) fueron eliminados de la ecuación polinomial de segundo orden. Así, una nueva ecuación fue recalculada para obtener el modelo predictivo final para cada variable respuesta. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (Myers, 2009). Las gráficas de contorno para cada determinación se obtuvieron mediante el Software Design Expert V.7.0.0 (Stat-Ease, Minneapolis, MN).

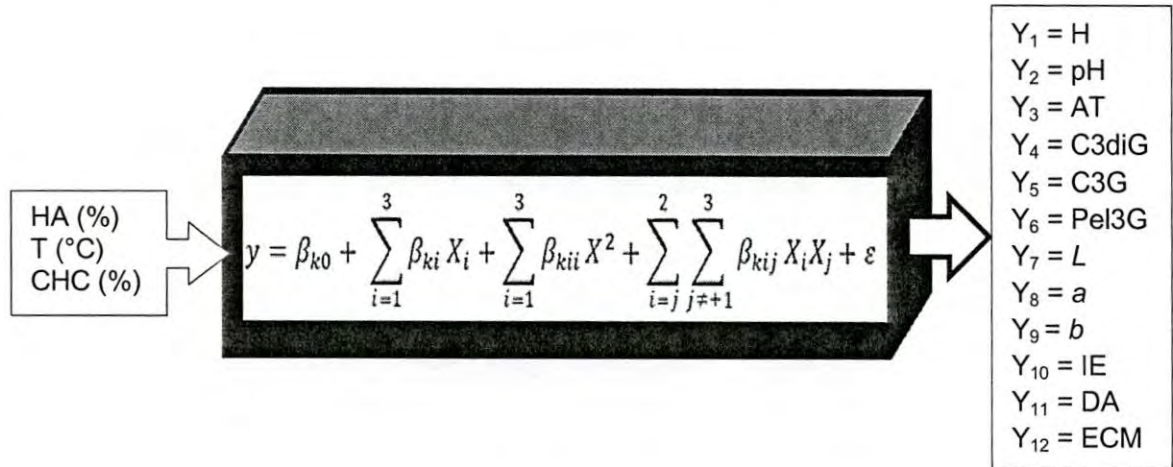


Figura 21. Modelo empírico de la interacción entre los factores de procesamiento y las variables respuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de las Condiciones de Procesamiento en las Propiedades de Extrudidos de Maíz Azul

Características del Maíz Azul

Propiedades químicas. Las propiedades químicas y físicas son parámetros importantes que determinan las características de calidad en granos, y son de utilidad para conocer su funcionalidad y factores de procesamiento (Narváez-González et al., 2006). La composición química del maíz azul se presenta en la Tabla 3. El contenido de humedad del grano, se encuentra dentro del rango reportado por Serna (2009) para este tipo de cereal.

El contenido de almidón total (ALT) es un indicador importante del uso final del grano, ya que tiene influencia en las propiedades térmicas y en consecuencia en el procesamiento de los productos basados en almidón. El contenido de ALT en el maíz azul fue de 68.3%, valor cercano al descrito en maíces adecuados para nixtamalización. Se encontraron valores de ALT similares en granos de maíz azul reportados por Agama et al. (2004). El contenido de proteína es igual al del maíz QPM (10%) (Quality Protein Maize, por sus siglas en inglés), de acuerdo a lo reportado por Milán et al. (2006).

Una vez obtenido el extracto etéreo, se realizó un perfil de ácidos grasos. El germen o embrión contiene alrededor de 83% de los lípidos encontrados en el grano, la mayoría en forma de triacilglicéridos los cuales son utilizados en la industria del aceite (Dyckerson, 2008). En la Figura 22, se presenta la abundancia relativa de ácidos grasos mayoritarios en el maíz azul.

Tabla 3. Composición química del maíz azul.

Componente	Promedio
Contenido de humedad (%)	11.9 ± 0.1 ^a
Contenido de almidón total (%) ^b	68.3 ± 0.8
Contenido de proteína (%) ^b	10.0 ± 0.0
Extracto etéreo (%) ^b	6.4 ± 0.1
Contenido de cenizas (%) ^b	1.7 ± 0.0
Contenido de fibra cruda (%) ^b	1.7 ± 0.1
Dietética total (%) ^b	15.4 ± 0.8

^a Desviación estándar

^b Base seca

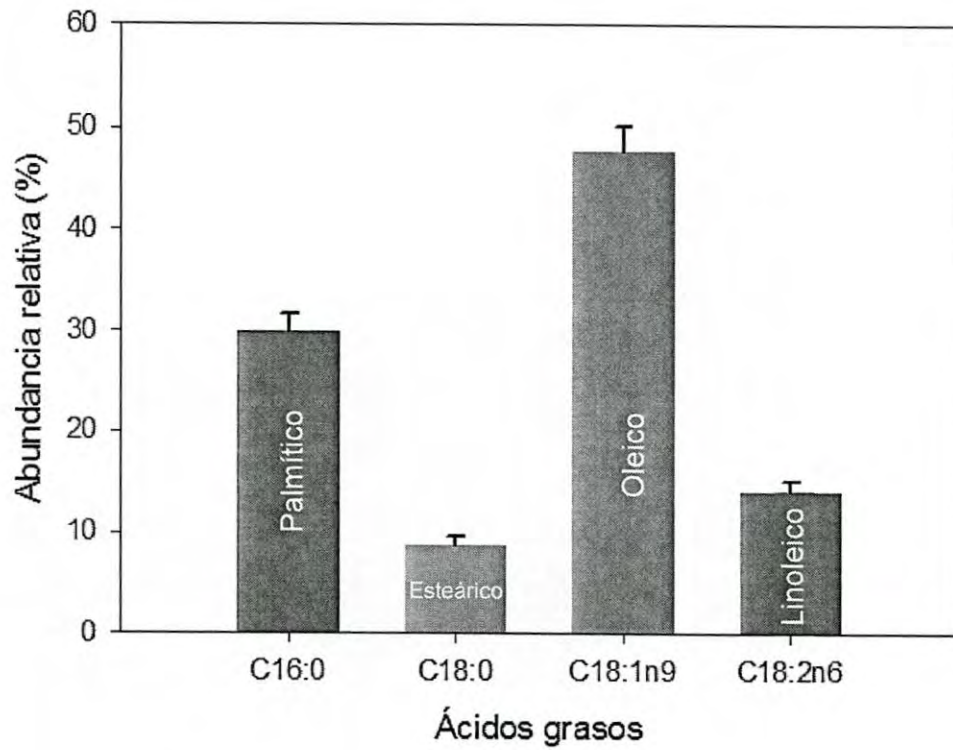


Figura 22. Abundancia relativa de ácidos grasos mayoritarios en el maíz azul. Las barras indican la desviación estándar.

El extracto etéreo de maíz amarillo presenta generalmente, una mayor proporción de ácido linoléico, sin embargo, en el extracto obtenido del maíz azul se encontró una mayor proporción (47.66 %) de ácido oleico. Esta clase de ácido graso monoinsaturado, se encuentra asociado con una baja incidencia de enfermedades coronarias por la disminución de los niveles en sangre de colesterol total (hasta del 10%) y las lipoproteínas de baja densidad (Dennys et al., 2006). El segundo ácido graso encontrado en mayor proporción fue el palmítico con un 29.8%, el cual se encuentra en cantidades menores (12.42%) en el aceite de maíz amarillo (Dauqan et al., 2011). Los ácidos grasos linoleico y esteárico se encontraron en proporciones de 13.92 y 8.06%, respectivamente.

En lo que respecta al contenido de fibra cruda, el maíz azul presentó valores más elevados que los reportados por la FAO (1993) para maíces blanco y amarillo (1.1 y 1.3%). Además, la fibra dietética total fue mayor que la obtenida en maíz QPM (14.9%) según la FAO (1993). Lo anterior, representa un beneficio en el consumo de este tipo de maíz. Diversas investigaciones han descrito los beneficios de consumir granos enteros, incluyendo el incremento del volumen fecal, disminución del tiempo de tránsito intestinal, disminución de niveles de glucosa y colesterol en sangre, atrapamiento de sustancias peligrosas para el organismo (mutagénicos y carcinogénos), entre otros (Dhingra et al. 2012).

En la Tabla 4 se presenta el contenido de antocianinas totales y la cianidina 3-glucósido en los granos de maíz azul evaluados. El contenido de antocianinas totales (AT) en el maíz azul fue similar a los valores descritos por López- Martínez et al. (2011) (631 mg/kg), pero más elevado que los valores obtenidos por Dykes & Rooney (2007) para este color de grano (225 mg/kg). El contenido de cianidina 3-glucósido fue mayor que el reportado por Pedreschi & Cisneros (2007) (154.3 mg/kg) en maíz morado. Este tipo de compuestos dependerán en gran medida de las características de cultivo, almacenamiento y manejo de los granos, por lo que resulta difícil su comparación con los resultados obtenidos en otros maíces pigmentados.

Tabla 4. Contenido de antocianinas en maíz azul.

Componente	Promedio
Contenido de antocianinas totales (mg/kg) ^{ab}	620.9 ± 8.4 ^c
Cianidina 3-glucósido (mg/kg) ^b	167.1 ± 7.8

^a Base seca

^b Absorbancia leída a 535 nm. Expresado como equivalentes de cianidina 3-glucósido

^c Desviación estándar

Propiedades físicas. Las propiedades físicas evaluadas en los granos de maíz azul se presentan en la Tabla 5. Las dimensiones de los granos fueron similares a las de maíces adecuados para nixtamalización (Salinas et al., 2003). Sin embargo, los valores obtenidos de largo, ancho y espesor en esta investigación, fueron mayores que los obtenidos por Figueroa et al. (2013), para otra raza de maíz azul (10.8 mm, 8.3 mm y 3.8 mm, respectivamente).

El peso de mil granos fue mayor que el descrito por Figueroa et al. (2013) para otra variedad de maíz azul (244 g), y que el reportado por Milán et al. (2006) para maíz QPM (260.2 g). El peso hectolitro es una de las principales características físicas de los granos e intervienen en la definición de calidad o grado. El maíz azul presentó valores bajos para esta evaluación, en comparación con los valores reportados por Salinas et al. (2003) para diferentes variedades de maíz azul (~73 kg/hL). El color fue característico para este tipo de maíz.

Características del Maíz Azul Molido

Propiedades químicas y físicas. Cuando el maíz es transformado en harina los granos son molidos o triturados. Durante este proceso los principales componentes del grano, una porción de los gránulos de almidón y sus estructuras internas (regiones amorfas y cristalinas), son también dañadas o degradadas físicamente por fuerzas mecánicas, lo que afecta significativamente sus propiedades químicas y físicas (Li et al., 2014). Las propiedades químicas y físicas obtenidas en el maíz de M1 y M3 se presentan en la Tabla 6. La disminución en el contenido de humedad en el maíz de M3 comparada con el de M1, pudo deberse a la fricción causada dentro del molino, y el ligero incremento de la temperatura durante el proceso de reducción de tamaño.

Respecto a las evaluaciones de color, el parámetro *L* que indica la luminosidad, no presentó diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, el parámetro de color *a* (que indica tonalidades rojas en valores positivos) en el maíz de M3, fue mayor estadísticamente ($P < 0.05$) que el obtenido para el maíz de M1.

Tabla 5. Propiedades físicas del maíz azul.

Parámetro	Promedio	
Largo (mm)	14.25 ± 1.04 ^a	
Ancho (mm)	8.74 ± 0.90	
Espesor (mm)	5.89 ± 1.04	
Peso de mil granos (g)	330.07 ± 5.94	
Peso hectolitro (kg/hL)	61.92 ± 0.35	
	<i>L</i>	37.88 ± 1.18
Color ^b	<i>a</i>	0.42 ± 0.05
	<i>b</i>	4.61 ± 0.60

^a Desviación estándar

^b *L*, blanco (100) a negro (0); *a*, rojo (+) a verde (-); *b*, amarillo (+) a azul (-)

Tabla 6. Propiedades químicas y físicas del maíz con diferente molienda.

		M1 ^a	M3
Contenido de humedad (%)		11.7 ± 0.4a ^b	9.82 ± 0.05b
Color	<i>L</i>	70.69 ± 0.64a	70.71 ± 0.23a
	<i>a</i>	0.95 ± 0.00a	1.10 ± 0.01b
	<i>b</i>	0.41 ± 0.07a	-0.77 ± 0.04b

^a M1, maíz de molienda 1; M3, maíz de molienda 3; *L*, blanco (100) a negro (0); *a*, rojo (+) a verde (-); *b*, amarillo (+) a azul (-)

^b Desviación estándar. Letras diferentes en la misma fila, indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05)

El parámetro b (que indica tonalidades azules en valores negativos), presentó un valor estadísticamente menor ($P < 0.05$) en el maíz molido de M3. Lo anterior pudiera indicar una mayor liberación de los pigmentos contenidos en el grano. Es decir, que entre mayor es el grado de molienda, estos compuestos se incorporan en el material de manera más uniforme por la reducción del tamaño de partícula, cambiando la tonalidad en las fracciones de maíz molido.

Los productos obtenidos por extrusión dependen principalmente de las características del maíz molido: tamaño de partícula, contenido de almidón dañado por el proceso de molienda (tipo de molino) y condiciones del extrusor (Martínez et al., 1998). Para la distribución de tamaño de partícula, el análisis estadístico indicó que el grado de molienda (M1 o M3) afectó significativamente ($P < 0.05$) esta determinación. Las fracciones retenidas en cada una de las mallas del maíz molido de la primera molienda (M1) fueron estadísticamente diferentes a aquellas obtenidas de la tercera molienda (M3). En la Figura 23, se presenta la distribución de tamaño de partícula (DTP) del maíz molido de M1 y M3.

Para ambas moliendas se observa una DTP de forma sigmoideal, esta forma en la distribución se ha reportado en maíz molido obtenido por atrición o molienda de martillo (Sahai et al., 2001). Para el maíz molido de M1 y M3, los mayores pesos retenidos se encontraron en las mallas No. 60 (250 μm) y fondo (<149 μm). Para la M1, el peso retenido en la malla No. 60 fue estadísticamente mayor que para el maíz de M3. Sin embargo, el peso retenido en el fondo (<149 μm) en el maíz de M3 fue significativamente mayor que el presentado por la M1. Por otro lado, en el resto de las mallas, el peso retenido fue significativamente mayor para M1 que para M3.

La fracción acumulativa de maíz molido en las mallas No. 20, 40, 60 y 80 (partículas gruesas), fue de 39.41% para el maíz molido de M1 y 20.92% para el maíz molido de M3. Estos resultados difieren a aquellos presentados por Fernández et al. (2010), quienes obtuvieron mayores porcentajes de retención (80-90%) en fracciones de harina nixtamalizada en las mallas No. 40, 60 y 80.

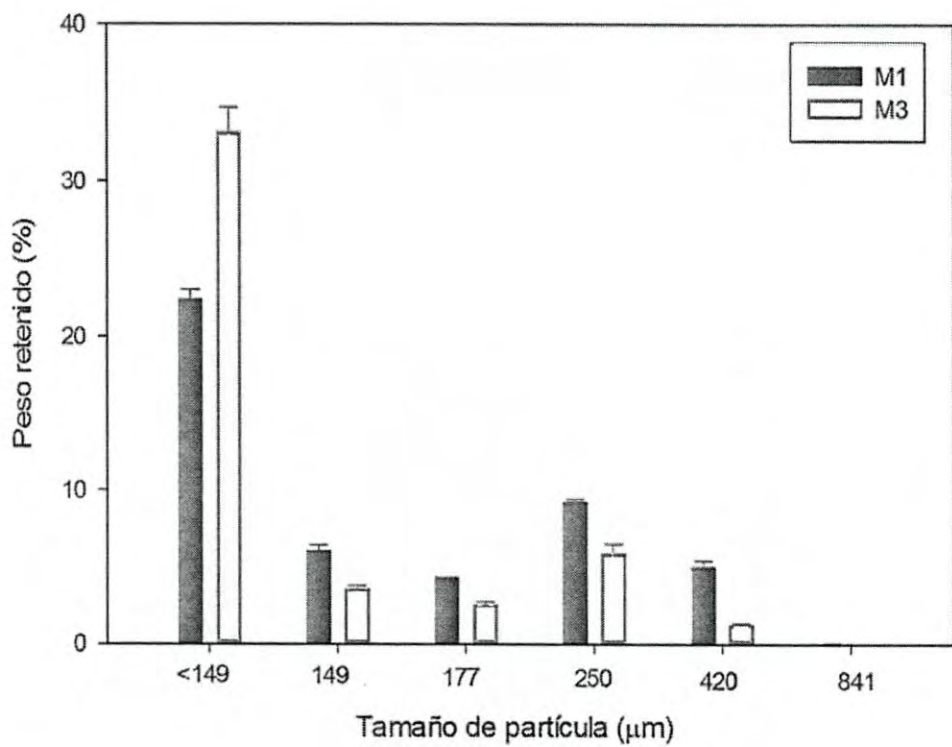


Figura 23. Distribución de tamaño de partícula del maíz molido de la primera (M1) y tercera (M3) molienda. Las barras indican la desviación estándar.

Cuando se comparan las fracciones acumulativas retenidas en la malla No. 100 y el fondo (partículas finas), los resultados muestran una diferencia marcada entre las fracciones de M1 (60.58%) y M3 (79.08%). De acuerdo a Fernández et al. (2010), la DTP de harinas nixtamalizadas está asociada al tratamiento térmico-alkalino, tiempo de acondicionamiento y molienda. Este proceso modifica los componentes del grano, lo cual se asocia a la inhibición de la gelatinización del almidón causada por la adición de hidróxido de calcio a los granos de maíz.

El índice de tamaño de partícula (ITP) de las fracciones de maíz molido se presenta en la Tabla 7. El ITP del maíz molido de M1 fue menor ($P < 0.05$) al compararse con el maíz molido de M3. Los valores elevados de este parámetro, denotan una alta proporción de partículas finas. De acuerdo a Mathew et al. (1999), las muestras de maíz molido fino producen extrudidos con más expansión que las muestras con molido medio y grueso (ITP bajo) a determinadas condiciones de procesamiento.

Propiedades químicas de los extrudidos nixtamalizados

Las propiedades químicas evaluadas en los extrudidos de maíz azul se discuten a continuación.

Contenido de humedad (H). Los resultados del análisis de varianza (ANDEVA) del efecto de los factores de procesamiento sobre el contenido de humedad en los extrudidos se presentan en la Tabla 8. El contenido de humedad de los extrudidos fue afectado muy significativamente ($P < 0.01$) por los tres factores de procesamiento evaluados (T, ITP y HA), así como de sus interacciones.

Para la interacción (T)(HA) el análisis estadístico mostró, que el contenido de humedad en los extrudidos disminuyó con la HA. Al mantener la HA en el rango de 14-16%, el contenido de humedad de los extrudidos fue menor en aquellos procesados a una T de 140°C. Para HA mayores a 18.5%, el contenido de humedad fue mayor para los extrudidos procesados a 130°C.

Tabla 7. Índice de tamaño de partícula (ITP) en maíz azul molido de M1 y M3.

Número de molienda	ITP
Primera (M1)	83.97 ± 0.86 ^a
Tercera (M3)	94.15 ± 3.18 ^b

^a Desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna, indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05)

Tabla 8. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de humedad de extrudidos de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	<i>F</i>
Temperatura (T)	1	32.73 ^{**b}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	8.71 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	167.23 ^{**}
(T)(ITP)	5	5.84 ^{**}
(HA)(T)	5	12.99 ^{**}
(HA)(ITP)	5	13.71 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	1	30.36 ^{**}
Error	48	
Total	70	

^a GL, grados de libertad

^b ^{**}Muy significativo (P<0.01)

Se ha reportado que la humedad de alimentación elevada, produce extrudidos más densos y de color oscuro, debido al cambio en la estructura macromolecular en los componentes almidonosos del producto, lo que reduce la elasticidad y disminuye su expansión formando materiales más compactos (Ding et al., 2006).

En la Tabla 9 se presentan los valores promedio del contenido de humedad en los extrudidos elaborados a diferente temperatura (T), índice de tamaño de partícula (ITP), y humedad de alimentación (HA). Al evaluar el efecto de la interacción (T)(ITP), el análisis estadístico demostró que el contenido de humedad en los extrudidos obtenidos a 140°C y con maíz de ITP 94.1, fue ligeramente mayor que para los procesados a 130°C.

Se ha observado que la HA presenta los mayores efectos en las características fisicoquímicas de los productos extrudidos (Delgado et al., 2012). El contenido de humedad en los extrudidos disminuyó conforme la HA decreció y fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) en casi todos los extrudidos. Al evaluar el efecto de la T final del extrusor, el análisis estadístico mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) en el contenido de humedad de los extrudidos, siendo los procesados a 130°C los que presentaron el valor más alto. En lo que respecta al efecto de la molienda, el análisis estadístico demostró que los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9, presentaron un mayor contenido de humedad, siendo significativamente diferentes ($P < 0.05$) que aquellos elaborados con maíz de ITP 94.1.

Contenido de antocianinas totales (AT). Los resultados del ANDEVA del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación sobre el contenido de AT de los extrudidos se presentan en la Tabla 10. El contenido de AT fue afectado muy significativamente ($P < 0.01$) por la T, ITP y HA, así como por las interacciones (HA)(T) y (HA)(ITP). El análisis de varianza demostró que la T fue el factor que afectó más significativamente este parámetro.

Tabla 9. Contenido de humedad (H) de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	H (%)	
130	83.9	14	7.48 ± 0.16 ^b	
		15	7.95 ± 0.07	
		16	8.69 ± 0.22	
		16.5	9.34 ± 0.17	
		18.5	9.55 ± 0.22	
		20.5	9.99 ± 0.22	
		94.1	14	7.87 ± 0.09
	15	8.03 ± 0.23		
	16	8.72 ± 0.14		
	16.5	8.49 ± 0.01		
	18.5	9.70 ± 0.27		
	20.5	10.89 ± 0.31		
	140	83.9	14	7.79 ± 0.11
			15	7.43 ± 0.09
16			7.95 ± 0.31	
16.5			8.97 ± 0.19	
18.5			9.92 ± 0.21	
20.5			10.90 ± 0.20	
94.1			14	7.14 ± 0.09
15		7.59 ± 0.07		
16		7.84 ± 0.10		
16.5		8.03 ± 0.22		
18.5		9.44 ± 0.23		
20.5		10.60 ± 0.17		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación

^b Desviación estándar

Tabla 10. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de antocianinas totales de extrudidos de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	<i>F</i>
Temperatura (T)	1	143.53 ^{**c}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	39.87 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	70.66 ^{**}
(T)(ITP)	5	40.84 ^{**}
(HA)(T)	5	30.55 ^{**}
(HA)(ITP)	5	6.39 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	1	3.76 ^{ns^b}
Error	24	
Total	46	

^a GL, grados de libertad

^b ns, no significativo ($P > 0.05$)

^c ^{**}Muy significativo ($P < 0.01$)

En lo que respecta a la interacción (HA)(ITP), el análisis estadístico mostró que los extrudidos procesados con maíz de ITP 83.9 obtuvieron los contenidos más altos de AT, excepto en los extrudidos elaborados con HA de 20.5%, en los cuales, el contenido de AT fue mayor para los elaborados con maíz de ITP 94.1. Es decir que entre más grande sea el tamaño de partícula, mayor es el contenido de AT.

El ligero incremento en la temperatura por el efecto abrasivo durante la molienda del maíz, pudo tener un efecto en la degradación de los compuestos fenólicos, ya que la interacción (T)(ITP) presentó un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en esta determinación.

El valor promedio del contenido de AT de los extrudidos nixtamalizados de maíz azul elaborados con diferente T, ITP y HA se presenta en la Tabla 11. El contenido AT del maíz azul sin procesar fue de 621.64 mg/kg. Las antocianinas son compuestos estables a pH ácido, y cuando se adiciona cal (hidróxido de calcio) el contenido de AT disminuye (Salinas et al., 2003). Además, la elevada velocidad del tornillo y la temperatura son factores del proceso de extrusión, que afectan el contenido de polifenoles y antocianinas de productos extrudidos (Brennan et al., 2011).

Los extrudidos retuvieron entre el 17.8 y 38.5% del contenido de AT con respecto al contenido del maíz azul sin procesar. A baja HA (menores a 16%) el contenido de AT fue mayor para los extrudidos procesados a 130°C, sin embargo, cuando la HA incrementó (mayor a 16.5%) el contenido de AT fue mayor en los extrudidos obtenidos a 140°C (Tabla 11).

Lo anterior evidencia el efecto de la T demostrado en el análisis de varianza, especialmente cuando los extrudidos se procesan en el rango de 16 a 16.5% de HA. Los extrudidos elaborados a 130°C retuvieron mayor cantidad de AT que aquellos procesados a 140°C.

Tabla 11. Contenido de antocianinas totales (AT) en extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	AT (mg/kg) ^{bc}	
130	83.97	14	177.12 ± 0.69 ^d	
		15	190.73 ± 6.35	
		16	239.94 ± 16.24	
		16.5	132.52 ± 1.73	
		18.5	181.03 ± 4.34	
		20.5	165.45 ± 12.39	
		94.15	14	128.57 ± 0.73
	15	187.46 ± 5.50		
	16	190.80 ± 0.89		
	16.5	152.15 ± 8.06		
	18.5	155.21 ± 2.34		
	20.5	178.19 ± 12.39		
	140	83.97	14	110.95 ± 2.07
			15	143.59 ± 0.79
16			163.06 ± 8.59	
16.5			193 ± 0.00	
18.5			146.22 ± 7.74	
20.5			171.02 ± 0.32	
94.15			14	146.62 ± 1.75
15		142.72 ± 1.38		
16		173.26 ± 1.73		
16.5		128.51 ± 2.44		
18.5		122.26 ± 0.93		
20.5		164.60 ± 6.07		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación

^b Absorbancia leída a 535 nm., expresada como equivalentes de cianidina 3-glucósido

^c Base seca

^d Desviación estándar

A humedad de alimentación de 16 y 16.5%, el contenido de AT fue mayor en todos los extrudidos. En esos rangos de HA, probablemente las antocianinas son liberadas de la matriz de células de la capa aleurona, formando monómeros y dímeros con efectos benéficos para la salud (Brennan et al., 2011). El tratamiento que presentó el contenido de AT más alto (239.94 mg/kg), fue el elaborado bajo los siguientes factores de procesamiento: T de 130°C, ITP de 83.97 y HA 16%. Incluso cuando el proceso de extrusión afectó el contenido de AT, los resultados en este trabajo demuestran que la pérdida de antocianinas ocurre sólo parcialmente. Mora-Rochin et al. (2010), evaluaron el efecto del proceso de extrusión en el contenido de fenoles (incluyendo antocianinas) de tortillas elaboradas con maíces pigmentados procesados mediante nixtamalización tradicional y por extrusión. Los resultados indican que el proceso de extrusión con la adición de cal, retiene un mayor nivel de fitoquímicos como las antocianinas, especialmente en las tortillas elaboradas con maíz azul.

Resultados similares en el contenido de AT se reportaron en otra investigación realizada por Del Pozo et al. (2006), concluyendo que los productos extrudidos de maíz azul muestran el mejor perfil de antocianinas en comparación con otros maíces pigmentados, excepto con el maíz morado.

Contenido de cianidina 3-glucósido (C3G). La cianidina 3-glucósido (y sus derivados malonil) es un tipo de antocianina contenida en maíz morado y azul (Yang et al. 2009). En la Tabla 12, se presenta el análisis de varianza del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación, sobre el contenido de C3G en los extrudidos elaborados.

Se observó que los tres factores de procesamiento estudiados y sus interacciones, afectaron muy significativamente los valores de C3G, destacando la HA y la interacción (HA)(T)(ITP).

Tabla 12. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el contenido de cianidina 3-glucósido de extrudidos de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	F
Temperatura (T)	1	146.90 ^{**c}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	435.37 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	6797.46 ^{**}
(T)(ITP)	1	7.65 ^{*b}
(HA)(T)	5	738.98 ^{**}
(HA)(ITP)	5	728.35 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	5	1329.21 ^{**}
Error	24	
Total	46	

^a GL, grados de libertad

^b *Significativo ($P < 0.05$)

^c ** Muy significativo ($P < 0.01$)

La Tabla 13 presenta el promedio del contenido de C3G en los extrudidos elaborados con diferente T, ITP y HA. Los valores de C3G mostraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) para los diferentes niveles de HA. Esto indicó que este parámetro del proceso de extrusión, afectó muy significativamente ($P < 0.01$) los valores de C3G. Las antocianinas son compuestos solubles en agua, probablemente la presencia de cierto contenido de humedad llevó a cambios estructurales y/o la degradación de este compuesto. El contenido de C3G fue mayor en los extrudidos elaborados con HA de 16 y 16.5%.

El contenido de C3G fue mayor para los extrudidos elaborados a 140°C que para los obtenidos a 130°C. Este efecto fue positivo para el propósito de este estudio, y concuerda con el resultado obtenido en el ANDEVA donde se presentó un efecto significativo de la temperatura, lo que indica que la C3G resultó ser una antocianina con mayor estabilidad (Brennan et al., 2011). Con respecto al factor molienda, los extrudidos producidos con maíz de ITP 83.9, mostraron contenidos de C3G mayores que aquellos elaborados con maíz de ITP 94.1.

En este estudio, se utilizaron granos de maíz integral, lo cual significa que se encuentra presente un mayor contenido de pericarpio y germen en el maíz molido. Estas partes anatómicas del grano, posiblemente proveen de un efecto de protección y retención de las AT y el contenido de C3G. El menor contenido de esta antocianina en los extrudidos (Tabla 13) fue 7.5 mg/kg, que corresponde a un 4.5% del contenido de C3G presente en el maíz sin procesar.

Sin embargo, el mayor contenido de C3G (186 mg/kg) se encontró en los extrudidos elaborados con los siguientes factores de procesamiento: T 140°C, ITP 83.97 y HA 16.5%, presentándose un incremento del 11.3% comparado con el contenido los granos de maíz azul sin procesar. Con lo anterior, se asume que la C3G fue retenida en su totalidad y que durante el procesamiento por extrusión, ocurrieron ciertos cambios químicos y estructurales que generaron mayor cantidad de C3G.

Tabla 13. Contenido de cianidina 3-glucósido (C3G) en extrudidos nixtamalizados de maíz azul elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	C3G(mg/kg) ^{bc}	
130	83.97	14	60.8 ± 3.4 ^d	
		15	84.6 ± 5.3	
		16	138.3 ± 23.1	
		16.5	82.1 ± 4.8	
		18.5	84.3 ± 1.5	
		20.5	7.6 ± 1.2	
		94.15	14	45.3 ± 2.7
	15	67.8 ± 2.8		
	16	15.8 ± 2.8		
	16.5	156.1 ± 3.3		
	18.5	98.9 ± 7.0		
	20.5	24.0 ± 1.7		
	140	83.97	14	40.4 ± 4.6
			15	56.6 ± 2.6
16			66.3 ± 3.8	
16.5			186.0 ± 20.9	
18.5			103.1 ± 11.4	
20.5			28.8 ± 2.3	
94.15			14	57.1 ± 2.4
15		52.4 ± 3.7		
16		66.8 ± 4.2		
16.5		154.0 ± 11.3		
18.5		81.7 ± 12.6		
20.5		30.6 ± 1.1		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación

^b Base seca

^c Absorbancia leída a 535 nm

^d Desviación estándar

De acuerdo a Salinas et al. (2003), el incremento del contenido de C3G pudiera ser debido a la degradación de antocianinas aciladas como la cianidina 3-(3'',6''-malonilglucósido) y 3-(3'', 6''-dimalonilglucósido). Las antocianinas aciladas poseen un enlace éster entre el glucósido y el grupo malonil el cual es inestable a altas temperaturas y niveles de pH, el rompimiento de este enlace deriva en la degradación de estas antocianinas para formar C3G.

Índice de absorción de agua (IAA). Las propiedades fisicoquímicas de los alimentos extrudidos, están relacionadas con las modificaciones moleculares que tienen lugar durante el procesamiento y dependen de las condiciones del mismo. El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de material soluble (IMS), tienen efectos significativos para la obtención de productos extrudidos con una textura y aplicaciones particulares.

En la Tabla 14, se presenta el ANDEVA donde se observa que los tres factores de procesamiento y sus interacciones, mostraron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en el IAA de los extrudidos elaborados. La cocción por extrusión es capaz de romper los enlaces covalentes en los biopolímeros, y facilita reacciones que están limitadas por la difusión de reactivos y productos. La transferencia de energía térmica y mecánica al almidón durante la extrusión afecta el rompimiento de los enlaces covalentes primarios, secundarios y de hidrogeno e influye sobre varias características tales como el IAA y el IMS (Iwe et al. 2001).

Si el material extrudido sufrió un alto grado de fragmentación en las moléculas de amilosa y amilopectina, más sitios hidrofílicos pueden unirse a moléculas de agua incrementando el IAA. Otro factor que pudo influir sobre los valores de IAA en los extrudidos obtenidos en esta investigación, fue el contenido de pericarpio (fibra y otros componentes como gomas). Se ha comprobado que estos compuestos tienen la habilidad de absorber grandes cantidades de agua (Zambrano-Zaragoza et al., 2013) cambiando el IAA e IMS de los productos obtenidos.

Tabla 14. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la T, ITP y HA sobre el índice de absorción de agua e índice de material soluble de extrudidos de maíz azul.

Fuente de variación	GL	<i>F</i>	
		IAA ^a	IMS
Temperatura (T)	1	22.01 ^{**d}	0.33ns ^b
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	73.98 ^{**}	5.07 ^{*c}
Humedad de alimentación (HA)	5	25.25 ^{**}	28.09 ^{**}
(T)(ITP)	1	45.39 ^{**}	2.81 [*]
(HA)(ITP)	5	14.49 ^{**}	5.76 ^{**}
(HA)(T)	5	13.97 ^{**}	2.22ns
(HA)(T)(ITP)	5	16.95 ^{**}	5.80 [*]
Error	24		
Total	47		

^a IAA, índice de absorción de agua; IMS, índice de material soluble; GL, grados de libertad

^b ns, no significativo ($P > 0.05$)

^c *Significativo ($P < 0.05$)

^d **Muy significativo ($P < 0.01$)

En la Figura 24 se presenta el efecto de la humedad de alimentación y temperatura sobre el IAA de los extrudidos nixtamalizados. Para el maíz sin extrudir, el IAA del maíz de ITP 83.9 (M1) fue significativamente mayor ($P < 0.05$) (1.65 peso gel/ g muestra seca) que para el del maíz de ITP 94.1 (M3, 1.36 peso gel/g muestra seca). Ambos valores de IAA obtenidos en el maíz sin extrudir, fueron significativamente ($P < 0.05$) menores que aquellos obtenidos en todos los extrudidos elaborados.

El efecto significativo de la molienda (ITP) en el maíz integral se debe a que durante este proceso, cambian las propiedades de hidratación, en particular, las cinéticas de absorción de agua dando como resultado del incremento del área de superficie y por lo tanto, las fibras se hidratan más rápidamente (Dhingra et al. 2012).

Se ha reportado que el tipo de endospermo influye en el IAA e IMS, ya que el endospermo cristalino, es más susceptible a sufrir un mayor daño durante el proceso de molienda que el endospermo harinoso. El maíz azul utilizado en esta investigación contiene un endospermo mayormente harinoso, lo que afecta directamente el IAA, la formación de pasta y la reología de los productos (Agama-Acevedo et al., 2011).

Aunque no existe una tendencia clara en los valores de este parámetro en lo que respecta a los extrudidos, se observa que en general el IAA incrementa a HA de 14 a 16%, luego disminuye a HA de 16.5 e incrementa nuevamente hasta HA de 20.5%, independientemente de la T de procesamiento. Asimismo, la tendencia mostró que los extrudidos elaborados a 140°C presentaron menor IAA a cualquier HA, excepto en los tratamientos elaborados a HA 15 y 20.5%.

Los datos obtenidos se ajustaron a una ecuación polinomial cúbica ($f = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$) y se encontraron coeficientes de determinación (R^2) de 0.43 y 0.77 para el IAA de los extrudidos elaborados a 130°C y 140°C, respectivamente. Lo anterior demuestra el efecto significativo de la interacción a determinados contenidos la HA, el cual se hace más evidente en los extrudidos elaborados a 140°C.

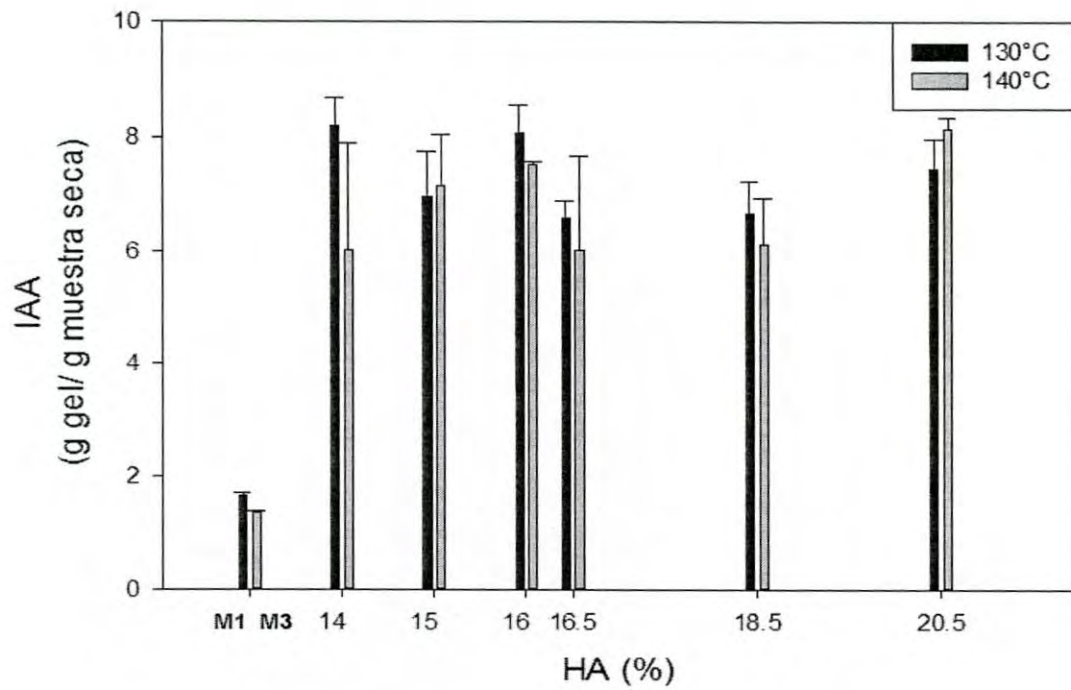


Figura 24. Efecto de la HA y la T sobre el IAA de extrudados nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda. Las barras indican la desviación estándar.

En la Figura 25, se presenta el efecto de la humedad de alimentación e índice de tamaño de partícula sobre el IAA de los extrudidos nixtamalizados. Al analizar el efecto de esta interacción, se observa en general, que el IAA fue mayor en los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9 que en los extrudidos de ITP 94.1. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas significativas excepto en los tratamientos procesados con HA de 16.5%.

De la misma manera que en la interacción (T)(HA), la tendencia fue que el IAA de los extrudidos incrementó a HA de 14-16%, posteriormente disminuyó a HA de 16.5 e incrementó nuevamente hasta HA de 20.5%, independientemente del ITP. Estos datos también se ajustaron a una ecuación polinomial cúbica, encontrándose coeficientes de determinación (R^2) de 0.71 y 0.44 para los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9 y 94.1, respectivamente.

Índice de material soluble (IMS). En la Tabla 14 se presentan los resultados del ANDEVA del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación sobre el IMS de extrudidos nixtamalizados. Se observa que la interacción (HA)(ITP) presentó un efecto muy significativo ($P < 0.01$), y la interacción (T)(ITP) presentó un efecto significativo ($P < 0.05$) sobre el IMS.

Este parámetro a menudo es usado como un indicador de la degradación molecular, mide el grado de conversión del almidón durante la extrusión, es decir, la cantidad de polisacáridos solubles liberados del componente de almidón después del procesamiento. Al analizar los valores promedios obtenidos para este parámetro, se puede deducir que durante el procesamiento el almidón sufrió un alto grado de fragmentación.

En la Figura 26 se presenta el efecto de la humedad de alimentación y temperatura sobre el IMS de los extrudidos nixtamalizados. El IMS no presentó diferencias significativas ($P > 0.05$) en el maíz sin extrudir de ambas moliendas, pero fue menor al compararlo con el IMS de todos los tratamientos de extrudidos.

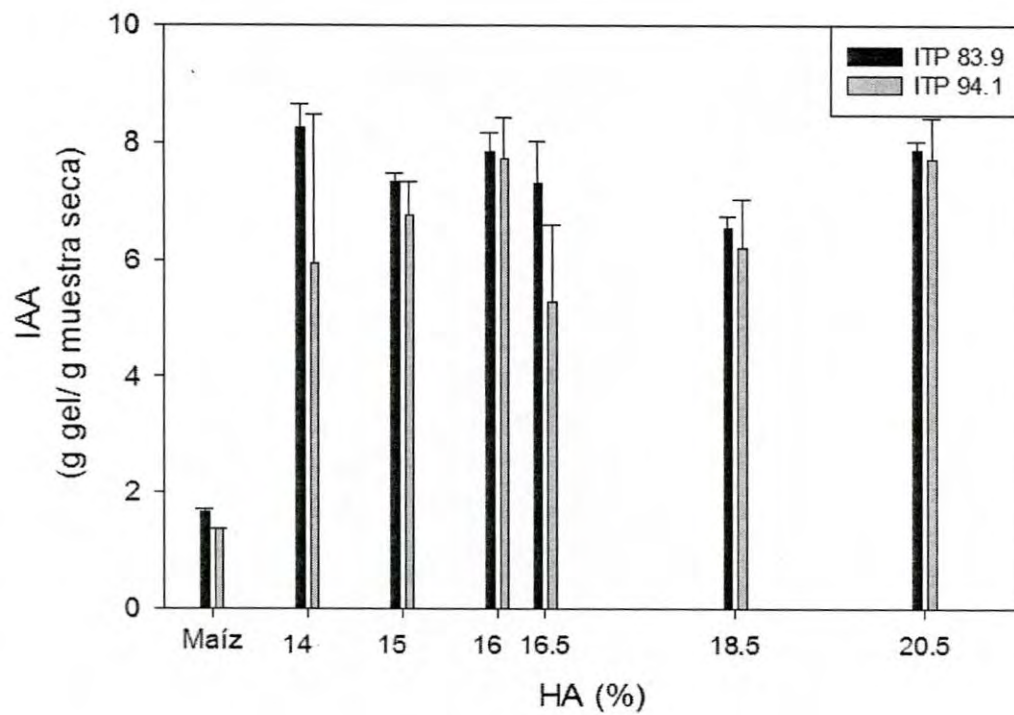


Figura 25. Efecto de la HA y el ITP sobre IAA en los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz molido de diferente ITP. Las barras indican la desviación estándar.

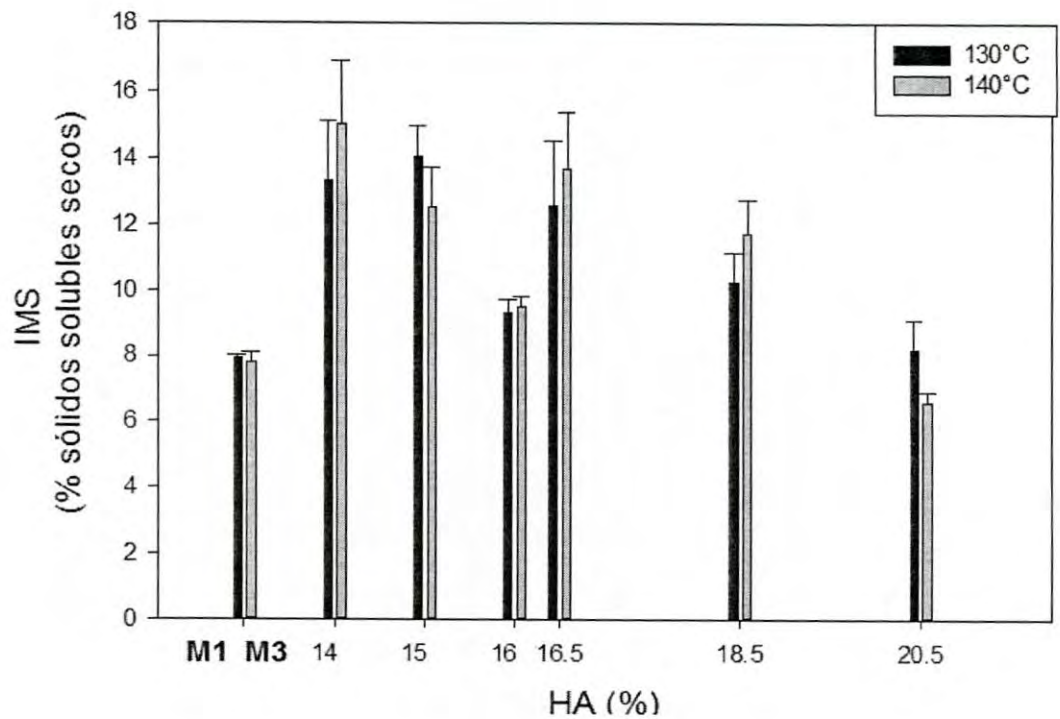


Figura 26. Efecto de la HA y la T sobre el IMS de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda. Las barras indican la desviación estándar.

Se observó que el IMS no presentó diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$) en los extrudidos elaborados a 130 y 140°C. Sin embargo, el tratamiento elaborado con HA de 20.5% y 140°C, presentó un IMS estadísticamente más bajo de todos los extrudidos evaluados. No se encontraron diferencias estadísticas en los demás tratamientos.

Se presentó una tendencia general respecto al incremento del IMS de los extrudidos, encontrando que conforme la HA aumentó de 14 a 16% este parámetro disminuyó, posteriormente al alcanzar una HA de 16.5% y hasta el 20.5%, el IMS incrementó nuevamente en los extrudidos independientemente de la T de procesamiento. Esta tendencia tuvo un efecto inversamente proporcional al encontrado para el IAA. Asimismo, los datos se ajustaron con una ecuación polinomial encontrando coeficientes de determinación (R^2) de 0.65 y 0.81 en los extrudidos elaborados a 130 y 140°C respectivamente, más altos que los presentados para el IAA.

Los resultados presentados concuerdan con lo descrito por Martínez et al. (1998), quienes reportaron que el aumento en las temperaturas de extrusión y la humedad de alimentación incrementan significativamente el IAA y el IMS de los productos elaborados.

En la Figura 27, se presenta el efecto de la humedad de alimentación y el índice de tamaño de partícula sobre el IMS de los extrudidos nixtamalizados. Se observa que el maíz sin extrudir de ambas moliendas presentó los mismos valores de IMS que los tratamientos de extrudidos con HA de 20.5%. Estos últimos presentaron el valor más bajo para este parámetro, no encontrándose diferencias estadísticas entre los demás tratamientos de extrudidos.

En general, a HA de 14 a 16% el IMS disminuyó, posteriormente a HA de 16.5% este parámetro incrementó nuevamente hasta los tratamientos de 20.5%, independientemente del ITP. Los datos obtenidos se ajustaron a una ecuación polinomial cúbica, obteniendo coeficientes de determinación (R^2) de 0.63 y 0.78 para los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9 y 94.1, respectivamente.

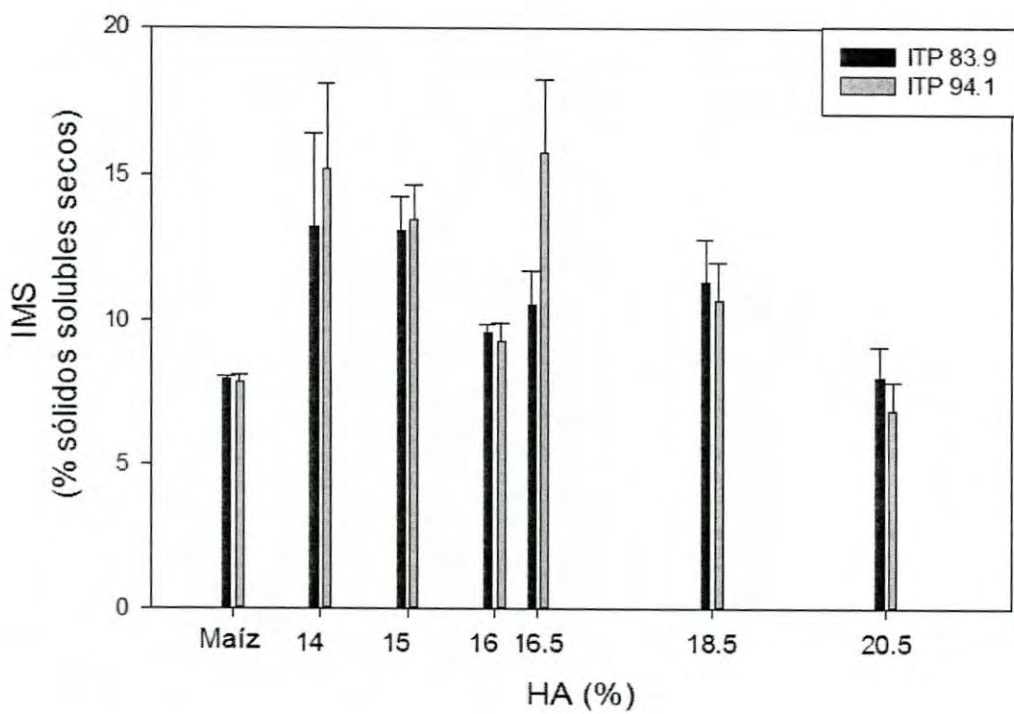


Figura 27. Efecto de la HA y el ITP sobre el IMS de extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz molido de diferente ITP. Las barras indican la desviación estándar.

Los extrudidos se obtuvieron del maíz azul integral, es decir, que contienen cierta proporción de lípidos (germen) y proteínas que se encuentran periféricos a los gránulos de almidón, estos componentes pueden afectar los valores de IMS. Ho & Izzo (1992) indicaron que la presencia de lípidos en bajas cantidades, mejoran el proceso de la formación del complejo almidón-proteína durante la extrusión, mediante la prevención de la formación de materiales insolubles, lo que incrementa el IMS y pudiera explicar los valores elevados de IMS obtenidos en las muestras de extrudidos elaborados.

Con los valores obtenidos para el IAA e IMS en los extrudidos, se puede deducir que durante el proceso de reducción de tamaño no hubo un daño excesivo en los gránulos de almidón de maíz azul. Esto debido probablemente al efecto de protección de ciertos componentes diferentes al almidón contenidos en los granos (proteínas y matrices de pared celular), los cuales evitaron cambios estructurales drásticos durante la molienda (Li et al., 2014).

De acuerdo a Oikonomou & Krokida (2012), los factores que presentan efectos significativos en el IAA e IMS de materiales extrudidos se clasifican en dos grupos: el primero consiste en los parámetros relacionados con la materia prima (formulación, acondicionamiento, ITP, proceso de molienda); el segundo se encuentra relacionado con las condiciones de extrusión (tipo de extrusor, humedad y velocidad de alimentación, temperatura de la última sección del extrusor, tipo y velocidad del tornillo, tipo de dado, entre otros). Debido a lo anterior y a los resultados obtenidos, fue difícil establecer tendencias más claras e indicativas en los productos extrudidos desarrollados en esta investigación.

Propiedades físicas

A continuación, se discuten los resultados obtenidos para las propiedades físicas evaluadas en los extrudidos.

Color. Los cambios en estos parámetros durante la extrusión tienen implicaciones importantes en la aceptación de este tipo de productos por parte de los

consumidores. En la Tabla 15 se presenta el ANDEVA del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación sobre los parámetros de color de los extrudidos nixtamalizados.

El ANDEVA indicó que la HA y T, presentaron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en el parámetro de color L y a , así como las interacciones (T)(HA), (HA)(ITP) y (T)(ITP). Para el parámetro b , el análisis de varianza indicó un efecto muy significativo ($P < 0.01$) de los tres factores estudiados, así como de sus interacciones.

En la Tabla 16 se presentan los valores promedio de los tres parámetros de color evaluados en los extrudidos elaborados con diferente T, ITP y HA. Los extrudidos obtenidos con maíz de ITP 94.1 y a T de 140°C , presentaron los valores más altos en el parámetro L , en comparación con aquellos obtenidos a T de 130°C .

El parámetro de color L , indica tonalidades claras a valores altos (blanco) y oscuras a valores bajos (negro). El maíz azul sin extrudir presentó un valor de L de 37.88, esto indicó una disminución en este parámetro en los extrudidos elaborados. A medida que la HA incrementó, el valor de L disminuyó y fue diferente en todos los tratamientos evaluados.

El valor más alto de L (37.42) fue para los extrudidos procesados con HA de 14%, T de 140°C e ITP 83.9. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Iio & Berghofer (1999), quienes demostraron que los parámetros L y a de extrudidos de maíz amarillo son dependientes de la HA y las temperaturas de las diferentes zonas del extrusor.

Los valores positivos y negativos del parámetro a indican tonalidades rojas y verdes, respectivamente. El análisis estadístico indicó que a T de 130°C el parámetro a , fue menor ($P < 0.05$) que en el obtenido en los extrudidos procesados a T de 140°C , excepto en los extrudidos elaborados con HA de 20.5%.

Tabla 15. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la T, ITP y HA sobre los parámetros de color de los extrudidos nixtamalizados.

Fuente de variación	GL ^a	<i>F</i>		
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Temperatura (T)	1	241.41 ^{**c}	599.25 ^{**}	1135.22 ^{**}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	0.44ns	0.10ns ^b	242.65 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	1008.33 ^{**}	543.75 ^{**}	378.97 ^{**}
(T)(ITP)	1	387.54 ^{**}	54.25 ^{**}	58.54 ^{**}
(HA)(ITP)	5	111.39 ^{**}	105.47 ^{**}	55.55 ^{**}
(HA)(T)	5	68.52 ^{**}	65.33 ^{**}	123.06 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	5	171.92 ^{**}	87.07 ^{**}	8.17 ^{**}
Error	72			
Total	94			

^a *L*, blanco (100) a negro (0); *a*, rojo (+) a verde (-); *b*, amarillo (+) a azul (-); GL, grados de libertad

^b ns, no significativo ($P > 0.5$)

^c ^{**}Muy significativo ($P < 0.01$)

Tabla 16. Parámetros de color *L*, *a* y *b* en extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	
130	83.97	14	37.42 ± 0.03 ^b	5.47 ± 0.03	0.30 ± 0.05	
		15	36.80 ± 0.01	5.34 ± 0.01	0.37 ± 0.04	
		16	29.50 ± 0.02	5.36 ± 0.11	0.03 ± 0.06	
		16.5	24.23 ± 0.01	3.88 ± 0.11	-0.27 ± 0.35	
		18.5	21.79 ± 0.01	3.61 ± 0.08	-0.50 ± 0.04	
		20.5	21.53 ± 0.15	3.29 ± 0.05	-0.48 ± 0.12	
		94.15	14	31.35 ± 0.21	4.83 ± 0.06	1.62 ± 0.05
	15	31.24 ± 0.01	5.17 ± 0.5	0.52 ± 0.07		
	16	29.03 ± 0.01	4.91 ± 0.05	0.26 ± 0.04		
	16.5	27.56 ± 0.05	4.50 ± 0.14	0.65 ± 0.14		
	18.5	22.22 ± 0.01	3.23 ± 0.08	-0.44 ± 0.06		
	20.5	21.55 ± 0.04	3.47 ± 0.09	-0.43 ± 0.25		
	140	83.97	14	34.00 ± 0.03	5.59 ± 0.03	2.85 ± 0.05
			15	32.33 ± 0.57	5.65 ± 0.11	0.97 ± 0.07
16			30.00 ± 0.09	4.91 ± 0.01	1.02 ± 0.03	
16.5			26.55 ± 0.01	4.52 ± 0.06	0.24 ± 0.05	
18.5			25.51 ± 1.49	4.34 ± 0.03	-0.27 ± 0.06	
20.5			21.17 ± 0.00	3.25 ± 0.06	0.04 ± 0.02	
94.15			14	37.29 ± 0.02	5.47 ± 0.04	2.97 ± 0.03
15		33.53 ± 0.08	5.60 ± 0.05	2.61 ± 0.04		
16		30.28 ± 0.05	5.68 ± 0.01	0.49 ± 0.04		
16.5		28.92 ± 0.09	5.00 ± 0.009	0.81 ± 0.04		
18.5		24.55 ± 0.005	3.94 ± 0.04	-0.13 ± 0.25		
20.5		22.78 ± 0.01	3.35 ± 0.07	-0.01 ± 0.09		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación; *L* = blanco (100) a negro (0); *a* = rojo (+), verde (-); *b* = amarillo (+), azul (-)

^b Desviación estándar

El valor del parámetro *a* para el maíz azul fue de 0.42, lo que denotó un incremento en todos los extrudidos evaluados. El valor más alto del parámetro de color *a* (5.65) fue para el tratamiento con HA 15%, T 140°C e ITP 83.9 (Tabla 16).

El valor del parámetro *a* fue significativamente diferente ($P < 0.05$) para todos los contenidos de HA, es decir que a medida que este factor disminuyó, el valor de *a* incrementó. Durge et al. (2013), evaluaron los cambios de color en extrudidos adicionados con extractos de antocianinas. Estos autores indicaron que la disminución en el parámetro *a*, es una manifestación de la degradación de pigmentos por efectos térmicos durante el proceso de extrusión y una alta velocidad del tornillo, lo que presentó como consecuencia un detrimento de este parámetro en los extrudidos evaluados.

Los valores positivos y negativos de *b* indican tonalidades amarillas y azules, respectivamente. Del Pozo et al. (2006), reportaron una severa pérdida de color al nixtamalizar el maíz azul por el método tradicional a temperaturas mayores de 90°C. El pH alcalino causa la hidratación del catión flavilio e incrementa la producción de moléculas de carbinol (sin color), alcanzando el equilibrio con otro compuesto de forma abierta llamada chalcona (Fossen et al., 1998, Fossen et al., 2001). El valor del parámetro *b* para el maíz azul fue de 4.61. Todas las muestras de extrudidos mostraron una disminución en este parámetro.

A simple vista, los extrudidos elaborados con alta HA (mayores a 18.5%) presentaron una coloración morada y oscura intensa. El valor más bajo de *b* (-0.48) lo obtuvo el tratamiento elaborado con T 130°C, ITP 83.97 y HA 20.5% (Tabla 16). Los extrudidos procesados con HA menor a 16.5%, presentaron diferentes valores de *b* ($P < 0.05$), sin embargo, los extrudidos elaborados con HA mayor a 18.5%, no fueron significativamente diferentes ($P > 0.05$). A elevados contenidos de HA, el parámetro *b* se convirtió en negativo, lo que indicó cambios en las tonalidades azules de los extrudidos.

En general, se detectaron cambios en los tres parámetros de color evaluados en los extrudidos, algunos de ellos causados por el procesamiento y otros posiblemente

causados por el efecto de aditivos (en este caso, de hidróxido de calcio). Estos efectos concuerdan con lo reportado por Martínez et al. (1998), quienes evaluaron los efectos de diferentes concentraciones de hidróxido de calcio en parámetros L , a y b de extrudidos de maíz. Además, estos autores demostraron que este aditivo reacciona con los diferentes pigmentos contenidos en los extrudidos, interfiriendo con reacciones de oscurecimiento no enzimático (reacciones de Maillard). Además, concluyeron que la alta concentración de hidróxido de calcio afectó los valores de a en los extrudidos de maíz evaluados.

Índice de expansión (IE). Este parámetro, es un indicador importante en la calidad de los extrudidos en términos de funcionalidad y aceptabilidad del producto final. En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del análisis de varianza del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y la humedad de alimentación sobre el IE de los extrudidos nixtamalizados. Se observa que la T, ITP y HA presentaron un efecto muy significativo ($P < 0.01$), las interacciones (HA)(T) y (T)(ITP) presentaron un efecto significativo y muy significativo respectivamente, sobre el IE de los extrudidos producidos.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Pan et al. (1998), quienes concluyeron que los cambios físicos y químicos ocurridos durante la expansión son causados por los parámetros del proceso de extrusión como son: la temperatura del barril, humedad de alimentación, velocidad de tornillo, entre otros.

En la Tabla 18, se presentan los promedios del IE de extrudidos nixtamalizados de maíz azul elaborados con diferente T, ITP y HA. Los extrudidos procesados a T de 130°C presentaron el IE más elevado. Estos resultados difieren de los obtenidos por Maga & Liu (1993), quienes elaboraron extrudidos de maíz azul (hopi blue corn), indicando un mayor IE en extrudidos procesados a T de 140°C. Este parámetro físico disminuyó en los extrudidos a medida que incrementó la HA.

Tabla 17. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de de la T, ITP y HA sobre el índice de expansión y la densidad aparente de extrudidos nixtamalizados de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	<i>F</i>	
		IE	DA
Temperatura (T)	1	7.48** ^d	0.55ns ^b
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	8.48**	23.95**
Humedad de alimentación (HA)	4	98.45**	71.82**
(T)(ITP)	5	2.10ns	2.24ns
(HA)(ITP)	5	1.26ns	2.54*
(HA)(T)	5	2.58* ^c	8.31**
(HA)(T)(ITP)	1	7.80**	0.77ns
Error	216		
Total	238		

^a IE, índice de expansión; DA, densidad aparente; GL, grados de libertad

^b ns, no significativo (P>0.05)

^c *Significativo (P<0.05)

^d ** Muy significativo (P<0.01)

Tabla 18. Propiedades físicas de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	IE	DA (g/cm ³)	
130	83.9	14	2.54 ± 0.11 ^b	0.27 ± 0.04	
		15	2.57 ± 0.22	0.37 ± 0.03	
		16	2.30 ± 0.21	0.40 ± 0.03	
		16.5	2.13 ± 0.09	0.56 ± 0.06	
		18.5	1.83 ± 0.09	0.71 ± 0.09	
		20.5	1.65 ± 0.17	0.67 ± 0.12	
		94.1	14	2.61 ± 0.22	0.28 ± 0.04
	15	2.44 ± 0.14	0.32 ± 0.05		
	16	2.21 ± 0.17	0.40 ± 0.04		
	16.5	2.24 ± 0.17	0.39 ± 0.07		
	18.5	1.93 ± 0.17	0.65 ± 0.07		
	20.5	1.62 ± 0.12	0.69 ± 0.09		
	140	83.9	14	2.62 ± 0.16	0.39 ± 0.09
			15	2.31 ± 0.11	0.32 ± 0.06
16			2.01 ± 0.14	0.42 ± 0.05	
16.5			2.11 ± 0.17	0.42 ± 0.06	
18.5			1.73 ± 0.18	0.66 ± 0.13	
20.5			1.59 ± 0.18	0.78 ± 0.10	
94.1			14	2.64 ± 0.11	0.30 ± 0.03
15		2.41 ± 0.09	0.30 ± 0.05		
16		2.26 ± 0.17	0.37 ± 0.05		
16.5		2.26 ± 0.12	0.37 ± 0.04		
18.5		1.84 ± 0.10	0.53 ± 0.07		
20.5		1.65 ± 0.11	0.76 ± 0.17		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación; IE, índice de expansión; DA, densidad aparente

^b Desviación estándar

La producción de botanas extrudidas nixtamalizadas requiere la adición de hidróxido de calcio para el desarrollo de un sabor particular. El efecto de este aditivo en las propiedades fisicoquímicas de los extrudidos de maíz azul han sido evaluadas por Zazueta-Morales et al. (2001), demostrando que en altas concentraciones (mayores a 0.2%), se reduce significativamente el IE. Sin embargo, a bajas concentraciones (menores a 0.1%), el IE también disminuye a causa de la formación del complejo almidón-calcio, donde los iones de calcio se unen mediante cargas con los grupos hidroxilo del almidón, formando una molécula rígida. La adición de hidróxido de calcio en una alta concentración (0.3%) en los extrudidos elaborados en esta investigación, fue un factor que probablemente causó disminución del IE, además del efecto significativo de la HA sobre esta variable respuesta.

El efecto del ITP del maíz molido y el proceso de extrusión fue investigado por Garber et al. (1997). El maíz molido con ITP alto no absorbe agua de la misma manera que el maíz molido con ITP bajo. Este hecho cambia la viscosidad y la temperatura dentro del extrusor, afectando el IE, lo que explica el alto IE en los extrudidos elaborados con maíz de ITP 94.1. El índice de expansión más alto (2.64) lo obtuvo el extrudido elaborado con T 140°C, ITP 94.1 y HA 14% (Tabla 18).

Para producir botanas extrudidas, los granos de maíz son desgerminados para posteriormente elaborar las harinas y producir extrudidos con mayor expansión. Para mejorar el perfil nutrimental de los extrudidos elaborados en esta investigación, se molieron los granos de maíz integrales. Los lípidos contenidos en el grano de maíz azul (6.4%) pudieron haber actuado como lubricantes disminuyendo la fricción, la temperatura de procesamiento y el grado de cocimiento dentro del extrusor en las muestras producidas, lo que pudo afectar el IE en los extrudidos de maíz azul.

Densidad aparente (DA). Este parámetro es una medida comúnmente utilizada para determinar las características físicas y la calidad de muestras extrudidas. En la Tabla 17 se presenta el ANDEVA del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación sobre la DA de los extrudidos. Se observa que los factores HA e ITP, así como la interacción (HA)(T), presentaron un efecto muy

significativo ($P < 0.01$) en la DA de los extrudidos. Así mismo, la interacción (HA)(ITP) presentó un efecto significativo ($P < 0.05$) sobre la DA. Sin embargo, al igual que en el IE, la HA fue la que afectó mayormente este parámetro físico.

En la Tabla 18 se presentan los promedios obtenidos de la DA de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA. La DA fue mayor en los extrudidos elaborados con alta HA (mayor a 18.5%). A medida que la HA disminuyó, la DA también decreció en todos los tratamientos evaluados.

Lazou & Krokida (2010), determinaron la DA de botanas extrudidas producidas a partir de mezclas de maíz y lenteja. Estos investigadores, señalaron un incremento en la densidad causada por el alto contenido de humedad, y una disminución en este parámetro con relación a la temperatura. Durante la extrusión, el incremento en la temperatura disminuye la viscosidad, lo cual podría mejorar el crecimiento de la burbuja de aire dentro del material. Sin embargo, en las muestras extrudidas de maíz azul elaboradas en esta investigación, no se encontró una disminución en los valores de DA causada por una temperatura más elevada.

Con respecto al grado de molienda, el análisis estadístico indicó que los extrudidos obtenidos con maíz de ITP 94.1 presentaron una menor DA ($P < 0.05$) comparados con aquellos elaborados con maíz de ITP 83.9. Esto debido probablemente, a que la absorción de agua de los gránulos de almidón no fue uniforme por el daño provocado a este componente durante el procesamiento.

Propiedades reológicas

Viscosidad máxima (VM). Para evaluar la calidad de los productos extrudidos, la medición de la viscosidad amilográfica ha sido utilizada para determinar cambios ocasionados por efecto del cocimiento, y la adición de agua en maíz molido (Almeida-Domínguez et al., 1997). En la Tabla 19 se presenta el ANDEVA del efecto de la temperatura, índice de tamaño de partícula y humedad de alimentación sobre la VM de los extrudidos.

Tabla 19. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la T, ITP y HA sobre la viscosidad máxima de extrudidos de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	<i>F</i>
Temperatura (T)	1	27.28 ^{**b}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	335.08 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	893.42 ^{**}
(T)(ITP)	5	33.27 ^{**}
(HA)(ITP)	5	64.32 ^{**}
(HA)(T)	5	258.98 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	1	48.72 ^{**}
Error	24	
Total	46	

^a GL, grados de libertad

^b *Muy significativo ($P < 0.01$)

Se observa que las interacciones de los factores presentaron efectos muy significativos ($P < 0.01$) en la viscosidad máxima (VM) de los extrudidos nixtamalizados. La interacción (HA)(T) fue el factor que presentó el mayor efecto, lo que denota una gran influencia en este parámetro evaluado.

En la Figura 28 se presenta el efecto de la HA y la T sobre la VM de los extrudidos elaborados. En lo que respecta al maíz azul sin extrudir, la viscosidad máxima en el maíz de ITP 83.9 (M1) fue significativamente menor (2,121 cP) que en el maíz de ITP 94.1 (M3, 2,230.5 cP). Sin embargo, ambos valores fueron significativamente mayores ($P < 0.05$) que los obtenidos en todos los tratamientos de extrudidos evaluados.

En general, los valores de VM en los extrudidos incrementaron en un rango de HA de 14 a 16%, sin embargo, en los tratamientos de HA 16.5% la VM disminuyó e incrementó nuevamente independientemente de la T de procesamiento. Con los datos obtenidos se realizó un ajuste con una ecuación polinomial cúbica, donde se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0.61 y 0.95, para las temperaturas de 130 y 140°C, respectivamente. Se observó que los extrudidos elaborados con HA 20.5% y 140°C, presentaron la VM más alta ($P < 0.05$) de todos los tratamientos evaluados.

De acuerdo a Carvalho et al. (2010), la viscosidad de una pasta depende de en gran medida de la gelatinización y el grado de fragmentación molecular de los gránulos de almidón. Al analizar el efecto de la HA sobre la VM, se observa que los valores más elevados (456 cP) se presentaron en los extrudidos procesados con HA de 20.5%, y los valores más bajos fueron para los extrudidos obtenidos con HA de 14% (275.6 cP) siendo estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) entre ellos. Sin embargo, no se presentó una tendencia clara para este parámetro evaluado.

Se ha demostrado que un mayor daño al almidón conlleva a la disminución de la temperatura de gelatinización y menores valores de viscosidad, el maíz molido de ITP 94.1 presentó mayor contenido de almidón dañado.

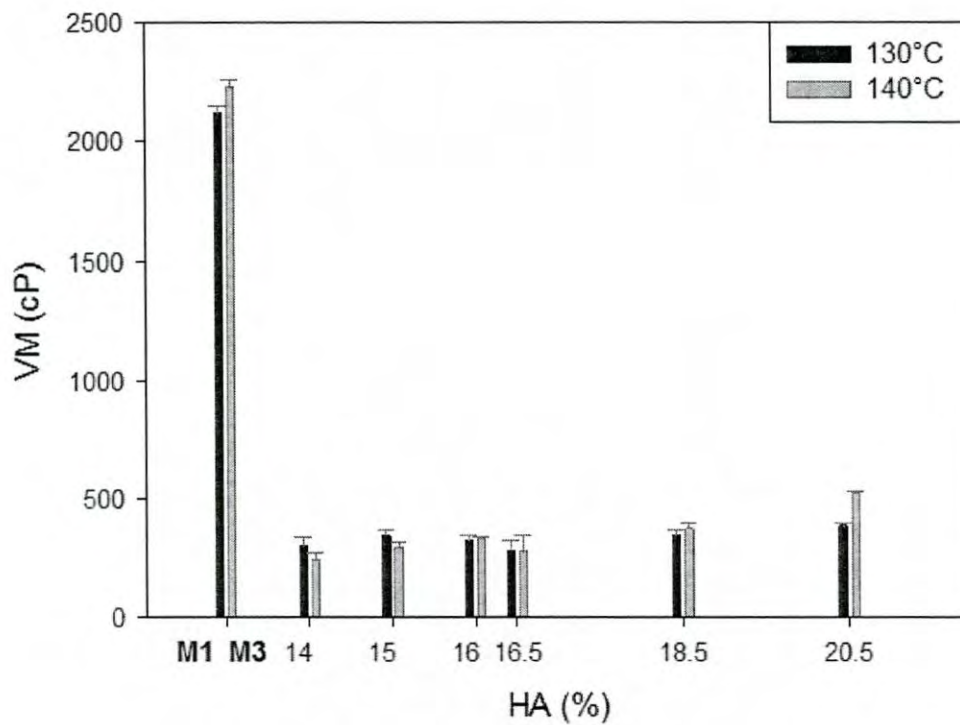


Figura 28. Efecto de HA y la T sobre la VM de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda. Las barras indican la desviación estándar.

El factor T no mostró diferencias estadísticas significativas, siendo la VM promedio de 331.8 y 341.2 cP para los extrudidos obtenidos a 130 y 140°C, respectivamente. Esto significa que el rompimiento de los gránulos de almidón, fue causado en parte por el efecto de la molienda y en mayor proporción por la fuerza de corte y presión dentro del extrusor (daño físico), y no por efecto térmico.

En la Figura 29 se presenta el efecto de la HA y el ITP sobre la VM de los extrudidos nixtamalizados. En general, la VM de los extrudidos incrementó en un rango de HA de 14 a 16%, posteriormente disminuyó en los tratamientos elaborados con HA de 16.5% y hasta 20.5%. Los datos obtenidos se ajustaron a una ecuación polinomial cúbica, obteniendo coeficientes de regresión (R^2) de 0.96 y 0.80, en la VM de extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9 y 94.1, respectivamente.

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron similares a los reportados por Chinnaswamy & Hanna (1990), quienes demostraron que la viscosidad aparente de extrudidos de almidón de maíz incrementó conforme lo hacía el contenido de humedad de los almidones de maíz acondicionados.

Los resultados obtenidos en esta investigación, sugieren que las moléculas de almidón sufren cierto grado de fragmentación durante la molienda, pero mayormente durante el proceso de extrusión donde la fuerza de corte y la razón de compresión del tornillo, degradan los gránulos de almidón, seguido de una rápida transferencia de moléculas de agua hacia el interior de los mismos. Lo anterior se asocia con el efecto del grado de molienda en los extrudidos. Se observó que los tratamientos elaborados con maíz de ITP 83.9 presentaron la VM más alta (353.08 cP) que aquellos obtenidos con maíz de ITP de 91.4 (320.08 cP).

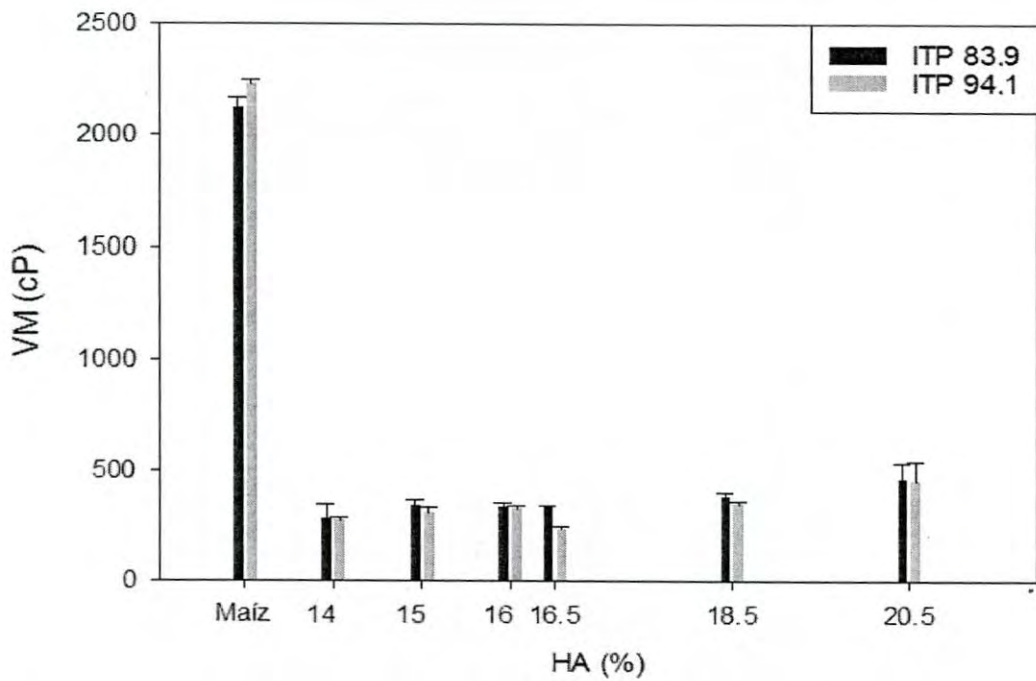


Figura 29. Efecto de la HA y el ITP sobre la VM de los extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente ITP. Las barras indican la desviación estándar.

Debido a que el proceso de extrusión se llevó a cabo utilizando bajos contenidos de humedad, se asumió que el almidón contenido en los extrudidos nixtamalizados se encontraba completamente gelatinizado, ya que las curvas obtenidas en los viscoamilogramas presentaron valores de VM muy bajos en comparación con el maíz molido sin extrudir (Figuras 30, 31, 32 y 33).

En la Figura 33, se observa una diferencia marcada en los extrudidos elaborados a 140°C, ITP 94.1 y HA de 20.5%, debido a que presentaron la VM mas alta (529 cP) de todos tratamientos. Lo anterior demuestra que el daño causado durante el procesamiento por extrusión, fue mayor que el producido durante la molienda de los granos. Al encontrarse mayor cantidad de gránulos de almidón intacto en el maíz molido sin extrudir, la viscosidad desarrollada por estos materiales fue mayor que en los sometidos a los diferentes procesamientos.

Almeida-Domínguez et al. (1997), indicaron que la pendiente formada antes de llegar al pico máximo de viscosidad (VM), depende en gran parte de la dureza del maíz analizado, es decir, que existe una correlación negativa entre la dureza del grano y la pendiente. Los maíces con endospermo suave, desarrollan curvas de viscosidad más rápidamente, con mayor pendiente y más viscosidad pico, debido a que los gránulos de almidón del endospermo suave se encuentran más disponibles para hidratarse y gelatinizar durante el análisis con el RVA, lo cual ocurre en el maíz sin extrudir de ambas moliendas.

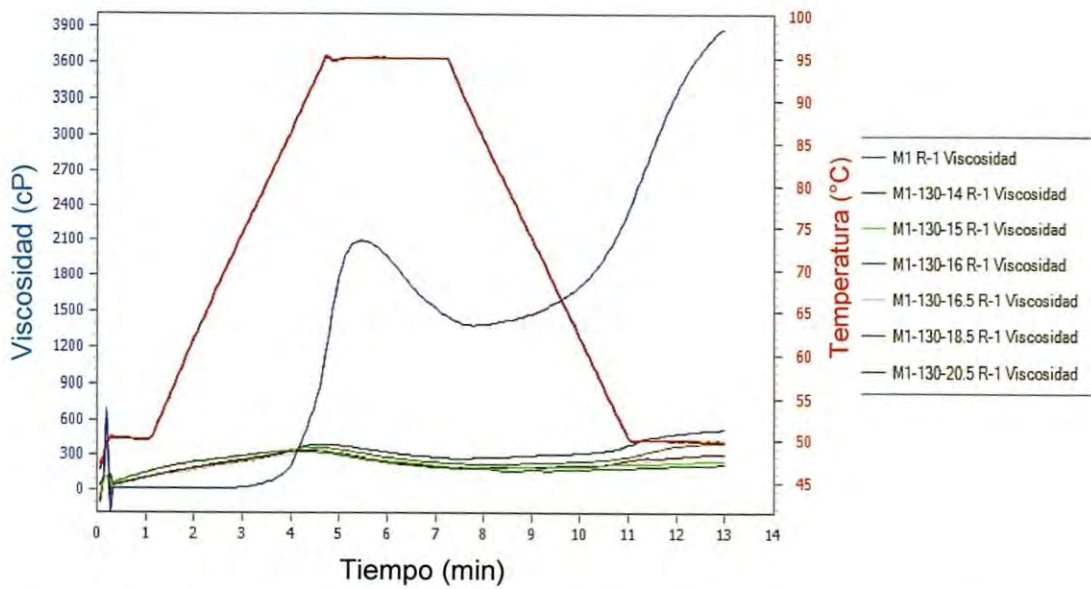


Figura 30. Curvas viscoamiliográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz de la primera molienda (M1, ITP 83.9) y 130°C.

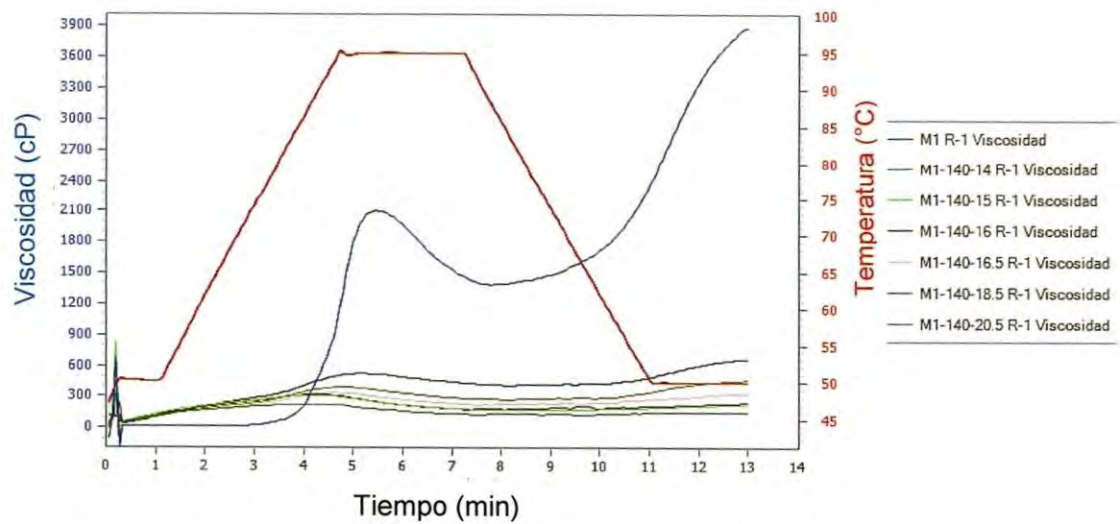


Figura 31. Curvas viscoamiliográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la primera molienda (M1, ITP 83.9) y 140°C.

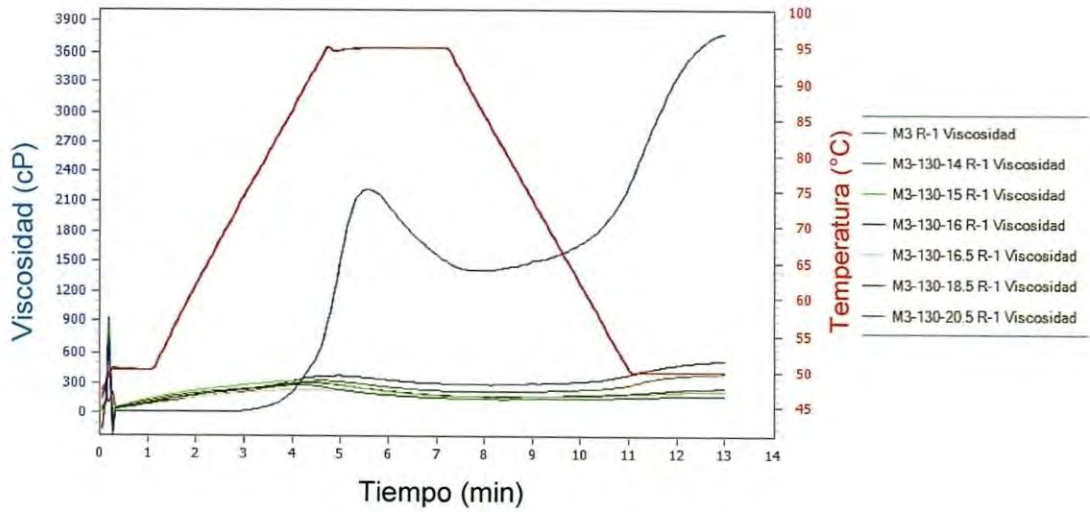


Figura 32. Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la tercera molienda (M3, ITP 94.1) y 130°C.

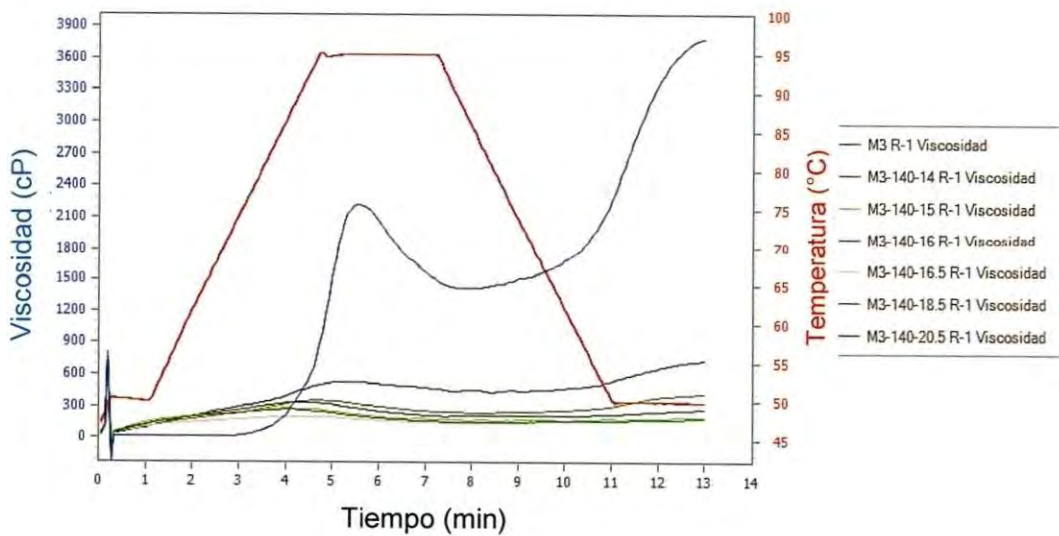


Figura 33. Curvas viscoamilográficas de los extrudidos procesados con diferente humedad de alimentación, maíz molido de la tercera molienda (M3, ITP 94.1) y 140°C.

Viscoelasticidad. La evaluación de la viscoelasticidad mediante la aplicación del método dinámico, es considerada como un parámetro predictivo para la determinación de cambios estructurales en algunos biopolímeros a escalas microscópicas. Este análisis puede ser utilizado para la optimización de procesos en función de minimizar las pérdidas en la producción y predecir la textura de los productos extrudidos (Ditudompo et al., 2013).

En la Tabla 20 se presenta el ANDEVA del efecto de la T, ITP y HA sobre los parámetros viscoelásticos (G' , G'' y $\tan \delta$) de los extrudidos nixtamalizados. Los valores de G' fueron afectados muy significativamente ($P < 0.01$) por la HA, T y la interacción (HA)(ITP).

Al analizar el efecto de la HA en la G' de los extrudidos, el valor más elevado (108,159 Pa) lo presentaron los tratamientos producidos con HA 20.5%, es decir, que presentan una contribución mayormente elástica que los extrudidos producidos con HA 14%, siendo significativamente diferentes entre ellos ($P < 0.05$). La temperatura también presentó un efecto muy significativo ($P < 0.01$), los extrudidos elaborados a 140°C presentaron valores de G' más elevados en comparación con los tratamientos obtenidos a 130°C.

El módulo elástico (G') en el maíz sin extrudir fue de 123,000 Pa para el maíz de ITP 83.9, valor estadísticamente menor ($P < 0.05$) que el obtenido en el maíz de ITP 94.1 (170,761.5 Pa) evaluado a una frecuencia de 5 rad/s (región lineal). Sin embargo, ambos valores resultan mayores al compararse con los obtenidos en los extrudidos nixtamalizados, los cuales presentaron valores estadísticamente menores en todos los tratamientos evaluados. Lo anterior indica una mayor contribución del módulo elástico en el maíz molido con ITP de 94.1.

En relación al módulo de pérdida (G'') en el maíz sin extrudir, los valores obtenidos en el maíz de ITP 83.9 e ITP de 94.1 fueron de 47,709 y 44,826 Pa respectivamente, no encontrándose diferencias estadísticas significativas entre ambas moliendas.

Tabla 20. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre los parámetros viscoelásticos de los extrudidos nixtamalizados de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	F		
		G' ^b	G''	Tan δ
Temperatura (T)	1	25.34 ^{**e}	10.98 ^{**}	88.00 ^{**}
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	4.84 ^{*d}	3.71 ^{ns^c}	454.55 ^{**}
Humedad de alimentación (HA)	4	13.29 ^{**}	3.62 [*]	247.23 ^{**}
(T)(ITP)	1	12.45 ^{**}	27.84 ^{**}	59.31 ^{**}
(HA)(ITP)	5	7.87 ^{**}	6.48 ^{**}	34.87 ^{**}
(HA)(T)	5	0.48 ^{ns}	4.29 ^{**}	63.24 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	5	0.02 ^{ns}	2.24 ^{ns}	142.55 ^{**}
Error	24			
Total	46			

^a GL, grados de libertad; G', módulo de almacenamiento; G'', módulo de pérdida; Tan δ , tangente del ángulo de fase

^b Valores a frecuencia de 5 rad/s, región lineal

^c ns, no significativo ($P > 0.5$)

^d *Significativo ($P < 0.05$)

^e **Muy significativo ($P < 0.01$)

El ANDEVA mostró un efecto muy significativo ($P < 0.01$) del factor T, así como las interacciones (HA)(ITP) y (HA)(T) sobre el módulo de pérdida (G'') en los extrudidos nixtamalizados. Al evaluar el efecto de la HA, se observó que los extrudidos elaborados con HA 20.5% presentaron los valores más altos de G'' ($P < 0.05$), que aquellos obtenidos con HA 14%. Con respecto a la temperatura, los extrudidos elaborados a 140°C presentaron los valores más altos de G'' ($P < 0.05$) al compararlos con los de 130°C .

En general, la tendencia mostró que G' fue mayor que G'' en todos los tratamientos. Se observó un efecto inversamente proporcional en los valores de G' y G'' con respecto a la HA; a medida que este factor disminuyó, el módulo de elasticidad fue menor y el módulo de pérdida incrementó. El agua adicionada para alcanzar un 50% de humedad al elaborar las masas, pudo haber actuado como hidratante de las moléculas de almidón a través de grupos hidroxilo. Lo anterior posiblemente causa la formación de una red tridimensional, incrementando así la contribución del módulo elástico (G') en los extrudidos, por lo que probablemente no se presentó el efecto plastificante esperado. Sin embargo, el incremento de G'' y la disminución de la HA indica la formación de un material más quebradizo o frágil.

Cuando los valores de $\text{Tan } \delta$ son cercanos a 0 y de acuerdo a la Ley de Hook, el material presenta un comportamiento completamente elástico. Por el contrario, cuando este valor se acerca a 1, el material demuestra un comportamiento completamente viscoso, obedeciendo la Ley de viscosidad de Newton. El ANDEVA del efecto de la T, ITP y HA sobre el $\text{Tan } \delta$ en los extrudidos elaborados se presenta en la Tabla 20. La T, ITP y HA así como de sus interacciones, presentaron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en este parámetro.

En la Figura 34 se presenta el efecto de la HA y la T, sobre los valores de $\text{Tan } \delta$ de extrudidos nixtamalizados. En relación al $\text{Tan } \delta$ del maíz sin extrudir, se observa que el maíz de ITP 94.1 se comportó como un material más elástico obteniendo un valor de 0.27, el cual fue estadísticamente menor ($P < 0.05$) que de ITP 83.9 (0.38).

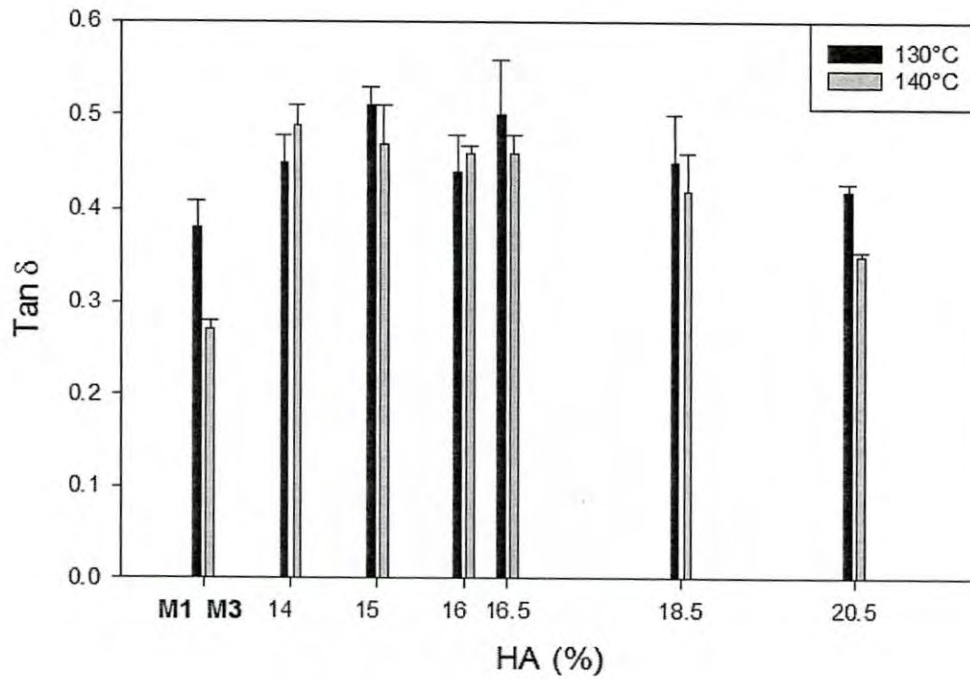


Figura 34. Efecto de la HA y la T sobre el Tan δ de los extrudidos nixtamalizados elaborados a diferente temperatura. M1, maíz de la primera molienda; M3, maíz de la tercera molienda. Las barras indican la desviación estándar.

Brouillet-Fourmann et al. (2003) señalaron que durante el proceso de molienda, el orden de empaquetamiento de la región de la amilopectina puede estar desordenado en cierta proporción, lo cual provoca una variación en la cantidad de amilosa lixiviada de los gránulos, y por lo tanto afecta las propiedades reológicas de los materiales.

En general, los valores de $\text{Tan } \delta$ disminuyeron en un rango de HA de 14 a 16%, sin embargo, en los tratamientos elaborados con HA 16.5%, el $\text{Tan } \delta$ se mantuvo y disminuyó nuevamente, independientemente de la T de procesamiento. Los datos se ajustaron con una ecuación polinomial cúbica y se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0.48 y 0.99 en los extrudidos procesados a T de 130 y 140°C.

En la Figura 35 se presenta el efecto de la HA y el ITP, sobre el $\text{Tan } \delta$ de los extrudidos nixtamalizados. Se observa que a rangos de HA entre 14 y 16.5%, el valor de $\text{Tan } \delta$, fue mayor en los extrudidos elaborados con maíz de ITP de 94.1 que en los extrudidos de ITP 83.9. Los resultados obtenidos en esta investigación difieren con lo reportado por Amir Bahrani et al. (2013), quienes señalaron que la reología de suspensiones del almidón de maíz muestra una disminución en el módulo elástico cuando las condiciones de procesamiento son muy severas. Esta condición provoca que las suspensiones pierdan su rigidez y desarrollen un comportamiento Newtoniano. La diferencia se debe probablemente, a que la masa de los extrudidos es un sistema diferente a una suspensión de almidón.

Al analizar el efecto individual del grado de molienda, los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9 obtuvieron valores menores ($P < 0.05$) de $\text{Tan } \delta$ (0.43) que aquellos que presentaron los tratamientos con maíz de ITP 94.1 (0.47). Lo anterior pudiera indicar que los extrudidos de maíz con ITP 83.9 poseen mayores componentes elásticos. Este resultado muestra evidencia de que un tratamiento más drástico (extrudidos de maíz con ITP 94.1) disminuye capacidad de la amilosa para formar geles, lo cual detrimenta la viscosidad.

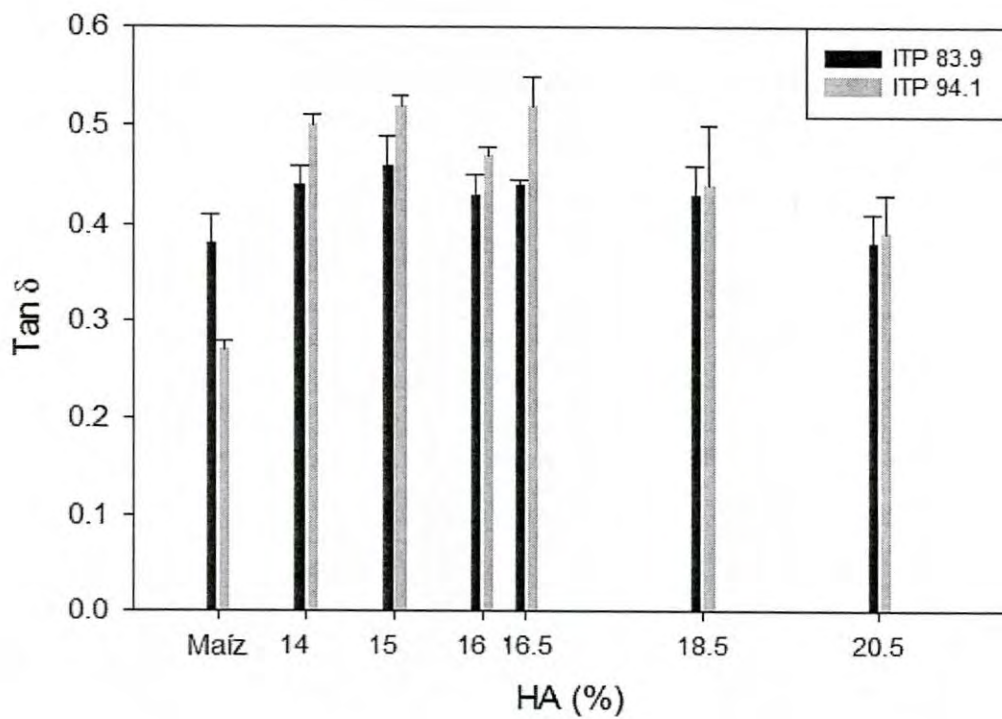


Figura 35. Efecto de la HA y la T sobre el Tan δ de los extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente ITP. Las barras indican la desviación estándar.

En general, los resultados obtenidos para las viscoelasticidad de los extrudidos fueron similares a los obtenidos por Platt-Lucero et al. (2010), indicando que las masas elaboradas de harinas de maíz integral nixtamalizadas por extrusión, mostraron una mayor contribución del módulo elástico ($\text{Tan } \delta < 0.5$).

Características morfológicas

La forma y tamaño de los gránulos de almidón cambian dependiendo del tipo de endospermo. Generalmente, en el endospermo suave se encuentran gránulos de forma redonda, esférica u ovoide. El endospermo duro se caracteriza principalmente por conformarse de gránulos de almidón de forma poligonal, tanto hexagonal como pentagonal de diversos tamaños (Narváez-González et al., 2006).

En la Figura 36 se presentan las micrografías del maíz azul con diferente ITP. Se observa que la mayor parte de los gránulos de almidón presentan una forma esférica u ovalada, lo que es característico de los maíces con endospermo suave. Asimismo, se observa la matriz de cuerpos proteicos que rodean a los gránulos de almidón.

Salinas et al. (2010), señalaron que la mayoría de los maíces azules cultivados en el Estado de México son de endospermo harinoso, lo que hace que el peso hectolítrico sea menor que el de los maíces dentados. Lo anterior concuerda con los valores obtenidos para este parámetro físico en el maíz utilizado en esta investigación. Además, esta característica en los gránulos de almidón le confiere a este tipo de grano una mayor absorción de agua, lo que afectó las propiedades reológicas y de textura de los productos obtenidos. En la Figura 37 se presentan las micrografías de los extrudidos elaborados con maíz de ITP 83.9, 130°C y HA 14, 16 y 20.5%.

En las tres micrografías no se logra observar gránulos de almidón intactos, lo que demuestra la severidad de las condiciones del procesamiento, dando lugar a la completa destrucción de los mismos, principalmente en los tratamientos con HA de 14%. Este efecto se presentó en todos los extrudidos elaborados a pesar de las diferencias en los factores de procesamiento.

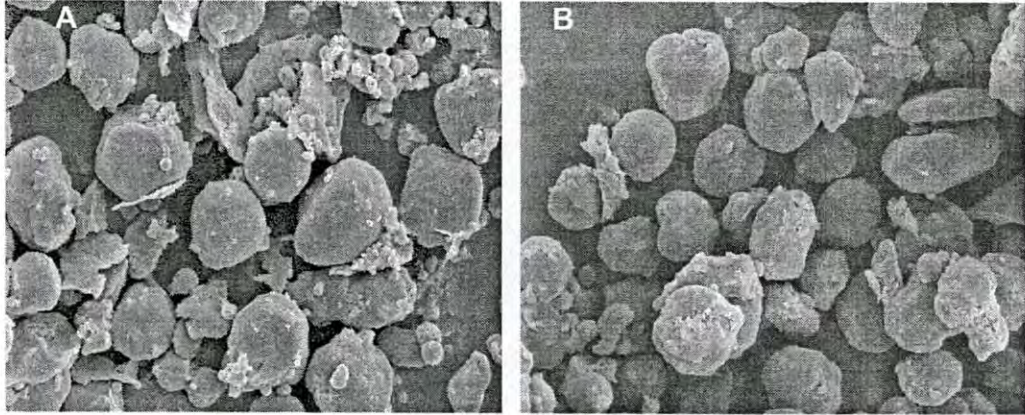


Figura 36. Micrografías de maíz azul (1,500 x) de: (A) ITP 83.9; y (B) ITP 94.1.

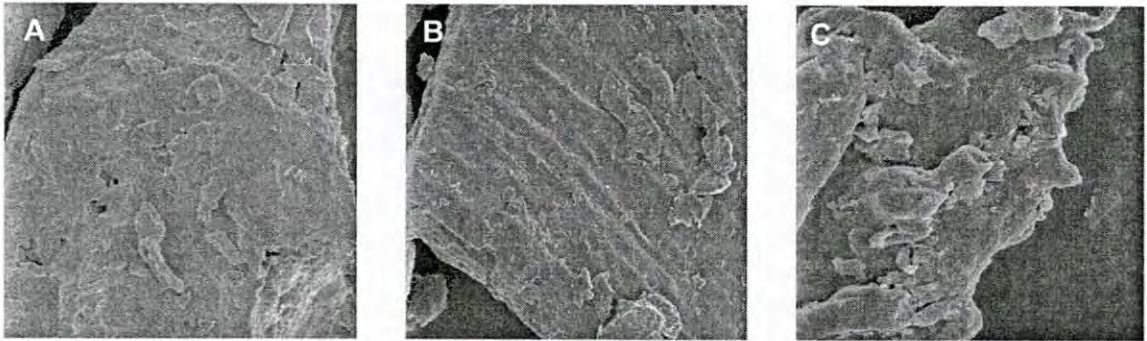


Figura 37. Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 83.9, temperatura final del extrusor de 130°C y HA de: (A) 14; (B) 16; y (C) 20.5%.

En la Figura 38 se presentan las micrografías de los extrudidos obtenidos con maíz de ITP 83.9, a 140°C y HA de 14 y 20.5%. Se observaron gránulos de almidón colapsados totalmente (amorfos), sin sus estructuras esféricas u ovaladas originales. Lo anterior, fue debido a que al someter los gránulos de almidón a tratamientos térmicos y húmedos durante el proceso de elaboración de los extrudidos, colapsan por las condiciones de corte y calor durante su procesamiento.

En las Figuras 39 y 40 se presentan las micrografías de los extrudidos elaborados con maíz de ITP 94.1, a 130°C y 140°C, y HA 14 y 20.5%. Al igual que en los tratamientos anteriores, se observa una completa fusión de los gránulos de almidón. Se presentó la misma tendencia que para los otros tratamientos evaluados, sin gránulos de almidón nativo en las muestras y una mayor densidad (compactación) en los extrudidos elaborados con HA 20.5%.

La extrusión del almidón es un método de modificación física que involucra la aplicación de calor y esfuerzo de corte. Este tipo de procesamiento causa cambios en su morfología y estructura molecular dependiendo de varios factores como contenido de humedad, temperatura de cocción y energía mecánica aplicada. La conversión del almidón como la gelatinización, fusión o degradación tiene una influencia directa en la textura del producto final.

Para la producción de botanas se requiere que haya cierto grado de almidón degradado para la expansión y una parte de almidón nativo para soportar la formación de burbujas (Zeng et al., 2011). Según los resultados obtenidos de las micrografías se observó que no hubo indicativo de la presencia de gránulos de almidón nativo, por lo que este hecho pudo haber afectado la expansión de los productos obtenidos.

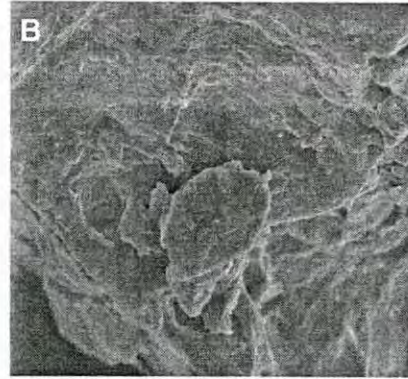
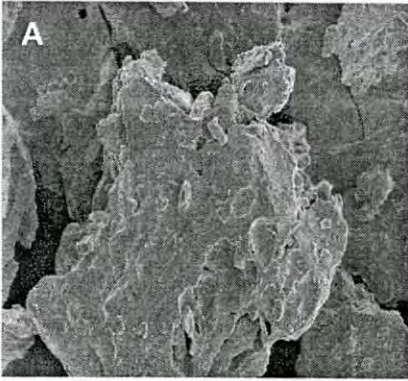


Figura 38. Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 83.9, temperatura final del extrusor de 140°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.

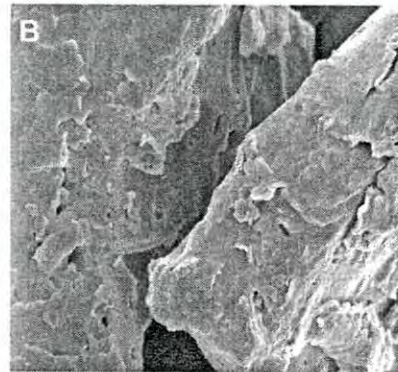
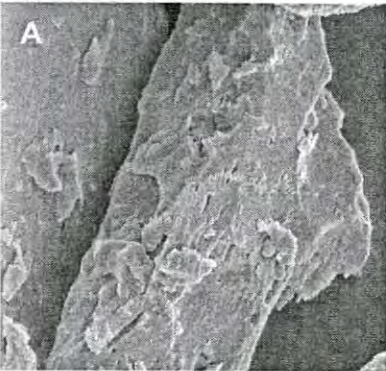


Figura 39. Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 94.1, temperatura final del extrusor de 130°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.

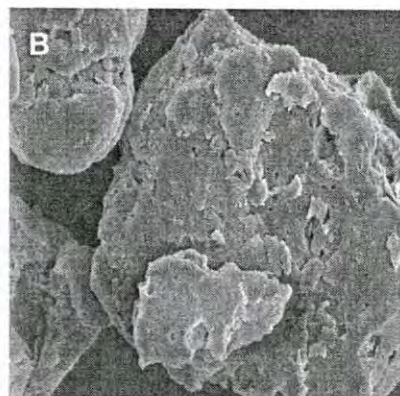
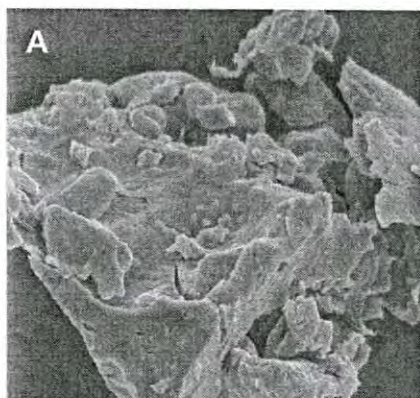


Figura 40. Micrografías (350 x) de los extrudidos nixtamalizados elaborados con maíz de ITP 94.1, temperatura final del extrusor de 140°C y HA de: (A) 14; y (B) 20.5%.

Propiedades térmicas

El almidón de maíz de diferentes variedades presenta modificaciones significativas en sus propiedades térmicas, antes y después de ser sometidos a un proceso térmico (cocción). El contenido de humedad, el tiempo de exposición y la temperatura, afectan principalmente la gelatinización y la dispersión del almidón durante su procesamiento (Whalen et al., 1997). La temperatura de gelatinización ocurre en un rango pequeño en la que los gránulos de almidón comienzan a hincharse (absorber agua), pierden su cristalinidad e incrementan la viscosidad de la solución.

En las fracciones de maíz azul sin extrudir de ITP 83.9 y 94.1, se presentó una temperatura inicial de gelatinización (T_i) de 59.99 ± 2.14 y $59.88 \pm 2.91^\circ\text{C}$; temperatura pico (T_p) de 65.35 ± 0.07 y $64.97 \pm 0.57^\circ\text{C}$; y temperatura final (T_f) de 69.41 y 69.53°C , respectivamente. No se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) en ninguna de las temperaturas evaluadas. Lo anterior significa que el proceso de molienda no afectó este parámetro.

Sin embargo, al comparar estos valores con los obtenidos por Singh & Singh (2007) en almidones de diferentes variedades de maíz, se encontró que las T_i , T_p y T_f del maíz con diferente molienda evaluado en esta investigación, fueron menores que las reportadas por estos autores, las cuales presentaron una T_i entre 65.6 y 69.0°C , T_p en un rango de 79.9 y 79.7°C , y T_f de 75.1 y 79.7°C . Lo anterior puede deberse a que las muestras de maíz de este estudio provienen de grano integral, provocando que otros componentes como pericarpio (fibra dietaria) y germen (ácidos grasos) presentaran cierto efecto las temperaturas de gelatinización.

En lo que respecta al entalpía de gelatinización (ΔH_{gel}), los valores para el maíz sin extrudir de ITP 83.9 y 94.1 fueron de 2.72 ± 1.14 y 2.28 ± 1.81 J/g respectivamente, tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas. La misma tendencia se presentó en los valores de ΔH_{gel} , siendo menores los valores en las muestras de maíz azul que en los almidones de maíz evaluados por Singh & Singh (2007).

En los termogramas obtenidos del maíz sin extrudir de ITP 83.9 y 94.1, se observó un evento endotérmico similar en ambas muestras como lo demostró el análisis estadístico. Sin embargo, no se detectaron eventos térmicos en ninguno de los extrudidos analizados. Esto concuerda con los resultados obtenidos de las propiedades morfológicas, donde se observó que no existen gránulos de almidón intactos en los tratamientos evaluados, si no que prácticamente son degradados en su totalidad.

Análisis de textura

Esfuerzo de corte máximo (ECM). Los parámetros de textura de botanas extrudidas son afectados principalmente por la humedad de alimentación, índice de expansión y otros factores de los ingredientes en los materiales antes del procesamiento (Anton & Luciano, 2007).

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos del ANDEVA del efecto de la T, ITP y HA sobre el esfuerzo de corte máximo de los extrudidos nixtamalizados. Se observa que los factores de procesamiento HA e ITP, así como las interacciones (HA)(T) y (HA)(ITP) presentaron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en el ECM. Sin embargo, el mayor efecto individual lo presentó la HA.

En la Tabla 22 se presentan los promedios del ECM de extrudidos nixtamalizados de maíz azul, elaborados con diferente T, ITP y HA. Los extrudidos elaborados con HA menores a 16%, presentaron valores similares de ECM. El efecto contrario ocurrió por el ITP, presentándose un incremento en el ECM de los extrudidos elaborados con maíz de ITP 94.1. Para la interacción (HA)(ITP), los extrudidos elaborados con maíz de ITP 94.1 y HA mayores a 16.5%, obtuvieron el ECM más alto que los elaborados con maíz de ITP 83.9.

Tabla 21. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la T, ITP y HA sobre el esfuerzo de corte máximo de extrudidos nixtamalizados de maíz azul.

Fuente de variación	GL ^a	F
Temperatura (T)	1	1.57ns ^b
Índice de tamaño de partícula (ITP)	1	15.14 ^{**c}
Humedad de alimentación (HA)	4	94.17 ^{**}
(T)(ITP)	1	0.51ns
(HA)(T)	5	5.07 ^{**}
(HA)(ITP)	5	3.21 ^{**}
(HA)(T)(ITP)	5	1.71ns
Error	168	
Total	190	

^a GL, grados de libertad

^b ns, no significativo ($P > 0.05$)

^c ^{**}Muy significativo ($P < 0.01$)

Tabla 22. Esfuerzo de corte máximo de extrudidos nixtamalizados elaborados con diferente T, ITP y HA.

T ^a (°C)	ITP	HA (%)	ECM (kPa)	
130	83.97	14	3.45 ± 0.81 ^b	
		15	4.91 ± 0.73	
		16	6.16 ± 1.43	
		16.5	10.69 ± 3.13	
		18.5	20.51 ± 3.48	
		20.5	20.94 ± 7.68	
		94.15	14	2.83 ± 0.64
	15	4.04 ± 0.71		
	16	6.85 ± 1.68		
	16.5	5.57 ± 0.74		
	18.5	14.61 ± 8.00		
	20.5	22.58 ± 4.03		
	140	83.97	14	5.30 ± 0.63
			15	5.48 ± 1.43
16			5.83 ± 2.19	
16.5			6.21 ± 1.99	
18.5			19.98 ± 6.04	
20.5			30.18 ± 8.13	
94.15			14	4.24 ± 0.62
15		4.53 ± 1.35		
16		5.52 ± 1.45		
16.5		5.39 ± 1.57		
18.5		13.13 ± 2.59		
20.5		25.37 ± 5.75		

^a T, temperatura final del extrusor; ITP, índice de tamaño de partícula; HA, humedad de alimentación; ECM, esfuerzo de corte máximo

^b Desviación estándar

Por otra parte, la adición de hidróxido de calcio (0.3%) pudo haber presentado un efecto en el ECM de los extrudidos nixtamalizados. Zazueta et al. (2001) concluyeron que altas concentraciones de este aditivo (mayores a 0.1%), producen un incremento en el área bajo la curva de esfuerzo-deformación durante la evaluación de extrudidos de maíz azul, lo que se traduce como un mayor requerimiento de fuerza para cortar los mismos.

Agbisit et al. (2007), evaluaron las propiedades mecánicas de extrudidos de almidón de maíz. En las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de los extrudidos analizados por compresión, se presentó un efecto lineal en los valores de esfuerzo hasta la primera fractura, seguido de una región con múltiples picos. Estos autores concluyeron que los extrudidos elaborados con HA menores a 22.7%, presentaron los valores más bajos de esfuerzo para romper el material (42 kPa).

El mismo comportamiento se encontró en las curvas fuerza-distancia de los extrudidos nixtamalizados de esta investigación. Sin embargo, los valores de obtenidos ECM fueron menores que los obtenidos por los autores antes citados. Esta variación en los valores se atribuyó a las diferentes condiciones de procesamiento y la materia prima utilizada, además de la heterogeneidad de las muestras analizadas.

En general, al incrementar la HA los valores de ECM en los extrudidos también aumentó. Lo anterior pudo deberse a que la incorporación de fibra dietaria en los productos extrudidos reduce significativamente el volumen de expansión e incrementa la densidad de los extrudidos, lo que ocasiona texturas con mayor dureza (Robin et al. 2012).

Optimización de las Condiciones de Procesamiento para la Obtención de Extrudidos

Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de humedad (H)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el contenido de humedad de los extrudidos nixtamalizados se presenta en la Tabla 23.

La HA en su término lineal, fue el factor que presentó un efecto altamente significativo ($P < 0.0001$) sobre el contenido de humedad de los extrudidos. Los términos cuadráticos HA^2 y T^2 mostraron un efecto significativo ($P < 0.0152$) y altamente significativo ($P < 0.0001$), respectivamente. Al igual que en la primera parte de la investigación, la HA fue el factor que presentó el mayor efecto en este parámetro evaluado.

Ajuste del modelo de predicción:

$$H = -160.23 + 3.57(HA) + 2.07(T) + 0.009(HA)(T) - 0.11(HA)^2 - 0.008(T)^2 \quad (10)$$

En el modelo analizado se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.89. En la Tabla 24, se presentan los promedios de contenido de humedad de los extrudidos, los cuales se encontraron en el rango de 8.51 a 14.77%. Se observó una tendencia similar a la reportada en la primera parte de la investigación, donde se comprueba que a medida que la HA incrementa también lo hace el contenido de humedad de los extrudidos.

Tabla 23. Coeficientes de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción), análisis de varianza y coeficientes de determinación, mostrando la relación entre los factores de procesamiento y las propiedades químicas de los extrudidos.

Coeficientes	H ^a	pH	AT	C3G	C3,5diG	Pel3G
Intercepto						
β	13.45	6.85	147.63	27.78	16.93	1.63
Lineal						
β_1	1.51***	0.021ns ^b	5.55ns	0.28* ^c	0.16*** ^e	-0.018ns
β_2	-0.33ns	-0.0009ns	1.93ns	0.13ns	-0.003ns	0.029ns
β_3	0.050ns	-0.013ns	0.39ns	0.042ns	0.50ns	-0.003ns
Cuadrático						
β_{11}	-0.66*** ^d	-0.008ns	2.86ns	-0.16ns	-0.11**	-0.002ns
β_{22}	-1.29***	-0.035ns	7.39*	-0.24*	-0.10*	-0.002ns
β_{33}	-0.40ns	-0.001ns	2.05ns	0.061ns	0.020ns	0.049*
Interacciones						
β_{12}	0.27ns	-0.006ns	-4.94ns	0.070ns	0.026ns	-0.005ns
β_{13}	0.25ns	0.0003ns	3.26ns	0.098ns	0.042ns	0.013ns
β_{23}	-0.005ns	0.020ns	-1.66ns	0.006ns	-0.001ns	-0.009ns
R^2	0.89	0.17	0.44	0.61	0.69	0.41

^a H, contenido de humedad; AT, antocianinas totales; C3G, cianidina 3-glucósido; C3,5diG, cianidina 3,5 diglucósido; Pel3G, pelargonidina 3 glucósido; β_1 , humedad de alimentación; β_2 , temperatura final del extrusor; β_3 , concentración de hidróxido de calcio

^b ns, no significativo (P>0.1)

^c*Significativo (P<0.1)

^d**Muy significativo (P<0.05)

^e***Altamente significativo (P<0.01)

Tabla 24. Diseño experimental para el proceso de extrusión mostrando las diferentes combinaciones de HA, T y CHC, y el promedio obtenido para cada una de las propiedades químicas evaluadas en los extrudidos expandidos nixtamalizados.

Tx ^a	HA	T	CHC	H (%)	pH	AT	C3diG	C3G	Pei3G
	(%)	(°C)	(%)				(mg/kg)		
Factores de procesamiento				Variables respuesta					
X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	
1	19 (0) ^b	130 (0)	0.13 (0)	13.68	6.8	150.7	17.0	28.1	1.63
2	15 (-1.682)	130 (0)	0.13 (0)	10.01	6.8	141.1	16.5	27.2	1.71
3	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	14.00	6.8	154.7	17.1	28.2	1.72
4	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	13.33	6.8	130.4	17.1	27.6	1.66
5	21.38 (1)	141.89 (1)	0.2 (1)	12.35	6.9	174	17.0	28.1	1.73
6	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	13.22	6.9	153.8	17.0	28.2	1.76
7	19 (0)	130 (0)	0.25 (1.682)	13.19	6.7	143.5	17.3	28.4	1.75
8	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)	11.92	6.8	165.5	16.9	27.4	1.59
9	19 (0)	130 (0)	0 (-1.682)	13.10	7.1	142.6	16.7	27.8	1.78
10	21.38 (1)	141.89 (1)	0.05 (-1)	11.64	6.7	176.9	16.9	28.0	1.72
11	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.05 (-1)	8.51	6.7	170.8	16.6	27.3	1.70
12	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.2 (1)	9.44	6.8	144.5	16.4	26.7	1.64
13	23 (1.682)	130 (0)	0.13 (0)	14.77	7.0	149.5	16.8	27.6	1.53
14	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.2 (1)	12.46	6.8	183.4	16.9	27.5	1.69
15	19 (0)	110 (-1.682)	0.13 (0)	11.09	6.8	163.3	16.7	27.2	1.61
16	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.2 (1)	8.09	6.8	169.1	16.4	27.0	1.70
17	19 (0)	150 (1.682)	0.13 (0)	10.18	6.8	153	16.6	27.2	1.67
18	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)	9.74	6.7	153.8	16.6	27.0	1.64
19	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	13.07	6.9	142.3	16.7	27.3	1.53
20	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	13.1	6.9	157.4	16.7	27.3	1.47

^a Tx, tratamiento; HA, humedad de alimentación; T, temperatura; CHC, concentración de hidróxido de calcio; H, humedad; AT, antocianinas totales; C3diG, cianidina 3-diglicósido; C3G, cianidina 3-glucósido; Pei3G, pelargonidina 3-glucósido

^b Los números en paréntesis corresponden a los valores codificados

En la Figura 41A se presenta el efecto de la HA y la T sobre el contenido de humedad de los extrudidos. Se observa que los tratamientos elaborados con HA elevada y a 130°C presentan los mayores contenidos de humedad. Como era de esperarse, los extrudidos elaborados con alta HA y T, perdieron mayor cantidad de humedad. La evaporación del agua al momento en que el producto emerge del dado, provoca una pérdida proporcional de humedad de 11 hasta 43% en comparación con la HA de la mezcla original. Se ha reportado que después de que el extrudido es liberado del dado y alcanza su máxima expansión, el producto comienza a contraerse. La caída drástica de la temperatura incrementa la viscosidad, causando la evaporación de 8-10 g de humedad/ por 100 g de fluido (Guy, 2001). En las Figuras 41B y 41C se observa que la CHC no presentó efecto significativo.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el pH

En la Tabla 23 se presentan los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el pH de extrudidos nixtamalizados. La evaluación de las diferentes concentraciones de este aditivo, tuvo la finalidad de evitar una mayor degradación de antocianinas en los extrudidos obtenidos, de acuerdo a los resultados obtenidos en la primera etapa de la investigación. Sin embargo, no se presentaron efectos significativos ($P > 0.1$) de los factores de procesamiento estudiados sobre el pH de los extrudidos.

En la Tabla 24 se presentan los promedios obtenidos para el pH de los extrudidos, los cuales se encontraron en el rango de 6.7 a 7.1. La pequeña variación en este parámetro, se debe posiblemente a que las CHC utilizadas en este trabajo fueron mínimas. Durante la etapa de acondicionamiento, fue difícil una incorporación totalmente homogénea del hidróxido de calcio, lo que tuvo como consecuencia la obtención de extrudidos heterogéneos. Los valores se encuentran cercanos a los reportados para harinas nixtamalizadas elaboradas por un sistema de extrusión de bajo esfuerzo de corte y utilizando concentraciones de hidróxido de calcio de entre 0.05 y 0.20%, que fueron de 6.88 hasta 7.48 (Mercado et al., 2013).

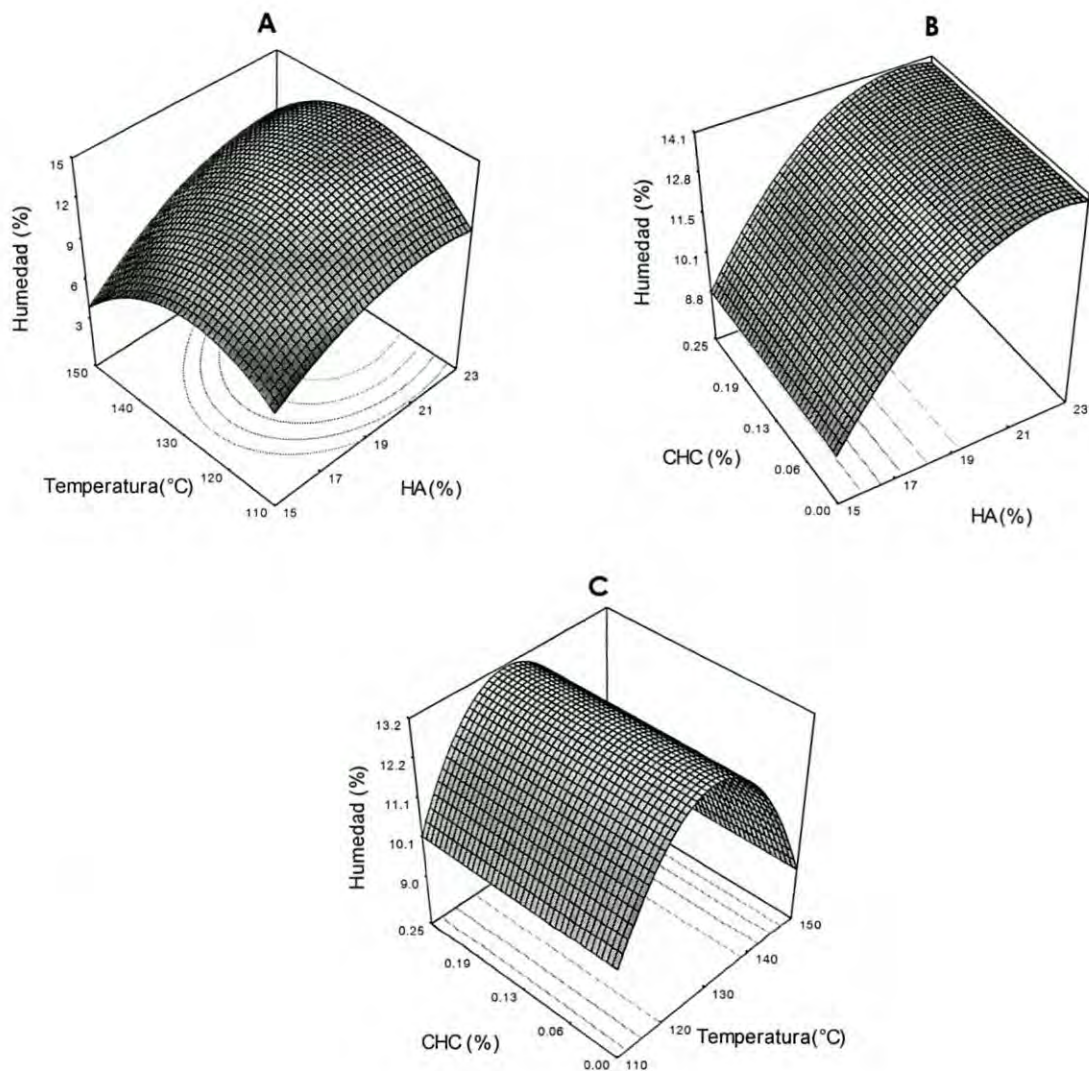


Figura 41. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de humedad en los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de antocianinas totales (AT)

En la Tabla 23 se presentan los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el contenido de antocianinas totales de los extrudidos nixtamalizados. Se observa que la temperatura en su término cuadrático (T^2), fue el único factor de procesamiento que presentó un efecto muy significativo ($P < 0.0459$) sobre los valores de AT de los extrudidos elaborados.

Ajuste del modelo de predicción:

$$AT = 960.61 + 0.049(T)^2 \quad (11)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.44. En la Tabla 24, se presentan los valores promedio de AT obtenidos en los extrudidos analizados, encontrándose en el rango de 130.4 a 183.4 mg/kg. Se observa una retención en el contenido de AT correspondientes a 27.63 y 38.86% en los extrudidos expandidos, en relación a las AT del grano de maíz azul sin extrudir (471.84 mg/kg).

Los valores obtenidos en esta investigación, fueron menores que los obtenidos por Sánchez-Madrugal et al. (2014) en harinas de maíz azul nixtamalizadas por extrusión. Sin embargo estos autores, utilizaron condiciones de menor temperatura durante el procesamiento, lo cual coincide con el efecto significativo de la T de extrusión.

Sin embargo, el contenido de AT de los extrudidos de esta investigación fue mayor que los obtenidos por Camacho-Hernández et al. (2014) en extrudidos de mezclas de maíz azul integral y almidón que fueron expandidos por microondas. Estos autores utilizaron temperaturas de cañón de 98.8 a 141.2°C y HA de 19 a 34%, encontrando contenidos de AT de 41.16 y 82.3 mg/kg.

En la Figura 42A se muestra el efecto de la HA y la T sobre los valores de AT de los extrudidos expandidos nixtamalizados.

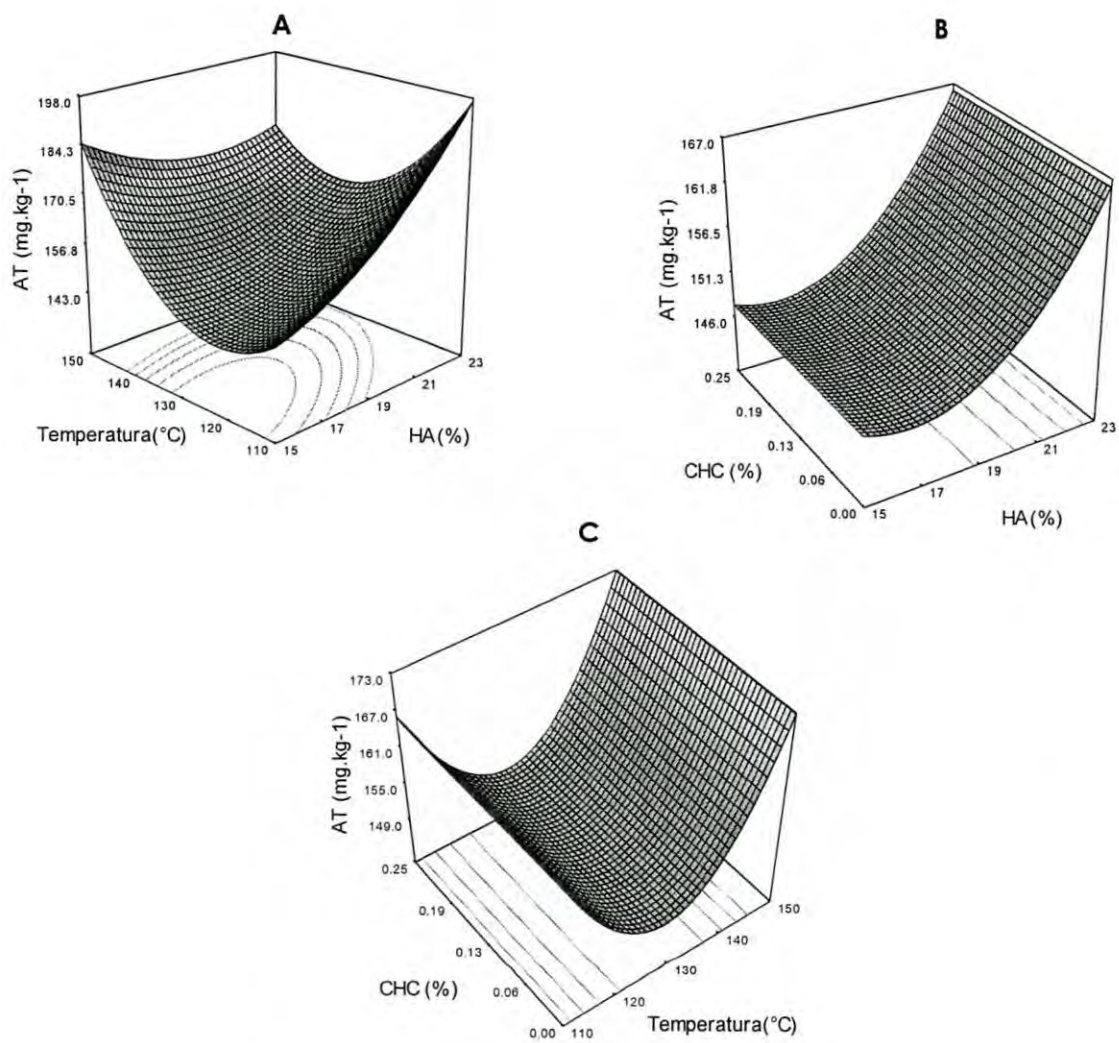


Figura 42. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de antocianinas totales (AT) de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Se observa que a HA entre 15-17% y T entre 100-130°C, las AT presentan los valores más bajos de todos los tratamientos de extrudidos evaluados. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Bridle & Timberlake (1997), quienes encontraron que la temperatura presenta un efecto notable en la estructura de las antocianinas. Cuando este factor incrementa, las antocianinas pierden su color original y se tornan transparentes debido al equilibrio entre las especies que se transforman en otras formas químicas, como bases carbinol y chalconas.

Las antocianinas purificadas se degradan a mayor velocidad cuando se comparan con antocianinas contenidas en extractos no purificados de ciertos materiales alimenticios (Nayak et al., 2011a). Sin embargo, se ha reportado que existen varios factores que intervienen en la estabilidad de estos compuestos, como son la exposición a la luz, procedimientos de extracción y sustituyentes glucosilados, los cuales pudieron afectar la medición del contenido de AT en los extrudidos analizados.

Los resultados obtenidos en esta investigación del efecto de la T y HA en el contenido total de antocianinas, coinciden con los de un estudio conducido por Hirth et al. (2014), quienes cuantificaron estos compuestos en alimentos extrudidos a base de almidón de maíz adicionados con extractos de antocianinas de arándano, demostrando que la HA y la T, además de la velocidad de tornillo y la velocidad de flujo presentan un efecto significativo en las AT. Se concluyó que la extrusión ofrece una alternativa para la elaboración de productos con alto contenido de antocianinas, ajustando la retención de estos compuestos mediante la modificación de las condiciones utilizadas.

En la Figura 42B se presenta el efecto de la HA y la CHC sobre el contenido de AT de los extrudidos expandidos. Se presentó un incremento en los valores de AT conforme la HA aumentó, independientemente de la CHC. En lo que respecta a efecto de la T y CHC (Figura 42C), se observa en la parte central de la gráfica que el contenido de AT es menor en los extrudidos elaborados a 130°C, independiente de la CHC. Además, a la temperatura más alta evaluada (150°C) en esta investigación, el

contenido de AT fue mayor independientemente de la CHC utilizada. Lo anterior indicó cierta estabilidad de las antocianinas ante altas temperaturas de procesamiento, mostrando una resistencia a la degradación térmica y no por efecto del pH en el medio, lo que resulta benéfico para la obtención de este tipo de productos.

A pesar de la pérdida parcial de antocianinas en los extrudidos nixtamalizados, la extrusión probablemente no afectó en gran medida la actividad antioxidante de algunos tratamientos elaborados. Lo anterior se pudiera sustentar en lo descrito por Ragae et al. (2014), quienes concluyeron que durante la extrusión de granos integrales como el maíz a elevadas temperaturas, se liberan de la pared celular compuestos fenólicos y sus derivados, los cuales son convertidos de una forma química a otra contribuyendo al incremento en el potencial antioxidante de los productos.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de cianidina 3-glucósido (C3G)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio se presenta en la Tabla 23. La HA muestra un efecto muy significativo en su término lineal ($P < 0.0139$) y significativo ($P < 0.0969$) en su término cuadrático. La temperatura en su término cuadrático (T^2), presenta un efecto muy significativo ($P < 0.0195$) en los valores de C3G.

Ajuste del modelo de predicción:

$$C3G = -16.56 + 1.25(HA) - 0.029(HA)^2 - 0.001(T)^2 \quad (12)$$

El modelo analizado obtuvo un coeficiente de determinación de 0.61. En la Tabla 24 se presentan los valores promedio para este parámetro, encontrándose en el rango de 26.7 a 28.4 mg/kg. Al evaluar la retención de la C3G en los extrudidos elaborados, se encontró que existe una mínima pérdida de esta antocianina, debido a que los tratamientos evaluados retuvieron entre el 77.1 y 82%, con respecto al contenido de C3G (34.60 mg/kg) en el maíz azul sin extrudir.

En la Figura 43A se presenta el efecto de la HA y la T sobre el contenido de C3G en los extrudidos expandidos. Al incrementar la HA y a temperaturas mayores de 130°C, esta antocianina alcanzó su máxima concentración. A pesar de que esta interacción no mostró un efecto significativo y sólo se encontró una significancia en los términos individuales, los resultados obtenidos pudieran estar relacionados con lo reportado por Yue & Xu (2008). Estos autores concluyeron que a pesar de que las antocianinas son degradadas a temperaturas mayores a 100°C, la estabilidad térmica de estos compuestos con sustituyentes de glucosa o galactosa es mayor. Además, indicaron que se presentó una producción significativa de antocianidinas como la cianidina, delphinina y malvidina (presentes en maíces pigmentados), cuando sus correspondientes antocianinas se sometieron a calentamiento a 100°C durante 30 minutos, en condiciones de muy baja humedad.

En la Figura 43B se presenta el efecto la HA y la CHC, se observa el efecto significativo de la HA, ya que al incrementar los valores de este factor del proceso, la concentración de C3G aumentó en todos los tratamientos de extrudidos evaluados.

Se ha reportado que existe un efecto de la CHC y el pH sobre la concentración de antocianinas. Al incrementar el pH, es decir, al aumentar la alcalinidad del medio, estos compuestos son degradados o destruidos en su totalidad. Sin embargo, en los extrudidos elaborados en esta investigación, no se presentó un efecto significativo de la CHC. En la Figura 43C, se presenta el efecto de la T y la CHC, donde se observa que en el rango de T entre 130 y 140°C, el contenido de C3G en los tratamientos analizados alcanzó sus valores máximos independientemente de la CHC.

Sánchez-Madrugal et al. (2014), evaluaron el efecto de la adición de hidróxido de calcio y lactato de calcio sobre la concentración de C3G en harinas nixtamalizadas de maíz azul obtenidas por extrusión. Estos autores concluyeron, que la concentración de esta antocianina incrementó sin efecto significativo de la fuente de calcio utilizada.

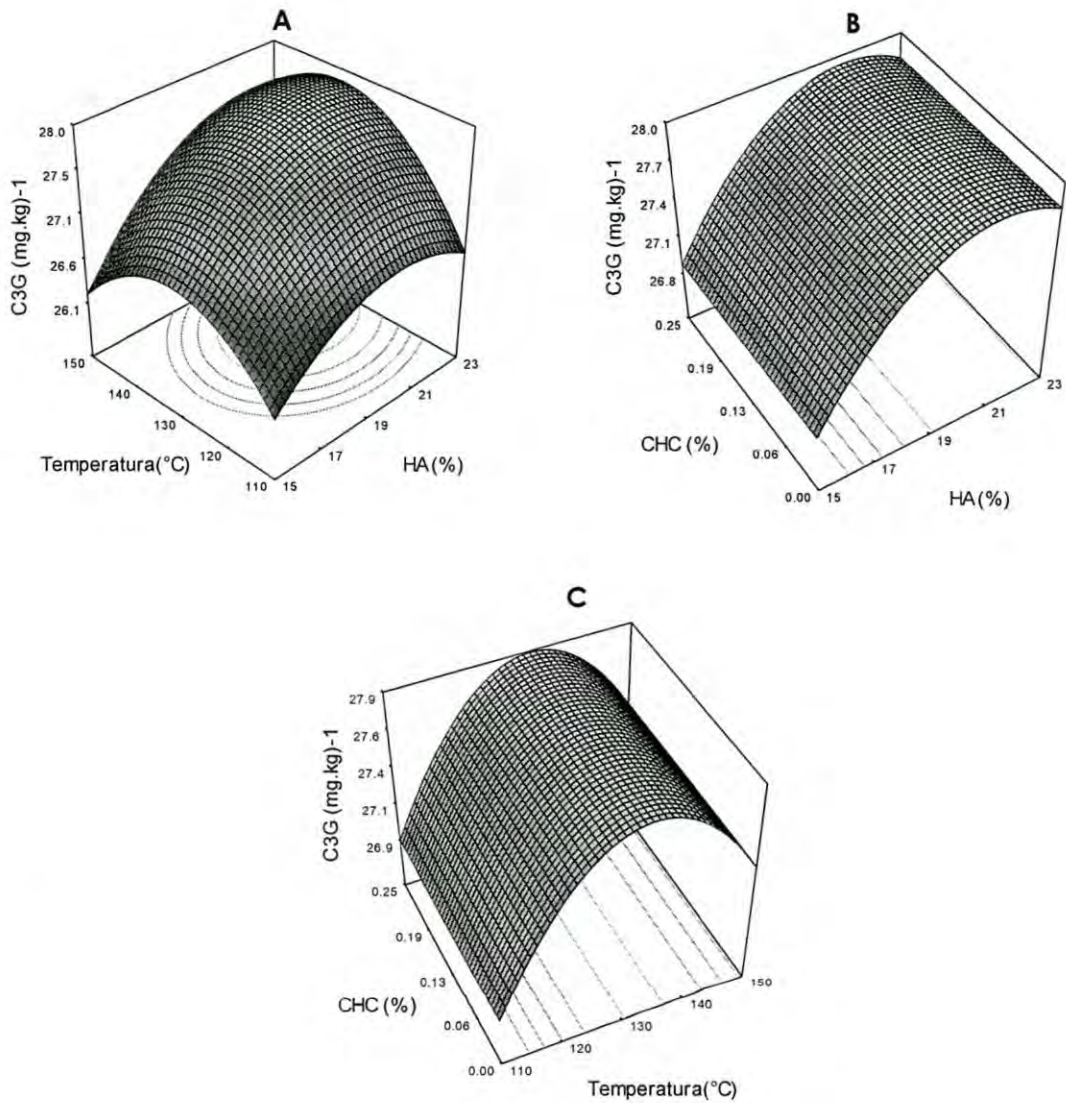


Figura 43. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de C3G de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Sin embargo, el tipo de maíz, las condiciones de extrusión y el método de cuantificación de este compuesto, difieren de los utilizados en esta investigación, por lo que probablemente no se presentó el efecto citado en la concentración de C3G en los extrudidos expandidos analizados.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de cianidina 3,5-diglucósido (C3,5diG)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el contenido de C3,5diG se presentan en la Tabla 23. Los resultados demostraron que la HA en su término lineal, presentó un efecto altamente significativo ($P < 0.0024$) y en su término cuadrático (HA^2), un efecto muy significativo ($P < 0.0220$) sobre la concentración de C3,5diG en los extrudidos expandidos. Por otro lado, la temperatura en su término cuadrático (T^2) presentó un efecto muy significativo ($P < 0.0292$) sobre esta antocianina.

Ajuste del modelo de predicción:

$$C3,5diG = -3.92 + 0.81(HA) - 0.01(HA)^2 - 0.0007(T)^2 \quad (13)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.69. En la Tabla 24, se presentan los valores promedio obtenidos de la concentración de esta antocianina específica. Los contenidos de C3,5diG variaron de 16.4 a 17.3 mg/kg. Al comparar las concentraciones de C3,5diG obtenidas en los extrudidos expandidos con las otras dos antocianinas específicas evaluadas (C3G y Pel3G), se observó que este compuesto se encontró en mayor concentración después de la C3G. Lo anterior puede deberse a que las antocianinas diglucosiladas, presentan mayor estabilidad que las monoglucosiladas, lo que disminuye la susceptibilidad a la degradación por factores como la T y la radiación UV (Escribano-Bailón et al., 2004).

Además, al evaluar la retención de la concentración de C3,5diG en los extrudidos elaborados en relación a la concentración que se obtuvo en el maíz azul (17.98 mg/kg) sin extrudir, se presentó una retención de entre 91.2 y 96.2%. Lo anterior,

denota la estabilidad de este compuesto ante las condiciones de procesamiento por extrusión evaluadas en esta investigación.

En la Figura 44A, se presenta el efecto de la HA y la T sobre la concentración de C3,5diG en los extrudidos elaborados. Se observa que en rangos de HA entre 21 y 23% y de T entre 120 y 130°C, este compuesto alcanzó su concentración máxima. Al evaluar el efecto de la HA y la CHC (Figura 44B), se observa un mayor efecto de la HA, ya que a medida que este factor de procesamiento incrementó, también aumentó la concentración de C3,5diG en los extrudidos elaborados independientemente de la CHC, tal como lo indicó el ANDEVA para el efecto individual de la HA.

Para el efecto de la T y la CHC (Figura 44C), se observa que únicamente la T presenta un efecto en el contenido de C3,5diG ya que independientemente de la CHC, los máximos valores para esta antocianina se encontraron a una T de 130°C. Al igual que la interacción anterior, no se presentó un efecto significativo de la misma, solo se observó el efecto individual de la T.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de pelargonidina 3-glucósido (Pel3G)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el contenido de Pel3G en extrudidos nixtamalizados se presenta en la Tabla 23. Los resultados demostraron que la CHC en su término cuadrático (CHC²), presentó un efecto muy significativo (P<0.0273) en la concentración de este compuesto.

Ajuste del modelo de predicción:

$$\text{Pel3G} = 1.76 - 2.15(\text{CHC}) + 8.79(\text{CHC})^2 \quad (14)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de regresión 0.41. En la Tabla 24 se presentan los valores promedio de la concentración de Pel3G en los extrudidos elaborados, los cuales se encontraron en el rango de entre 1.47 a 1.78 mg/kg.

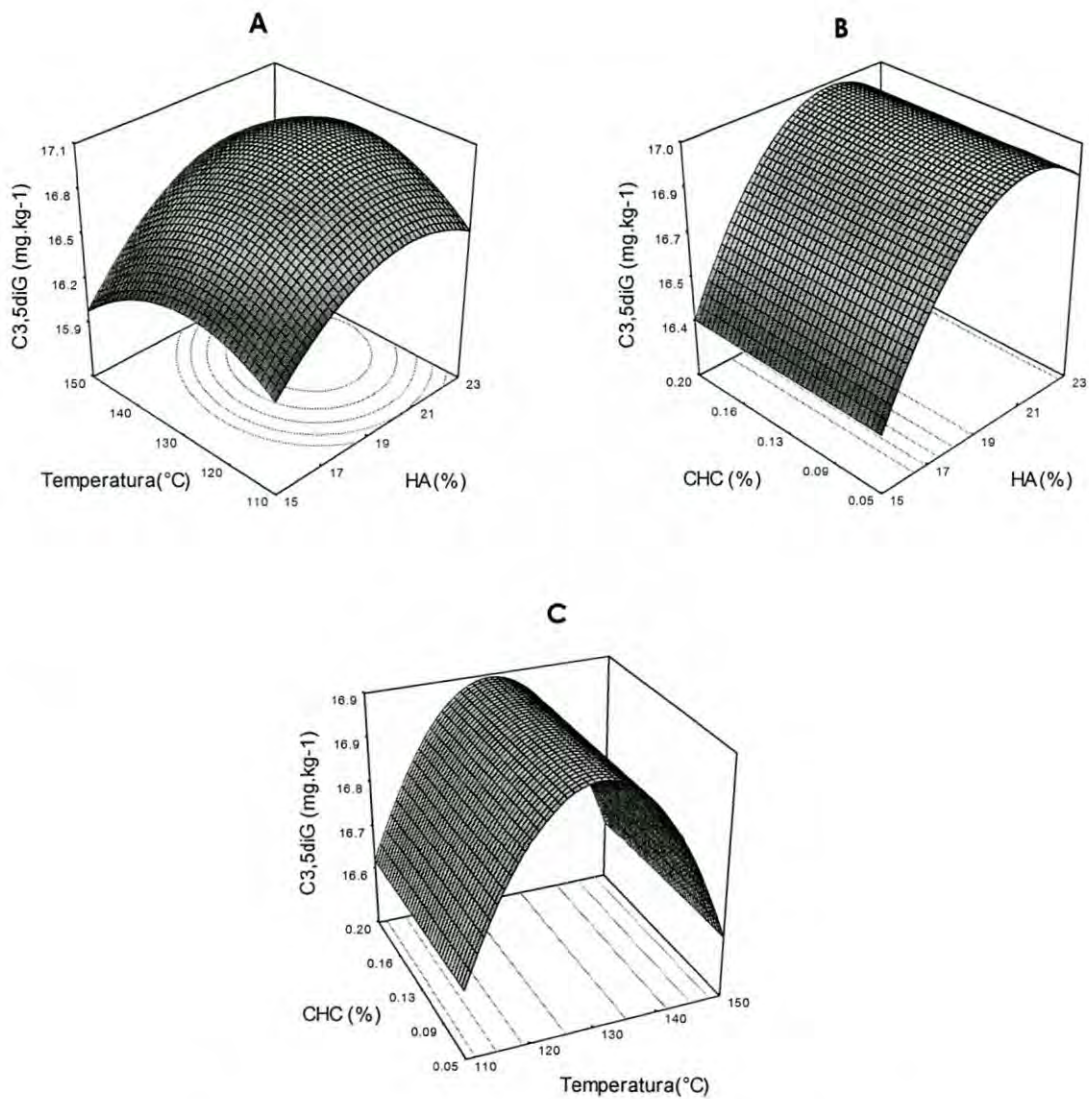


Figura 44. Gráficas de superficie y contorno del efecto la HA, T y CHC sobre el contenido de C3,5diG de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y la T; (B) HA y la CHC; y (C) T y CHC.

Al comparar estas concentraciones con la obtenida en el maíz azul sin extrudir (2.29 mg/kg), se observó que existe una retención de entre 64.1 y 77.7% de este compuesto.

El contenido de Pel3G en los extrudidos nixtamalizados de esta investigación, fue mayor que los reportados por Sánchez-Madrigal et al. (2014) en harinas nixtamalizadas por extrusión de maíz azul adicionadas con dos fuentes de calcio. Lo anterior comprueba las diferentes transformaciones químicas de estos compuestos durante el procesamiento, además de las diferencias en el perfil de antocianinas para cada variedad de maíz a pesar de poseer la misma coloración de grano. Esta antocianina específica incluso al encontrarse en mínimas concentraciones, posee una estructura química muy estable al igual que las otras antocianinas estudiadas en esta investigación.

Garzón & Wrolstad (2002), reportaron que la Pel3G presenta un efecto significativo en la disminución de la velocidad de degradación en antocianinas contenidas en ciertos productos alimenticios adicionados con este compuesto, debido a su gran estabilidad durante el procesamiento.

En la Figura 45A se presenta el efecto de la HA y la T sobre la concentración de Pel3G en los extrudidos expandidos elaborados. Se observa que las máximas concentraciones de Pel3G, se presentaron a T elevada (130°C) y a baja HA (14%). Lo anterior coincide con lo citado anteriormente respecto a la estabilidad de esta antocianina ante ciertos factores de procesamiento.

Al analizar el efecto de la HA y la CHC (Figura 45B), se observa que a CHC mínima y máxima (0 y 0.25%), la Pel3G en los extrudidos alcanzó su máxima concentración independientemente de la HA. En la Figura 45C se presenta el efecto de la T y la CHC, se observa que la Pel3G presenta una mayor degradación a CHC en un rango entre 0.05 - 0.16% y a T de procesamiento de 110-120°C.

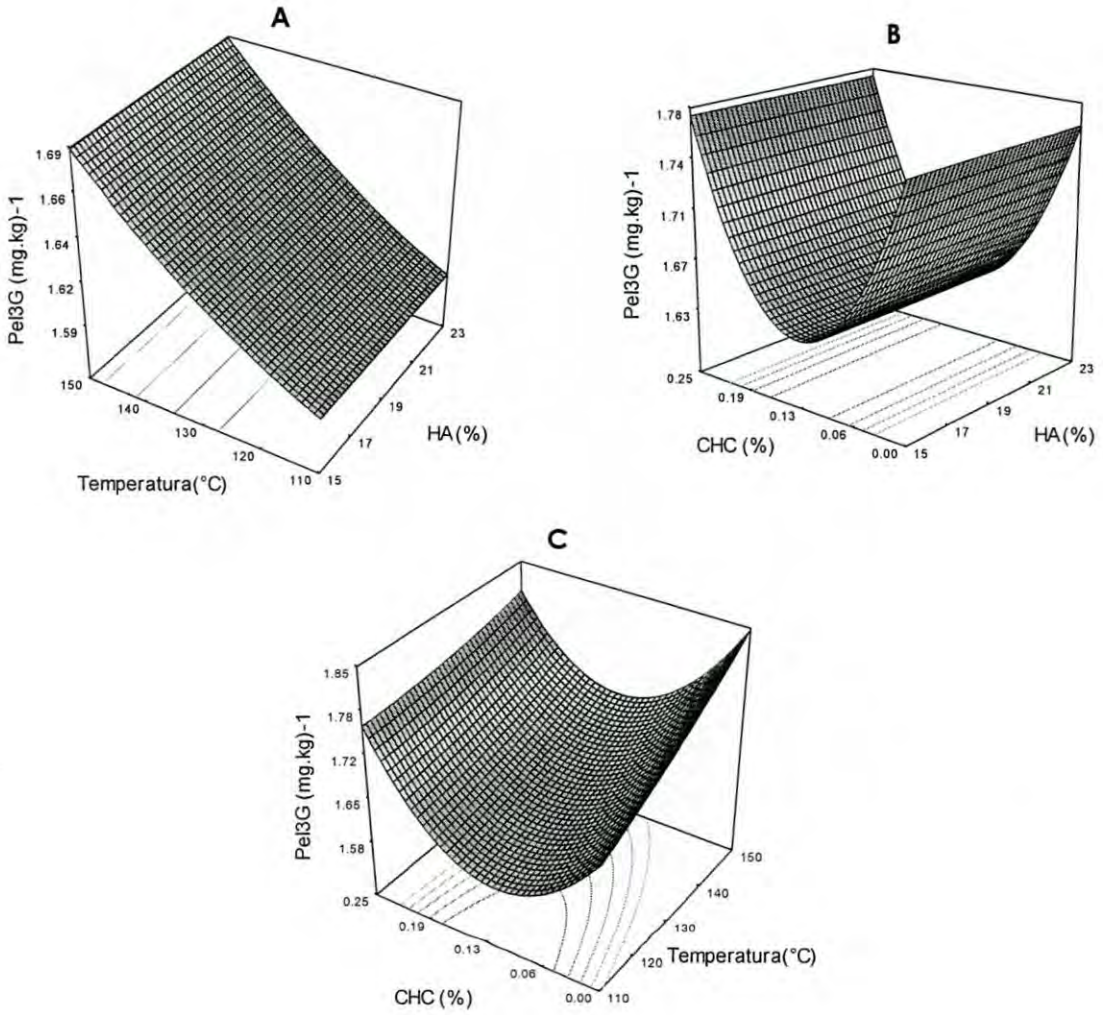


Figura 45. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el contenido de Pel3G en los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color L

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el parámetro de color L se presentan en la Tabla 25.

Los resultados muestran que la HA en su término lineal ($P < 0.0001$) y cuadrático ($P < 0.0040$), presentan un efecto altamente significativo sobre los valores de L . Esta variable respuesta indica la luminosidad exhibida en los extrudidos en una escala del 100 (blanco) al 0 (negro).

Ajuste del modelo de predicción:

$$L = 109.27 - 8.10(HA) + 0.18(HA)^2 \quad (15)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.89. Los valores promedio para este parámetro de color se encontraron en el rango de 19.44 y 28.89 (Tabla 26).

El parámetro L en los extrudidos fue menor que el obtenido en los granos de maíz azul sin extrudir (37.88). Los tratamientos con los valores de L más bajos presentaron un color púrpura más intenso, lo que indica una disminución en la luminosidad de los todos los tratamientos de extrudidos evaluados.

Tabla 25. Coeficientes de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción), análisis de varianza y coeficientes de determinación, mostrando la relación entre los factores de procesamiento y las propiedades físicas y de textura de los extrudidos.

Coeficientes	L^a	a	b	IE	DA	ECM
Intercepto						
β	21.61	3.87	-0.27	2.13	0.56	9.27
Lineal						
β_1	-2.54*** ^e	-0.35***	-0.23***	-0.45***	-0.022ns ^b	4.20***
β_2	0.46ns	0.18***	-0.016ns	0.002ns	-0.005ns	-0.67ns
β_3	0.29ns	0.011ns	-0.004ns	-0.015ns	-0.023ns	0.68ns
Cuadrático						
β_{11}	1.11***	0.17***	0.13*** ^d	0.11***	0.054ns	-0.011ns
β_{22}	0.31ns	0.23***	0.030ns	-0.009ns	0.015ns	-1.32**
β_{33}	0.38ns	-0.0007ns	0.063ns	0.001ns	-0.088* ^c	-0.066ns
Interacciones						
β_{12}	-0.62ns	-0.15**	-0.005ns	-0.005ns	-0.040ns	-0.93ns
β_{13}	-0.016ns	-0.16**	0.020ns	-0.035ns	-0.043ns	-0.17ns
β_{23}	0.53ns	0.033ns	0.010ns	0.021ns	-0.031ns	0.46ns
R^2	0.89	0.92	0.72	0.95	0.45	0.85

^a L , blanco (100) a negro (0); a , rojo (+) a verde (-); b , amarillo (+) a azul (-); IE, índice de expansión; DA, densidad aparente, ECM, esfuerzo de corte máximo; β_1 , humedad de alimentación; β_2 , temperatura final del extrusor; β_3 , concentración de hidróxido de calcio

^b ns, no significativo ($P > 0.1$)

^c *Significativo ($P < 0.1$)

^d **Muy significativo ($P < 0.05$)

^e ***Altamente significativo ($P < 0.01$)

Tabla 26. Diseño experimental para el proceso de extrusión, mostrando las diferentes combinaciones de las variables de procesamiento y los valores promedio de las propiedades físicas y de textura evaluadas en los extrudidos.

Tx ^a	HA	T	CHC	L	a	b	IE	DA	ECM						
	(%)	(°C)	(%)							Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂
	Factores de procesamiento														
X ₁	X ₂	X ₃													
1	19 (0) ^b	130 (0)	0.13 (0)	22.43	4.01	-0.33	2.13	0.42	7.88						
2	15 (-1.682)	130 (0)	0.13 (0)	28.89	5.01	0.35	3.26	0.85	1.98						
3	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	21.4	3.83	-0.35	2.05	0.34	9.26						
4	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	22.38	4.00	-0.04	2.19	0.66	8.38						
5	21.38 (1)	141.89 (1)	0.2 (1)	21.47	3.69	-0.38	1.78	0.38	9.93						
6	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	20.96	3.76	-0.12	2.19	0.77	7.59						
7	19 (0)	130 (0)	0.25 (1.682)	22.49	4.17	0.11	2.02	0.28	13.14						
8	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)	19.44	4.13	-0.17	1.72	0.70	15.38						
9	19 (0)	130 (0)	0 (-1.682)	23.44	3.73	-0.40	2.33	0.22	5.69						
10	21.38 (1)	141.89 (1)	0.05 (-1)	20.17	4.05	-0.22	1.80	0.72	8.96						
11	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.05 (-1)	25.72	4.77	0.32	2.54	0.54	3.74						
12	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.2 (1)	23.96	4.33	0.12	2.62	0.49	3.84						
13	23 (1.682)	130 (0)	0.13 (0)	21.18	3.83	-0.28	1.71	0.46	17.16						
14	21.38 (1)	118.11 (-1)	0.2 (1)	20.83	3.58	-0.32	1.76	0.66	12.12						
15	19 (0)	110 (-1.682)	0.13 (0)	21.21	4.25	-0.23	2.21	0.51	5.69						
16	16.62 (-1)	141.89 (1)	0.2 (1)	29.28	4.97	0.14	2.80	0.54	2.96						
17	19 (0)	150 (1.682)	0.13 (0)	22.35	4.94	-0.25	2.08	0.58	6.05						
18	16.62 (-1)	118.11 (-1)	0.05 (-1)	24.7	4.2	0.41	2.58	0.53	4.04						
19	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	20.73	3.87	-0.44	2.14	0.55	10.10						
20	19 (0)	130 (0)	0.13 (0)	21.63	3.73	-0.33	2.06	0.60	12.24						

^a Tx, tratamiento; HA, humedad de alimentación; T, temperatura; CHC, concentración de hidróxido de calcio; L, blanco (100) a negro (0); a, rojo (+) a verde (-); b, amarillo (+) a azul (-); IE, índice de expansión; DA, densidad aparente; ECM, esfuerzo de corte máximo

^b Los números en paréntesis corresponden a los valores codificados

En la Figura 46A se presenta el efecto de la HA y la T sobre el parámetro *L* de los extrudidos expandidos. Se observa que en HA menores a 15% y T de 150°C, la luminosidad presentó sus valores máximos.

Para el efecto de la HA y la CHC (Figura 46B) se observa que no existe un efecto significativo de CHC, siendo el valor de *L* de los extrudidos únicamente afectado por la HA. Así, los tratamientos elaborados a HA de 15% presentaron los mayores valores de *L*, lo cual se relaciona con una mayor expansión en los materiales.

En la Figura 46C, se presenta el efecto de la T y la CHC donde no se observaron efectos significativos, pero si una ligera tendencia de incremento directamente proporcional en los valores de *L* y la T, independientemente de la CHC (Figura 46C).

Cuando las antocianinas son expuestas a elevadas temperaturas, ocurren algunas reacciones de degradación formando estructuras sin color que disminuyen las tonalidades rojas y azules originales. Se ha reportado en la primera parte de la investigación, que el color *L* de extrudidos de maíz presentan un efecto altamente significativo de la HA.

En la Tabla 26 se observa que a baja HA, la luminosidad (*L*) incrementa en los extrudidos elaborados. Sadilova et al. (2006), reportaron un incremento en la luminosidad (*L*) de extractos de antocianinas que contenían cianidina y pelargonidina unidas a moléculas de mono y diglucósidos. Este efecto fue atribuido a la transición del catión flavilio a una forma carbinol sin color y otra forma de coloración amarilla, además de otros compuestos como chalconas. Probablemente, un mecanismo similar de degradación ocurrió en los extrudidos elaborados en esta investigación.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color *a*

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el parámetro de color *a* se presenta en la Tabla 25.

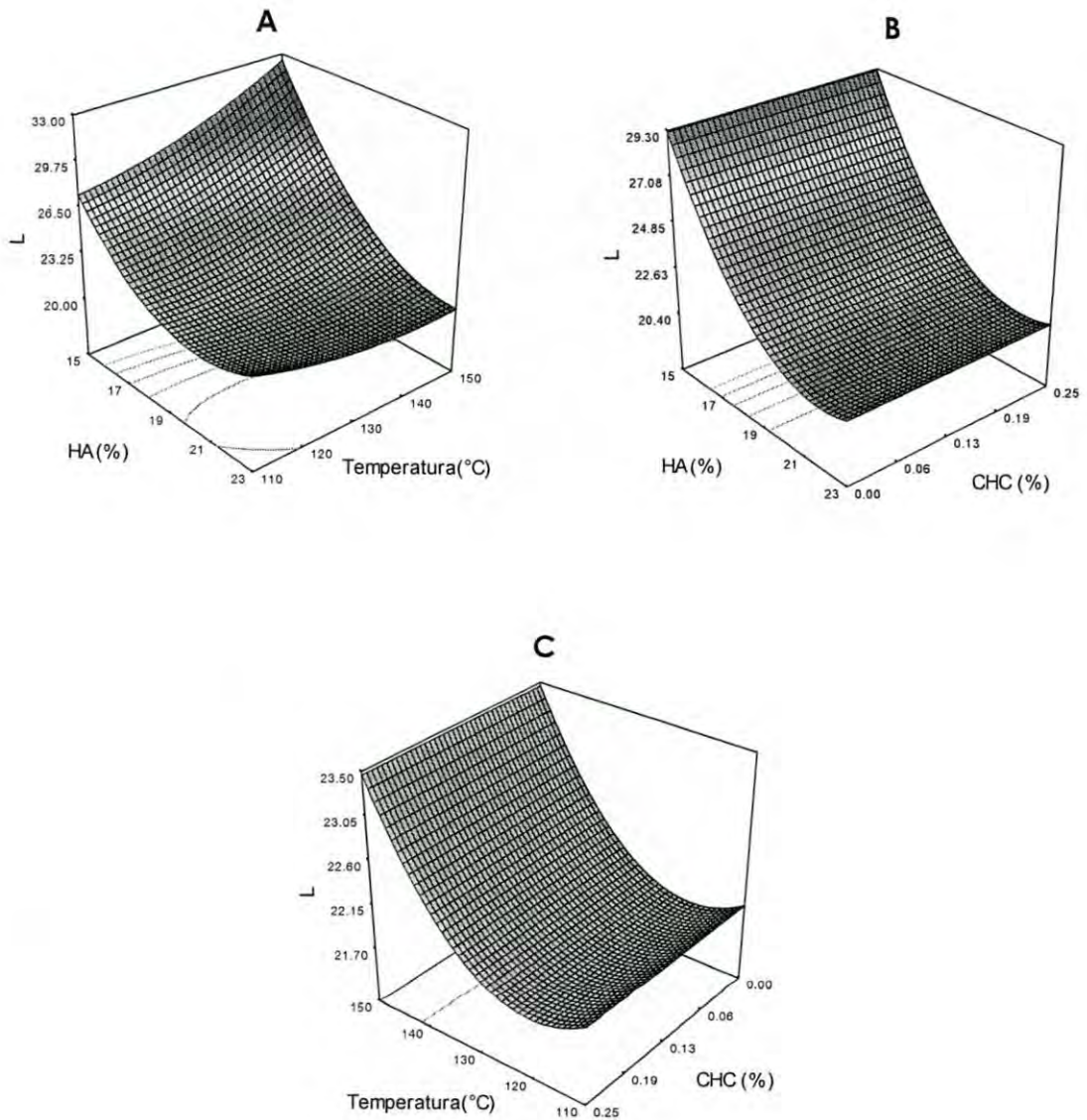


Figura 46. Gráficas de superficie y contorno del efecto la HA, T y CHC sobre el parámetro de color L de los extrudidos expandidosnixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Los resultados muestran que los términos lineales de la HA ($P < 0.0001$) y la T ($P < 0.0029$), y los términos cuadráticos HA^2 ($P < 0.0033$) y T^2 ($P < 0.0004$), presentaron un efecto altamente significativo sobre este parámetro de color. En lo referente a las interacciones (HA)(T) y (HA)(CHC), se presenta en ambas un efecto muy significativo ($P < 0.0310$ y $P < 0.0238$, respectivamente) sobre los valores de a de los extrudidos nixtamalizados.

Ajuste del modelo de predicción:

$$a = 27.92 - 0.48(HA) - 0.30(T) + 16.96(CHC) - 0.0052(HA)(T) - 0.88(HA)(CHC) + 0.029(HA)^2 + 0.0016(T)^2 \quad (16)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.92. Los valores positivos y negativos en este parámetro indican tonalidades rojas y verdes, respectivamente. El maíz azul sin extrudir presentó un valor de 0.42 para este parámetro. Lo anterior, indica que los extrudidos de todos los tratamientos perdieron la coloración original del grano, ya que los valores de a obtenidos fueron de entre 3.58 y 5.01 (Tabla 26), indicando una tendencia hacia coloraciones rojas.

Los tres factores de procesamiento estudiados afectaron los valores de esta variable respuesta. En la Figura 47A se presenta el efecto de la HA y la T sobre el parámetro de color a . Sus máximos valores se encontraron a baja HA (menores a 15%) y temperaturas elevadas (mayores a 140°C).

Con respecto al efecto de la HA y la CHC (Figura 47B) se observó que a baja HA y mayor CHC, el parámetro de color a incrementó en los extrudidos producidos. La estabilidad de las antocianinas es dependiente del pH a niveles de 6-7 o mayores. Estos compuestos cambian su coloración y son degradados por la oxidación, disminuyendo los valores positivos de a . De acuerdo a los resultados obtenidos en los extrudidos de esta investigación, el pH de los tratamientos se encuentra dentro de estos niveles (6 y 7). Por lo tanto, se puede deducir que este factor de procesamiento no mostró un efecto negativo en la coloración de tonalidades rojas en los tratamientos desarrollados.

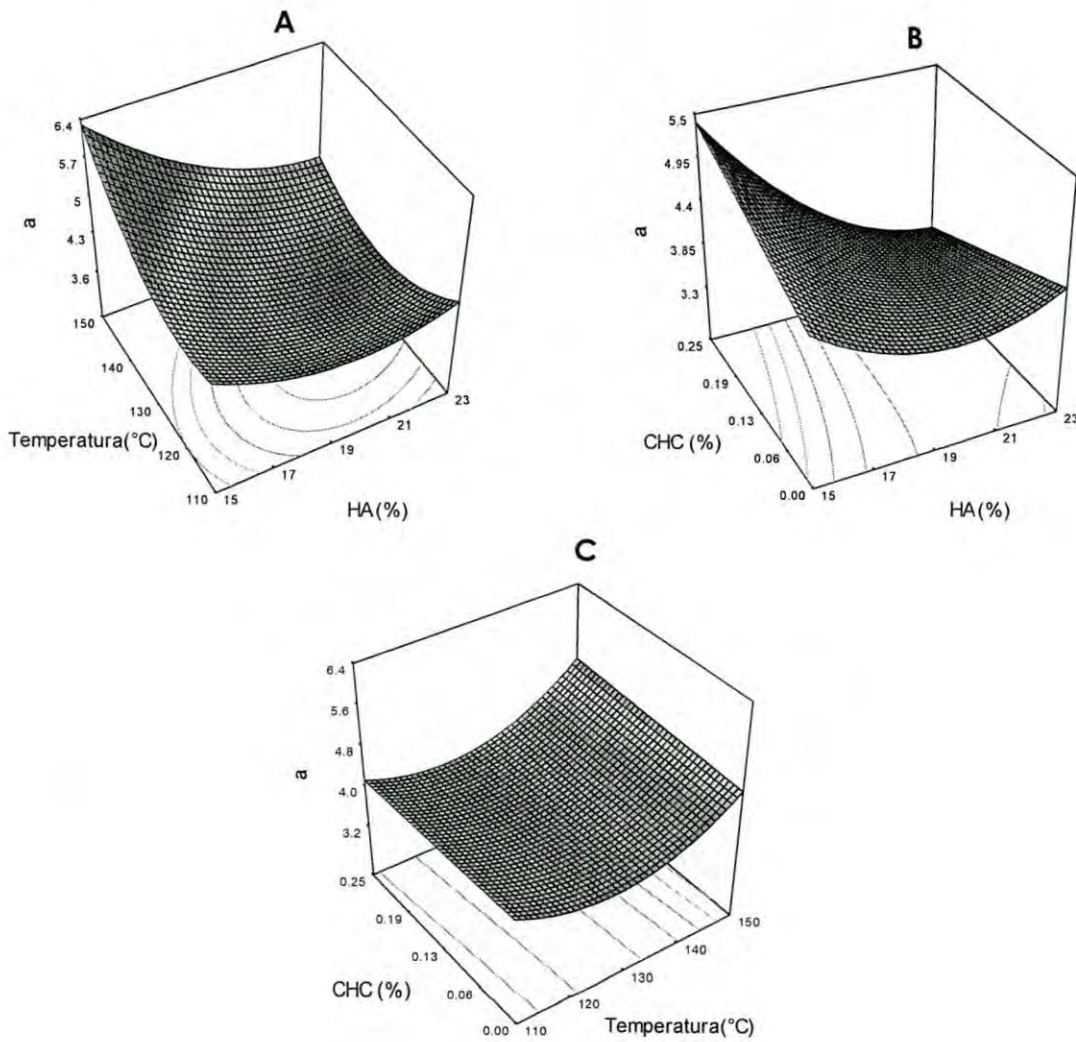


Figura 47. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color *a* de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

En la Figura 47C se presenta el efecto la T y la CHC, aunque no se encontró un efecto significativo, los resultados muestran una ligera tendencia donde a máximas CHC (0.25%) y T (150°C) el parámetro de color *a* alcanzó sus máximos valores, es decir, incrementaron las tonalidades rojas. Este efecto fue causado probablemente, por la liberación de antocianinas aciladas que incrementaron la proporción relativa del catión flavilio (rojo), lo que conservó las tonalidades rojas en los extrudidos elaborados independientemente de la CHC.

Se encontraron resultados contrastantes a los reportados por Durge et al. (2013), quienes elaboraron extrudidos de harina de arroz adicionados con antocianinas en polvo antes de la extrusión. Estos autores indicaron un incremento directamente proporcional en los valores del parámetro *a* en relación con la HA y la velocidad de tornillo, sin embargo, al incrementar la T este parámetro de color disminuyó significativamente. En los extrudidos elaborados en esta investigación se encontró que a menor HA y mayor T y CHC, los valores de *a* alcanzaron sus máximos.

Por otro lado, el incremento del parámetro de color *a* debido a alta HA, pudiera estar relacionado con el atrapamiento de los pigmentos en la densa matriz del producto, sin embargo, dicho efecto no se presentó en los extrudidos nixtamalizados.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color *b*

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el parámetro de color *b* se presenta en la Tabla 25. Los resultados muestran que la HA presentó un efecto altamente significativo en su término lineal ($P < 0.0003$), y muy significativo en su término cuadrático HA^2 ($P < 0.0210$).

Ajuste del modelo de predicción:

$$b = 9.16 - 0.89(HA) + 0.02(HA)^2 \quad (17)$$

El modelo analizado obtuvo un coeficiente de determinación de 0.72. En el espectro de color, los valores positivos y negativos de b indican tonalidades amarillas y azules, respectivamente. En la Tabla 26 se presentan los resultados promedio obtenidos en los extrudidos para este parámetro de color, los cuales se encontraron en el rango de -0.44 a 0.41. Al comparar estos valores con los presentados por el grano de maíz azul sin extrudir (4.61), se observa una disminución en este parámetro en los tratamientos obtenidos, es decir, se presenta una tendencia hacia coloraciones azules.

En la Figura 48A se presenta el efecto de la HA y la T sobre el parámetro de color b . Los valores máximos de b se presentaron a HA menores a 16%, independientemente de la T de procesamiento. Para el efecto de la HA y la CHC (Figura 48B), se observa la misma tendencia, alcanzando los valores máximos de b en los extrudidos a bajos niveles de HA, independientemente de la CHC.

Se esperaban cambios importantes en este parámetro. Los valores negativos de b denotan tonalidades azules, lo cual era deseable en los extrudidos producidos. Los tratamientos de extrudidos que presentaron los valores más bajos de b (negativos), fueron aquellos procesados a HA mayor a 20% y T mayores de 120°C, independientemente de la CHC.

Lo anterior pudiera explicarse por la presencia de uno o más grupos acilo en las antocianinas, los cuales confieren un efecto de prevención contra la hidrólisis del catión flavilio. Esto causó la síntesis de estructuras quinoidales de tonalidades azules, incrementando la estabilidad de antocianinas y disminuyendo la sensibilidad a los cambios de pH (Bridle y Timberlake, 1997). Debido a lo anterior, se pudiera considerar que las antocianinas aciladas contenidas en los extrudidos de maíz azul, no fueron afectadas por la T y la CHC.

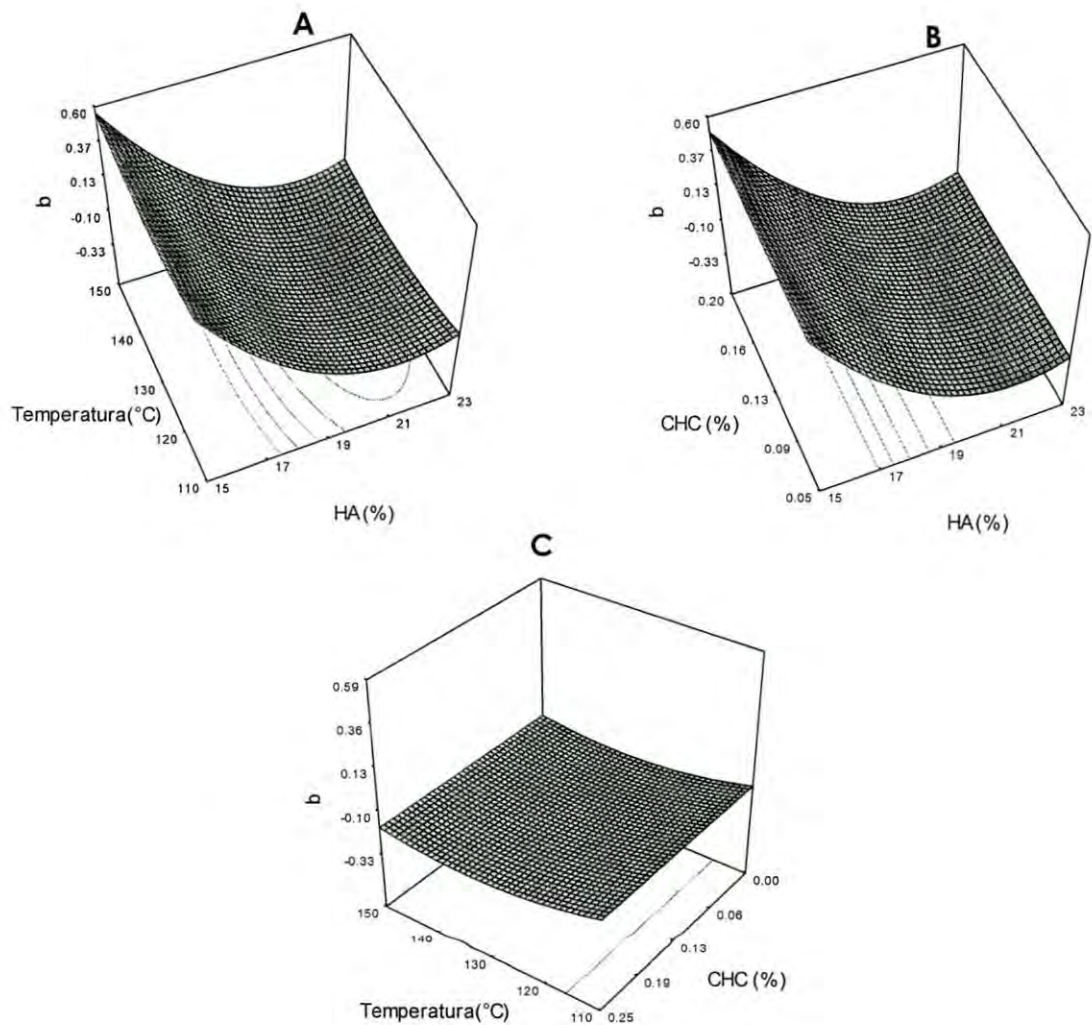


Figura 48. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el parámetro de color *b* de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Chaovanalikit et al. (2006), elaboraron extrudidos expandidos de maíz adicionados con extractos de antocianinas de arándanos, encontrando que la adición de este extracto disminuyó los valores de L y b , además, se encontró una relación con la disminución en la expansión de los productos obtenidos. Lo cual coincide con los resultados de esta investigación.

El parámetro de color b de productos extrudidos con antocianinas, es afectado significativamente por la HA, T y velocidad del tornillo, además de la incorporación de ciertos aditivos utilizados para minimizar o expandir el extrudido. Así, el valor de b disminuye ocasionando cambios hacia valores negativos y el consiguiente incremento de las tonalidades rojas y azules conforme estos parámetros de extrusión son más severos (Durge et al., 2013; Buckow et al., 2010).

La estabilidad de las antocianinas y su relación con este parámetro de color, también se ha asociado al efecto de la presión dentro del extrusor y al efecto de copigmentación con polifenoles, compuestos que se encuentran presentes en los granos de maíces pigmentados (Del Pozo et al., 2006).

En general, los cambios en el color de extrudidos que contienen antocianinas se deben a la degradación de estos compuestos por efecto de las elevadas temperaturas de procesamiento. Adicionalmente, las altas temperaturas utilizadas durante la extrusión de cereales pudiera generar productos de la reacción de Maillard provocando un pardeamiento no enzimático (Nayak et al., 2011b) y promoviendo cambios en los valores de los parámetros L , a y b , como se observa al compararlos con los materiales o ingredientes sin extrudir.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el índice de expansión (IE)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el índice de expansión en los extrudidos se presenta en la Tabla 25. Los resultados muestran que la HA presenta un efecto

altamente significativo en su términos lineal ($P < 0.0001$) y cuadrático HA^2 ($P < 0.0006$) sobre el índice de expansión.

Ajuste del modelo de predicción:

$$IE = 12.75 - 0.93(HA) + 0.01(HA)^2 \quad (18)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.95. En la Tabla 26 se presentan los valores promedio del IE en los extrudidos, los cuales se encontraron en el rango de 1.71 a 3.26. La expansión de los productos directamente expandidos se lleva a cabo por el incremento en la fricción dentro del equipo, debido a la combinación de la HA y T para obtener una masa viscoelástica, produciendo un incremento en la viscosidad del material, causando así un diferencial de presiones entre el equipo y la presión atmosférica. Esto produce la expulsión repentina de humedad en forma de vapor e instantáneamente el material sale del extrusor, formando burbujas que permiten la expansión del extrudido (Brümer et al., 2002; Guy, 2001).

En las Figuras 49A y 49B se presentan los efectos la HA y T, y la HA y CHC respectivamente, sobre el IE de los extrudidos nixtamalizados. Se observa la misma tendencia para ambas interacciones, demostrándose el efecto significativo de la HA en el IE, y no existiendo efecto alguno de la interacción T y CHC (Figura 49C). Es decir, que a HA menor a 16%, el IE de los extrudidos elaborados incrementa.

Los resultados obtenidos difieren con los reportados por Menis et al. (2013), quienes señalaron que la T de extrusión presenta un efecto significativo en su término lineal en la producción de extrudidos elaborados con grits de maíz adicionado. De acuerdo a estos autores, el incremento de la T de procesamiento aumenta los valores del IE, efecto que no ocurrió en esta investigación, probablemente por las diferencias en el tamaño de partícula y otras características del material utilizado.

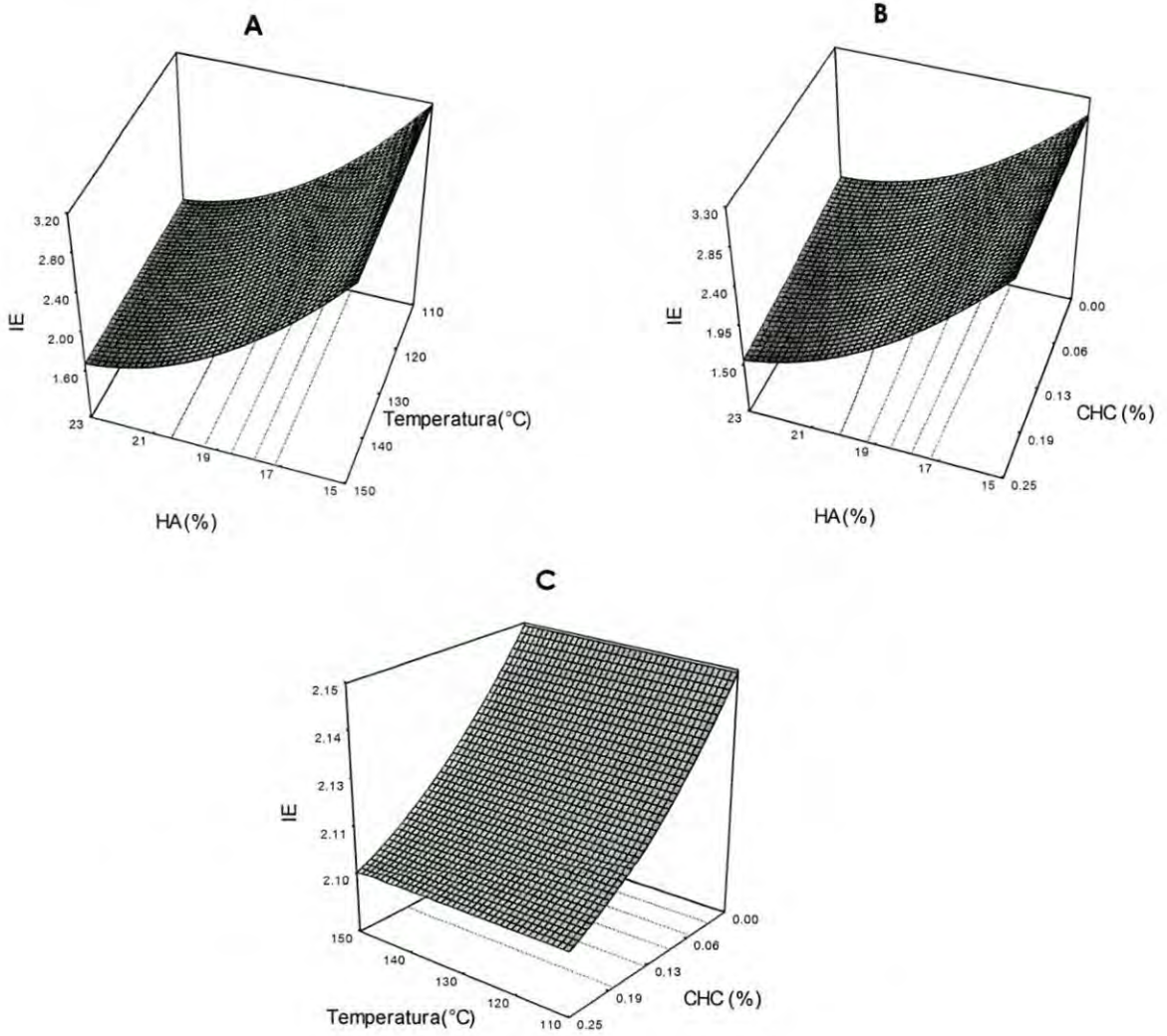


Figura 49. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el IE de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Con respecto al efecto de la T y la CHC (Figura 49C), se observa que estos factores de procesamiento no presentan un efecto significativo en los valores de este parámetro físico. Martínez et al. (1998) reportaron que CHC mayores a 0.2%, presentan un efecto significativo en el IE de extrudidos elaborados con maíz blanco. Lo anterior por efecto de la formación de complejos almidón-calcio en los cuales, los iones de Ca^{++} se unen por diferencia de cargas a los grupos hidroxilo del almidón para la formación de una molécula más rígida. Sin embargo, en los valores del IE de los extrudidos elaborados en esta investigación, no se presentó el efecto antes citado.

Los valores de IE de los productos extrudidos nixtamalizados se encuentran dentro de los rangos reportados por Thymi et al. (2005), quienes probaron que la expansión de productos de maíz amarillo extrudido depende principalmente de la HA.

La viscosidad de la mezcla de ingredientes es otra variable relacionada con el IE. Las propiedades reológicas de la mezcla intervienen en la presión de vapor, causando la expulsión de la humedad interna cuando el extrudido sale del dado. Sin embargo, la viscosidad afecta el crecimiento de la burbuja y su contracción. La viscosidad de la mezcla a elevada HA es baja, así la contracción de la burbuja y su colapso se incrementa cuando el vapor es expulsado (Ryu & Ng, 2001).

Relacionando esto con los resultados obtenidos en la primera etapa de la investigación, se puede deducir que la viscosidad a la que salen del dado los extrudidos es baja, sobre todo en los tratamientos elaborados a HA menor a 18.5% puesto que los resultados para la viscosidad máxima (VM) indicaron muy bajos valores para todos los tratamientos. Lo anterior pudo causar también cierto efecto en la expansión de los extrudidos nixtamalizados elaborados en esta segunda etapa. Aunado a esto, se ha descrito que la baja HA, la degradación del almidón y los bajos contenidos de fibra dietaria, proteína y lípidos, causan generalmente una reducción del IE (Riaz, 2000), estos factores y variables aplican para los productos generados en esta investigación.

Efecto de la HA, T y CHC sobre la densidad aparente (DA)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre la DA de los extrudidos se presenta en la Tabla 25. Los resultados muestran que únicamente la CHC en su término cuadrático, presenta un efecto muy significativo ($P < 0.0332$) sobre la densidad aparente de los extrudidos elaborados.

Ajuste del modelo:

$$DA = 0.38 + 3.97(\text{CHC}) - 17.15(\text{CHC})^2 \quad (19)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.45. En la Tabla 26 se presentan los valores promedio de la DA en los extrudidos nixtamalizados, los cuales se encuentran en el rango de 0.22 a 0.85 g/cm³. En la Figura 50A, se presenta el efecto de la HA y la T sobre la DA de los extrudidos producidos. Se observa que a rangos de HA entre 19 y 20% e independientemente de la T, la DA fue menor en todos los extrudidos evaluados.

Con respecto al efecto de la HA y la CHC (Figura 50B), se observa que a HA entre 17 y 19% y a cualquier CHC, la DA de los extrudidos fue menor. Así, el IE alcanzó sus mayores valores a HA menores a 16%. Para la el efecto de la T y la CHC (Figura 50C), se observa que la DA alcanzó sus valores máximos a una CHC de 0.13% independientemente de la T.

La adición de hidróxido de calcio, ejerce cierto efecto en la expansión de los extrudidos al salir del dado y por ende en la densidad aparente. La alcalinización del medio provoca una mayor exposición de los grupos OH del almidón, causando que los iones de Ca⁺⁺ se unan a estos y se formen complejos, produciendo estructuras más compactas (Zazueta-Morales et al., 2001). De acuerdo a los resultados obtenidos en el ANDEVA, el efecto citado anteriormente pudo ocurrir en los extrudidos elaborados.

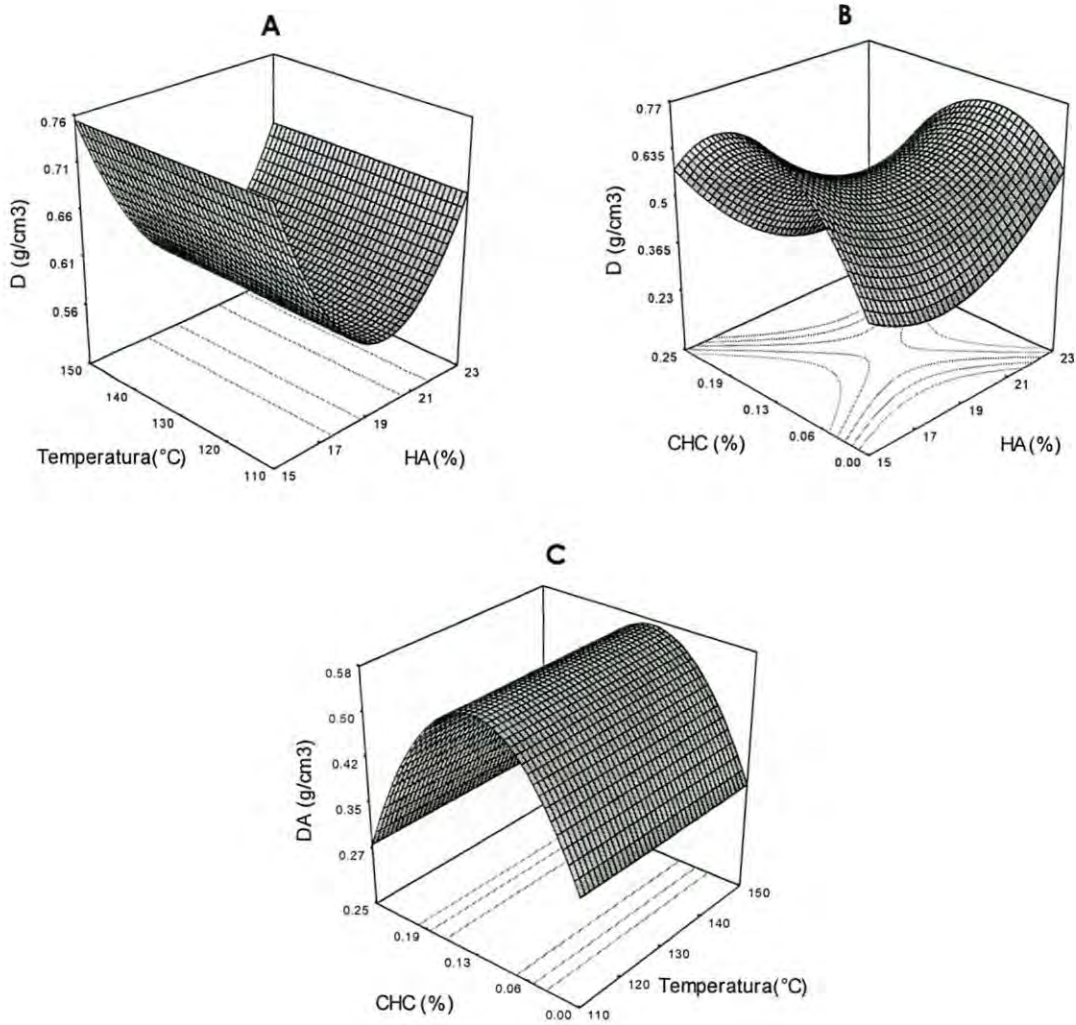


Figura 50. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre la DA los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Generalmente, las botanas extrudidas se producen principalmente con almidón de maíz. Los extrudidos elaborados en esta investigación contienen granos integrales, por lo que se encuentran presentes ciertos componentes como proteínas, y polisacáridos no amiláceos (arabinosilanos y otras gomas contenidas en el pericarpio). Lo anterior, pudo cambiar los efectos de los factores de procesamiento sobre la densidad aparente de los extrudidos producidos.

Efecto de la HA, T y CHC sobre el esfuerzo de corte máximo (ECM)

Los coeficientes de la ecuación de segundo orden, el ANDEVA y los coeficientes de determinación del efecto de la humedad de alimentación, temperatura y concentración de hidróxido de calcio sobre el ECM de los extrudidos se presenta en la Tabla 25. Los resultados muestran que la HA en su término lineal presenta un efecto altamente significativo ($P < 0.0001$), y la temperatura en su término cuadrático T^2 presenta un efecto muy significativo ($P < 0.0263$) sobre la textura de los extrudidos evaluada como ECM.

Ajuste del modelo de predicción:

$$ECM = -173.84 + 1.76(HA) - 0.009(T)^2 \quad (20)$$

El modelo analizado presentó un coeficiente de determinación de 0.85. Los valores promedio del ECM en los tratamientos evaluados estuvieron en el rango de 1.98 a 17.16 kPa (Tabla 26). Los requerimientos sensoriales de los consumidores de botanas indican que los extrudidos deben tener ciertas características entre las que se encuentran: una estructura porosa, una gran cantidad de células de aire de paredes delgadas, textura crujiente, alto grado de expansión y una baja densidad. (Kasprzac et al., 2013). La textura de las botanas extrudidas cilíndricas esta usualmente descrita por la crujencia y la resistencia al corte, además de la fracturabilidad. La fuerza al corte o la dureza en este tipo de productos, son percepciones asociadas con la expansión y las celdas de aire en los extrudidos. La textura puede evaluarse mediante métodos instrumentales, los cuales correlacionan altamente con los análisis sensoriales (Maldo & Conti-Silva, 2014). Por lo

consiguiente, se esperan bajos valores en el ECM durante los análisis de textura de estos productos.

Este parámetro está altamente correlacionado con la densidad aparente, a mayor ECM la DA incrementa. La densidad aparente está relacionada con la estructura del poro y la expansión. Sin embargo, estas características del producto no suelen ser parámetros constantes, debido a las reacciones entre los componentes de los cereales durante la extrusión.

Los resultados obtenidos en el ANDEVA del efecto de la HA y T en los extrudidos, son similares a los obtenidos por Launay & Linch (1984). Estos autores evaluaron las propiedades mecánicas de extrudidos de semolina y almidón de maíz producidos bajo diferentes condiciones de HA, temperatura de cañón y proporciones de amilosa amilopectina. Se concluyó que la rigidez en los extrudidos de almidón, está fuertemente correlacionada con el contenido de amilosa y la T del cañón. La relación fue diferente para cada T evaluada, además, la rigidez incrementó con el aumento de la proporción de amilosa a T de 130 y 180°C, pero disminuyó a T de 225°C.

Los extrudidos expandidos en esta investigación se elaboraron con un maíz de endospermo mayormente suave, lo que pudo provocar que una mayor cantidad de amilosa se encontrara presente en los tratamientos, disminuyendo el IE y por consiguiente incrementando los valores de ECM.

En las Figuras 51A y 51B se presentan los efectos de la HA y T, y la HA y CHC respectivamente, sobre el ECM en los extrudidos elaborados. Aunque no se presentaron efectos significativos de estas interacciones, en ambas gráficas se observa el efecto del término lineal de la HA sobre los valores de ECM, al incrementar la HA, aumenta el ECM.

En lo que respecta al efecto de la T y la CHC no se observa ningún efecto significativo, solo una ligera disminución del ECM a T de 110 y 150°C, independientemente de la CHC.

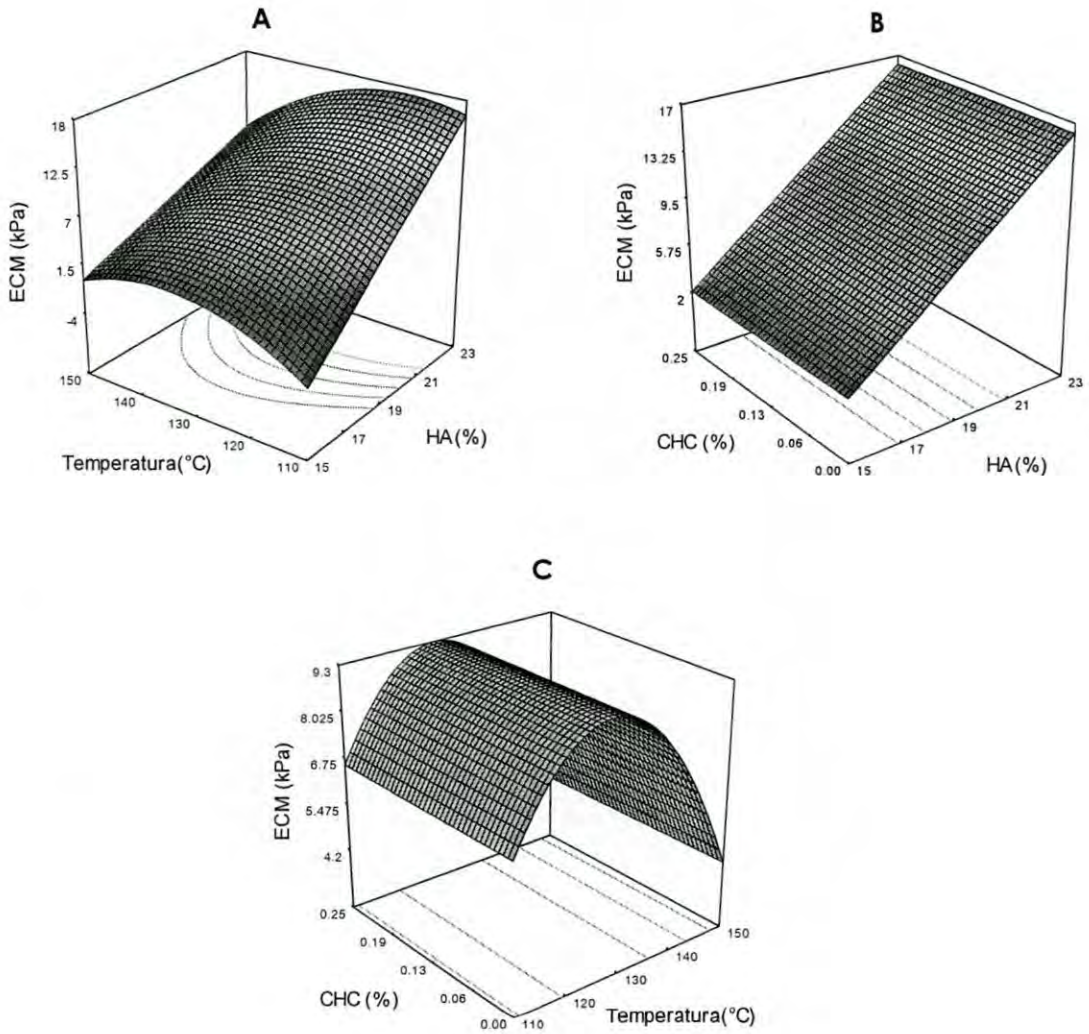


Figura 51. Gráficas de superficie y contorno del efecto de la HA, T y CHC sobre el esfuerzo de corte máximo de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul: (A) HA y T; (B) HA y CHC; y (C) T y CHC.

Los resultados obtenidos difieren con los reportados por Zazueta-Morales et al. (2001), quienes encontraron que la adición de 0.16% de hidróxido de calcio en la producción de extrudidos de maíz azul, incrementa la fuerza a la penetración y por consecuencia, el área bajo la curva fuerza-deformación. Esto indicaría que los extrudidos elaborados en esta investigación con CHC menores a 0.16% presentarían un mayor índice de expansión, una menor densidad aparente y menores valores de ECM.

Sin embargo, la CHC no presentó un efecto estadístico significativo en el IE y el EMC, pero si mostró un efecto significativo para la DA. Por otra parte, los resultados obtenidos coinciden en que la HA y la temperatura de extrusión presentan un efecto en esta propiedad de textura.

La fuerza requerida para romper el extrudido, se encuentra directamente relacionada con el grado de degradación y gelatinización del almidón, estos procesos son dependientes de la temperatura, efecto que se comprobó con el análisis morfológico y térmico realizado en los extrudidos obtenidos en la primera etapa de la investigación.

Optimización del proceso de extrusión

Las botanas a base de cereales que contienen mayor cantidad de compuestos naturales benéficos para la salud, son ampliamente aceptadas por los consumidores. En conjunto con lo anterior, la crujencia y apariencia (color atractivo) son atributos sensoriales muy importantes en este tipo de productos.

La optimización de las mejores condiciones de procesamiento (HA, T y CHC) en esta etapa de la investigación, se realizó en función de obtener un extrudido con alto contenido de antocianinas, una alta expansión y un color aceptable. Para lograr lo anterior, en la optimización se utilizaron tres características deseables en los extrudidos: el contenido de AT (maximizar), el IE (maximizar) para alcanzar la máxima expansión posible y así obtener un producto crujiente, y el parámetro de

color b (minimizar) ya que los valores deseables son negativos, lo que generaría una coloración azul/púrpura más intensa, haciendo los extrudidos más atractivos.

Considerando los resultados obtenidos para el contenido de AT (Tabla 24), el índice de expansión y el parámetro de color b (Tabla 26) obtenidos a determinadas condiciones de HA, T y CHC, se llevó a cabo la optimización de estas variables respuesta utilizando el Software Design Expert V.7.0.0 (Stat-Ease, Minneapolis, MN.)

En las Figuras 52, 53 y 54, se presenta la región con la mejor combinación en las gráficas de superposición de contornos. Los factores de procesamiento fueron: HA (%)= 16.62/ T (°C)= 141.89, HA (%)= 17.27/ CHC (%)= 0.11, y T (°C)= 141.89/ CHC (%)= 0.08. Una vez obtenidos los valores, se calculó el promedio para cada factor, lo que resultó en las siguientes condiciones de extrusión: HA (%)= 16.94, T (°C)= 141.89 (cuarta zona del extrusor) y CHC (%)= 0.09, los cuales se consideraron como los óptimos para obtener los extrudidos de maíz azul con las características mencionadas anteriormente, y con las cuales se realizó la validación experimental. Con los valores óptimos de procesamiento, se estimaron las siguientes variables respuesta: Antocianinas totales= 160 mg/kg, parámetro de color b = 0.10 e índice de expansión= 2.66.

Validación de las condiciones óptimas de procesamiento

La validación experimental de la obtención de los extrudidos se llevó a cabo utilizando las condiciones de procesamiento estimadas por la superposición de superficie de respuesta. El procesamiento para la producción de los extrudidos se realizó de acuerdo a lo descrito en la sección "Proceso de nixtamalización por extrusión" (página 70), fijando los valores de los factores HA, T y CHC estimados por la superposición de superficie de contornos. Además, se utilizó como control maíz blanco y se elaboraron extrudidos con las mismas condiciones de procesamiento optimizadas.

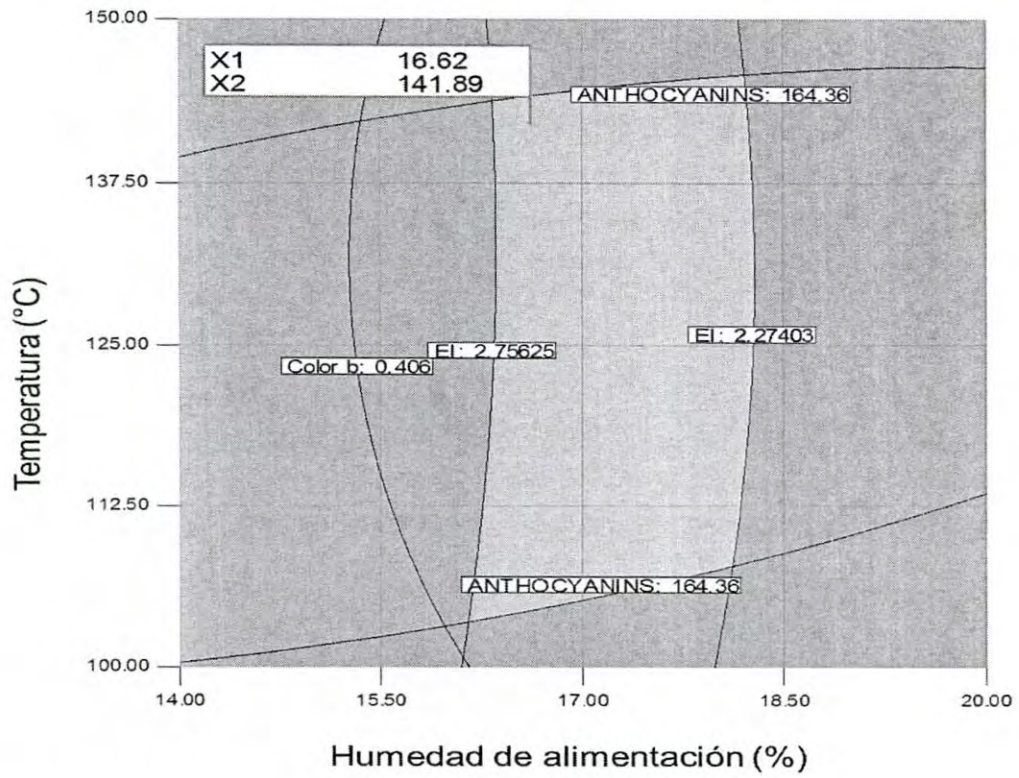


Figura 52. Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores HA y T, para la obtención de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul.

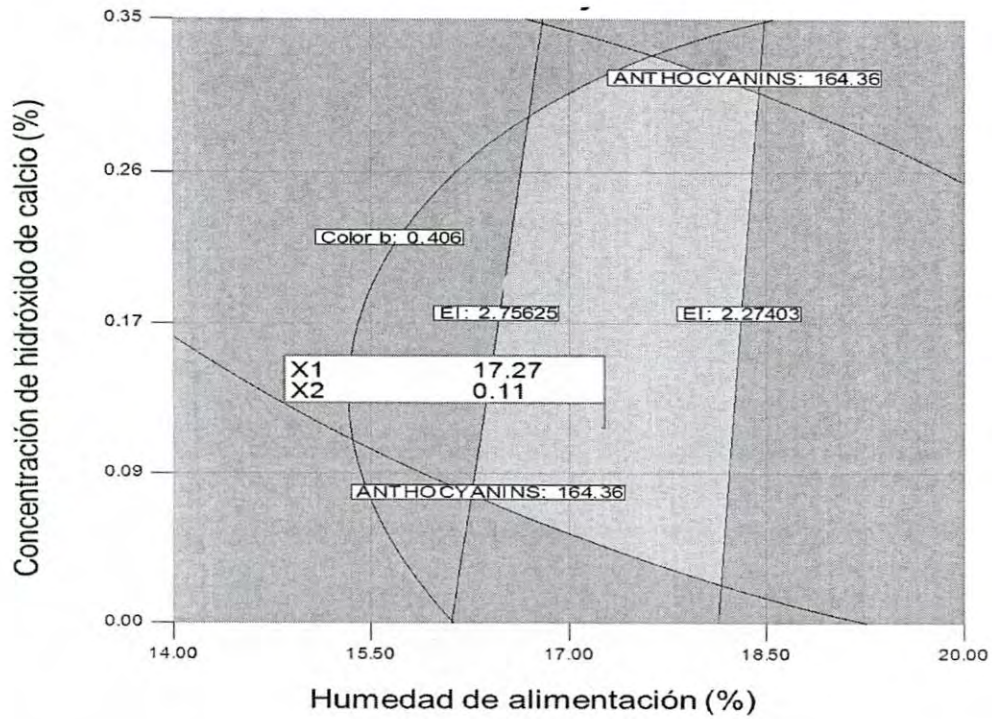


Figura 53. Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores HA y CHC, para la obtención de los extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul.

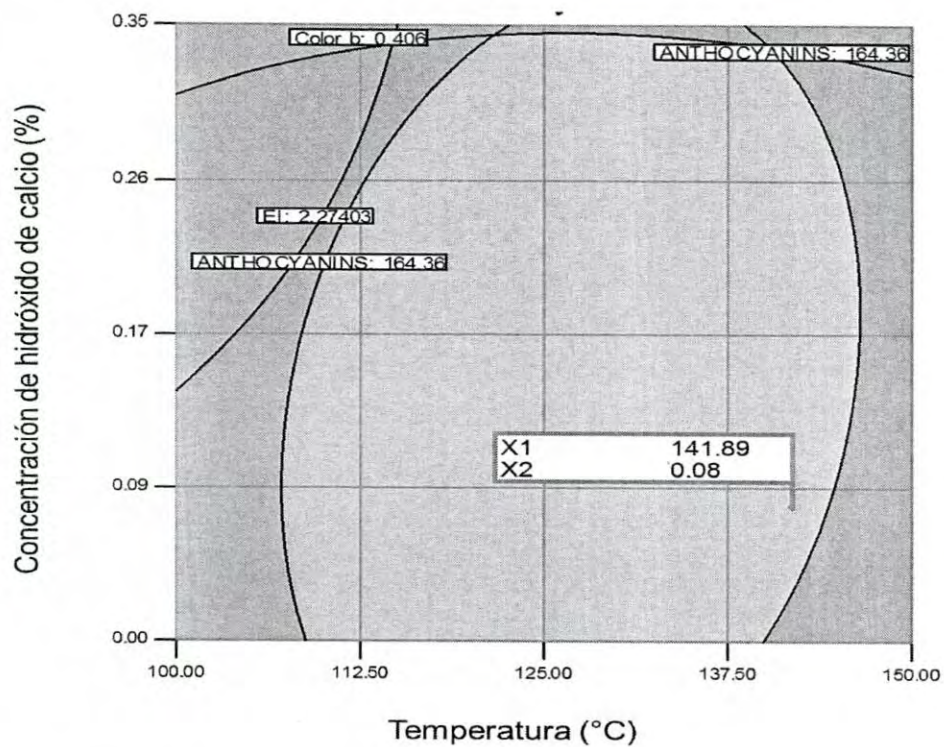


Figura 54. Gráfica de superposición de contornos con la región óptima de los factores T y CHC, para la obtención los extrudados expandidos nixtamalizados de maíz azul.

En la Figura 55 se presentan las botanas extrudidas de maíz azul y blanco elaboradas. Las propiedades químicas y físicas evaluadas en los extrudidos nixtamalizados de maíz azul y blanco obtenidos con las condiciones de procesamiento óptimo, se presentan en la Tabla 27.

Los resultados en relación a las variables respuesta optimizadas, se describen a continuación. El promedio obtenido experimentalmente de AT en los extrudidos nixtamalizados de maíz azul fue de 158.87 mg/kg, siendo el valor de predicción de 160 mg/kg, lo que representa un ajuste del 99.2%. Al comparar el contenido de AT en las botanas de maíz azul con las elaboradas con maíz blanco se observa que las primeras presentaron un contenido significativamente mayor de estos compuestos.

El índice de expansión de los extrudidos de maíz azul presenta un valor experimental más alto (3.19) que el de predicción, representando un ajuste del modelo de 83.3%. Al comparar este parámetro con el obtenido en la botana de maíz blanco, se encontró que el IE de los extrudidos de maíz azul fue significativamente mayor.

En lo correspondiente al parámetro de color *b*, el valor obtenido experimentalmente (-0.45) resultó mejor al valor de predicción, ya que los valores negativos indican una tonalidad azul más atractiva para la botana.

Otras evaluaciones químicas, físicas y de textura evaluadas en los extrudidos elaborados con las condiciones de procesamiento óptimas, se presentan en la Tabla 27 y discuten a continuación. Las antocianinas específicas evaluadas C3G, C3,5diG y Pel3G, fueron cuantificadas únicamente en los extrudidos de maíz azul. En los extrudidos de maíz blanco no fue posible su detección mediante el análisis de HPLC-UV-DAD, ya que estos compuestos no se encontraron presentes. Lo anterior concuerda con los perfiles reportados para maíz de color azul reportados por Salinas et al. (2010) y Castañeda-Ovando et al. (2010).

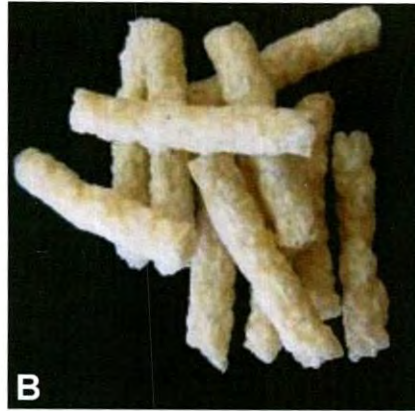


Figura 55. Botanas expandidas nixtamalizadas elaboradas con: (A) maíz azul; y (B) blanco utilizando las condiciones óptimas del proceso de extrusión.

Tabla 27. Valores de predicción y promedio de las evaluaciones químicas, físicas y de textura en los extrudidos expandidos nixtamalizados obtenidos con las condiciones óptimas de procesamiento.

Variable respuesta	Promedio		
	Valor de predicción	Maíz azul	Maíz blanco
AT ^a (mg/kg, bs)	160	158.87 ± 2.26a ^b	5.04 ± 0.93b
C3G (mg/kg, bs)	SP	27.41 ± 0.06	ND
C3,5-diG (mg/kg, bs)	SP	16.67 ± 0.02	ND
Pel3G (mg/kg, bs)	SP	1.81 ± 0.02	ND
Proteína (% , bs)	SP	8.33 ± 0.08a	7.90 ± 0.05b
Color <i>b</i>	0.10	-0.45 ± 0.08b	1.34 ± 0.08a
Densidad aparente	SP	0.24 ± 0.03b	0.53 ± 0.08a
IE	2.66	3.19 ± 0.11a	1.89 ± 0.10b
EMC	SP	4.02 ± 0.88b	14.51 ± 3.44a

^a AT, contenido de antocianinas totales; C3G, contenido de cianidina 3-glucósido; C3,5-diG, contenido de cianidina 3,5-diglucósido; Pel3G, contenido de pelargonidina 3-glucósido; color *b*, amarillo (+) o azul (-); IE, índice de expansión; EMC, esfuerzo máximo al corte (kPa); bs, base seca; SP, sin predicción; ND, no detectadas durante el análisis

^b Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05)

El contenido de proteína en los extrudidos de maíz azul fue significativamente mayor que en los de maíz blanco. Sin embargo, se encontró que la proteína fue significativamente menor que la cuantificada en el grano de maíz azul sin extrudir (10%, bs). Lo anterior pudiera estar relacionado con lo descrito por Maga (1978), quien reportó una disminución del 25% en el índice de solubilidad de nitrógeno (ISN) en extrudidos de maíz y soya, en comparación con el ISN obtenido en el material sin extrudir.

De acuerdo a Jeunink & Cheftel (1979), esta disminución se asocia con la pérdida de enlaces covalentes disulfuro y puentes bisulfito de aminoácidos sulfurados, con el decremento simultáneo del contenido de cistina + cistina en la proteína de los extrudidos. Por otro lado, Burgess & Stanley (1976) elaboraron extrudidos de maíz y observaron que la extrusión disminuyó los niveles de albúmina, globulina, prolamina y gluten del producto final.

La densidad aparente de los extrudidos elaborados con maíz azul, fue menor que la obtenida en los extrudidos de maíz blanco. En lo que respecta al parámetro de textura evaluado como ECM, el extrudido de maíz azul presentó un valor significativamente menor que el de maíz blanco. Lo anterior era de esperarse, puesto que valores de densidad bajos, resultan en extrudidos menos compactos. Las diferencias en estos parámetros físicos y de textura, se debieron principalmente a las características químicas de los granos.

A pesar de la utilización de materiales biológicos como el maíz molido integral, se obtuvo un modelo de predicción muy preciso, que llevó al desarrollo de un producto con las características químicas (AT) deseadas y propiedades físicas mejores que las estimadas (IE, color *b*). El índice de expansión fue mayor que el estimado por el modelo, denotando mayor crujencia en los extrudidos producidos, y el parámetro de color *b* fue más intenso, alcanzando valores negativos que desarrollan tonalidades azules. Con respecto a la comparación los extrudidos de las dos variedades de maíz, se observó que los extrudidos de maíz azul presentaron un 96.8% más antocianinas

totales, un índice de expansión 1.9 veces mayor y un color más atractivo que los extrudidos elaborados con maíz blanco.

Las botanas expandidas obtenidas por el proceso de extrusión son clasificadas como de "segunda generación". Estos productos presentan generalmente una baja densidad y son promocionadas como altas en fibra, bajas en calorías, altas en proteína y nutritivas (Liu, et al., 2000). Por lo anterior, se considera que la botana expandida nixtamalizada de maíz azul elaborada en esta investigación pudiera ajustarse a la descripción citada anteriormente.

Discusión General

Las características químicas de los granos de maíz azul especialmente el tipo de endospermo, presentaron un efecto significativo sobre las propiedades evaluadas en los extrudidos, especialmente el IAA, IMS, la VM, el análisis morfológico y térmico. Con estas determinaciones se demostró que el almidón en los extrudidos de maíz se encontró degradado prácticamente en su totalidad. Este hecho afectó significativamente las propiedades físicas y de textura de los productos, dificultando la obtención de una mayor expansión, ya que no existió una cierta proporción de almidón nativo que soportara la formación de la burbuja de aire, y evitara la contracción de la pared celular al salir del dado. La humedad de alimentación baja (14-16.5%) produjo extrudidos con mayor expansión, menor densidad y menor ECM, por lo que se consideraron como las mejores condiciones para producir este tipo de expandidos. En cuanto al grado de molienda, se observó que con maíz de ITP 83.4 fue posible la obtención de productos con una buena expansión, por lo que no es necesario realizar procesos de molienda adicionales. Lo anterior, disminuye tiempos de procesamiento y presenta menores efectos en las características de calidad en los extrudidos. La temperatura final del extrusor en un rango de 130-140°C, se consideró como la mejor para la producción de los extrudidos en función de las características de calidad deseadas. Así mismo, este factor de procesamiento presentó efectos significativos en algunos parámetros químicos, especialmente en la retención de antocianinas, ya que se logró preservar un 38% de las contenidas en el grano sin

extrudir. La cianidina 3 glucósido mostró un incremento del 11.3% en los extrudidos al compararse con el contenido en el grano sin extrudir, lo cual coincidió con ciertos autores. De las cinco antocianinas específicas evaluadas en la segunda etapa, únicamente se encontró la presencia de tres (cianidina 3 glucósido, cianidina 3,5diglucósido y la pelargonidina 3 glucósido) tanto en el maíz sin extrudir, como en los extrudidos producidos. Durante la extrusión ocurren cambios químicos complejos en la estructura de las antocianinas, los cuales se encuentran relacionados con el color y deben estudiarse con mayor profundidad. Finalmente con la técnica matemática de optimización, se logró la obtención de un producto tipo botana nixtamalizada que actualmente, no se puede comparar con las que se encuentran en el mercado. Por lo anterior, esta investigación demostró que es posible mejorar las características nutrimentales y sensoriales de los productos a través de la manipulación de los factores de procesamiento. Por lo que aún se puede experimentar con otras variables, que incrementen el contenido de antocianinas y optimicen la textura de este tipo de productos elaborados con maíces de diferentes variedades y coloraciones.

CONCLUSIONES

La técnica de superficie de respuesta fue una herramienta útil para la optimización de las condiciones del proceso de extrusión en la producción de botanas expandidas, nixtamalizadas, de grano integral de maíz azul con un máximo contenido de antocianinas, máximo índice de expansión y un mínimo valor en el parámetro de color *b* (azul intenso).

La humedad de alimentación, fue el factor de procesamiento que presentó un mayor efecto en todas las características químicas, físicas, reológicas, morfológicas, térmicas y de textura de los extrudidos nixtamalizados de maíz azul. Se observó que este factor en niveles menores a 16.5%, desarrolló los extrudidos con mayor índice de expansión y menor esfuerzo de corte máximo.

La temperatura final de extrusión fue el factor de procesamiento que afectó significativamente las características químicas, físicas, reológicas, morfológicas, térmicas y de textura de los extrudidos, después de la humedad de alimentación. Especialmente, mostró efectos negativos en el contenido de antocianinas totales de los productos, disminuyendo su contenido durante el incremento este factor de procesamiento.

La molienda reportada como índice de tamaño de partícula, fue el factor de procesamiento que afectó la mayoría de las características evaluadas, excepto los parámetros de color *L* y *a*, y el módulo de pérdida (G'') de los extrudidos. El maíz molido con índice de tamaño de partícula de 83.9 (primera molienda), produjo extrudidos con mejores características de calidad para el propósito de esta investigación.

La interacción humedad de alimentación y temperatura, seguida de la interacción temperatura e índice de tamaño de partícula, fueron las que presentaron efectos significativos en las características químicas, físicas, reológicas y de textura evaluadas en los extrudidos; especialmente el contenido de antocianinas y los parámetros de color *a* y *b*.

La concentración de hidróxido de calcio en los niveles evaluados en esta investigación, no afectó significativamente las propiedades evaluadas en los extrudidos, excepto el contenido de pelargonidina 3-glucósido y la densidad aparente.

El máximo contenido de antocianinas totales retenido en los extrudidos fue de 38% con respecto al grano de maíz azul, mayor que el reportado en otros productos de maíces pigmentados obtenidos en otras investigaciones.

De las cinco antocianinas específicas evaluadas: cianidina 3-glucósido, cianidina 3,5-diglucósido, la pelargonidina 3-glucósido, cianidina 3-galactósido y malvidina 3-glucósido, sólo se encontró la presencia de las tres primeras, tanto en maíz como en los extrudidos. La presencia de la cianidina 3,5-diglucósido, no ha sido reportada en otras investigaciones en granos de maíces pigmentados, sin embargo, esta investigación demostró que este compuesto se encuentra presente en el maíz azul. Las antocianinas evaluadas presentaron una gran estabilidad al procesamiento por extrusión.

Fue posible la optimización de las condiciones del proceso de extrusión, para la obtención de botanas expandidas nixtamalizadas de maíz azul integral con mayor cantidad de antocianinas, mayor índice de expansión y menor parámetro de color *b* (azul intenso). Los valores óptimos de las condiciones del proceso fueron: Humedad de alimentación, 16.94%; temperatura de la cuarta zona del extrusor, 141.89 °C; y concentración de hidróxido de calcio, 0.09%. Con estas condiciones, los valores estimados de los parámetros seleccionados de los extrudidos fueron: Antocianinas totales, 160 mg/kg; índice de expansión, 2.66; y parámetro de color *b*, 0.10.

La validación experimental de las condiciones óptimas de extrusión, demostró que la optimización con la técnica de superposición de contornos fue adecuada; incluso utilizando materiales biológicos como el maíz azul, debido a que las variables respuesta presentaron valores similares o mejores que los estimados.

Los extrudidos de maíz azul en comparación con los obtenidos de maíz blanco, presentaron mejores propiedades nutraceuticas, nutrimentales y físicas; es decir, mayor contenido de antocianinas y proteína, además de un alto índice de expansión.

RECOMENDACIONES

Elaborar extrudidos con otras variedades de maíz azul, que posean una mayor proporción de endospermo cristalino.

Evaluar diferentes condiciones de procesamiento tales como: velocidad de alimentación, velocidad de tornillo y diámetro de tornillo durante el proceso de extrusión; con el fin de mejorar las propiedades físicas en los productos.

Evaluar y desarrollar un método para obtener mayor rendimiento en la extracción de antocianinas en los extrudidos desarrollados.

Analizar con mayor profundidad los cambios químicos ocurridos en las antocianinas específicas contenidas en los extrudidos.

Realizar una evaluación sensorial de los productos obtenidos con el proceso de extrusión optimizado.

REFERENCIAS

- AACCI. (2000). Approved methods of analysis (10th ed.). St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.
- Abdel-Aal, E. S. M., & Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*, 76(3), 350-354.
- Adams, J. B. (1973). Thermal degradation of anthocyanin with particular reference on 3 glucosides of cyanidin in acidified aqueous solution at 100°C. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 24(7), 747-762.
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187.
- Agama, A.E., Astrid, O.M., Farhat, M.I., Paredes, L.O., Ortiz, C.J. & Bello, P.L.A. (2004). Efecto de la nixtamalización sobre las características moleculares del almidón de variedades pigmentadas de maíz. *Interciencia*, 29(11), 643-649.
- Agama-Acevedo E., Salinas-Moreno, Y., Pacheco-Vargas, G., & Bello-Pérez, L.A. (2011). Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: Morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 317-329.
- Agbisit, R., Alavi, S., Cheng, E., Herald, T., & Trater, A. (2007). Relationships between microstructure and mechanical properties of cellular cornstarch extrudates. *Journal of texture Studies*, 38(2), 199-219.
- Aguayo-Rojas J., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E.O., Serna- Saldívar, S. O., Gutiérrez-Urbe, J. A., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2012). Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(2), 178-185.
- Aguilera, J.M. (2005). Why food microstructure?. *Journal of Food Engineering*, 67(3), 3-11.
- Almeida-Domínguez, H.D., Suhendro, E.I., & Rooney, L.W. (1997). Corn alkaline cooking properties related to grain characteristics and viscosity (RVA). *Journal of Food Science*, 62(3), 516-520.
- Altan, A., McCarthy, K. L. & Maskan, M. (2008). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(9), 1648-1659.
- Amir Bahrani, S., Liosel, C., Maache-Rezzoug, Z., Della Valle, D., & Rezzoug, S.A. (2013). Rheological and viscoelastic properties of corn starch suspension modified by hydrothermal process: Impacts of process intensification. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 64, 10-16.

- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F., & Griffin, E.L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Starch Stärke*, 22(4), 130-135.
- Andrés-Bello, A., Barreto-Palacios, V., García Segovia, P., Mir-Bel, J., & Martínez Monzó, J. (2013). Effect of pH on color and texture of food products. *Food Engineering Reviews*, 5(3), 158-170.
- Anton, A.A., & Luciano, F.B. (2007). Instrumental texture evaluation of extruded snack foods: A review. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(4), 254-251.
- Antonio, M. M., Arellano, V. J. L., García de los Santos, G., Miranda Colín, S., Mejía Contreras, J. A., & González Cossío, F. V. (2004). Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(1), 9-15.
- AOAC. (1984). Official Methods of Analysis. (14th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC. (1997). Official Methods of Analysis (16th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Aoki, H., Kuze, N., & Kato, Y. (2002). Anthocyanin isolated from purple corn (*Zea mays* L.) *Foods & Food Ingredients Journal of Japan*, 199, 41–45.
- Bąkowska-Barzak, A. (2005). Acylated anthocyanins as stable, natural food colorants. A review. *Polish Journal of Food Nutrition and Science*, 14(55), 107-116.
- Bedolla, S., & Rooney, L.W. (1984). Characteristics of U.S. and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World*, 29, 732-735.
- Betrán F.J., Bockholt, A.J. & Rooney, L. (2001). Blue corn En A. R. Hallauer (Ed.), *Specialty Corns*. (pp. 293-337). Iowa, USA: Iowa State University.
- Bourne, M. (2002). Food texture and viscosity: Concept and measurement. UK/USA: Academic Press.
- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E. & Tiwari, B.K. (2011). Effects of extrusion on polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science and Technology*, 22(10), 570-575.
- Bressani, R., Breuner, M., & Ortiz, M.A. (1989). Contenido de fibra, ácido y neutrodetergente y de minerales menores en maíz y su tortilla. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 39(3), 382-391.
- Bridle, P. & Timberlake, C.F. (1997). Anthocyanins as natural food colours. Selected aspects. *Food Chemistry* 58(1–2): 103-109.

- Brouillet-Fourmann, S., Carrot, S.C., & Mignard, N. (2003). Gelatinization and gelation of corn starch followed by dynamic mechanical spectroscopy analysis. *Rheologica acta*, 42(1-2), 110-117.
- Brownmiller, C., Howard, L.R., & Prior, R.L. (2008). Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric colour, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*, 5(73), H72-H79.
- Buckhow, R., Kastell, A., Terefe, N.S. & Versteeg, C. (2010). Pressure and temperature effects on degradation kinetics and storage stability of total anthocyanins in blueberry juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(18), 10076-10084.
- Brümmer, T., Meuser, F., Van Lengerich, B., & Niemann, C. (2002). Effect of extrusion cooking on molecular parameters of corn starch. *Starch Stärke*, 54(1), 1–8.
- Burgess, L.D., & Stanley, D.W. (1976). Research note - A possible mechanism of thermal texturization of soya bean protein. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 9, 228-231.
- Cabrera, L. (1992). *Diccionario de Aztequismos*. (1a ed.). México: COLOFON.
- Cabrita L., Fossen, T., & Andersen, Ø. M. (2000) Colour and stability of the six common anthocyanidin 3-glucosides in aqueous solutions. *Food Chemistry*, 68(1), 101-107.
- Camacho-Hernández, I.L., Zazueta-Morales, J.J., Gallegos-Infante, J.A., Aguilar-Palazuelos, E., Rocha-Guzmán, N.E., Navarro-Cortez, R.O., Jacobo-Valenzuela, N., & Gómez-Aldapa, C.A. (2014). Effect of extrusion conditions on physicochemical characteristics and anthocyanin content of blue corn third generation snacks. *CyTA, Journal of Food*, DOI: 10.1080/19476337.2013.861517.
- Camire, M.E., Chaovanalikit, A., Dougherty, M.P., & Briggs, J.L. (2002). Blueberry and grape anthocyanins as breakfast cereal colorants. *Journal of Food Science*, 67(1), 438-441.
- Carvalho, C.P.W., Takeiti, C.Y., Onwulata, C.I., & Pordesimo, L.O. (2010). Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *Journal of Food Engineering*, 98(1), 103-109.
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M.L., Páez-Hernández, M.E., Rodríguez, J.A., & Galán-Vidal, C.A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 113(4), 859-871.
- Castañeda-Ovando, A., Galán-Vidal, C.A., Pacheco, L., Rodríguez, J.A., & Páez-Hernández, M.E. (2010). Characterization of main anthocyanins extracted from pericarp blue corn by MALDI-ToF MS. *Food Analytical Methods*, 3(1), 12-16.

- Chaovanalikit, A., Dougherty, M.P., Camire, M.E., & Briggs, J. (2006). Ascorbic acid fortification reduces anthocyanins in extruded blueberry-corn cereals. *Journal of Food Science*, 68(6), 2136-2140.
- Chinnaswamy, R., & Hanna, M.A. (1990). Macromolecular and functional properties of native and extrusion-cooked corn starch. *Cereal Chemistry*, 67(5), 490-499.
- Cone, K.C. (2007). Anthocyanin synthesis in maize aleurone tissue. En O.A. Olsen (Ed.), *Endosperm*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Cooper-Driver, G.A. (2001). Contributions of Jeffrey Harborne and co-workers to the study of anthocyanins. *Phytochemistry*, 56(3), 229-236.
- Cortés-Gómez, A., San Martín-Martínez, E., Martínez-Bustos, F., & Vázquez-Carrillo, G.M. (2005). Tortillas of blue maize (*Zea mays* L.) prepared by a fractionated process of nixtamalization: Analysis using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 273-281.
- Dauqan E.M.A., Sani H.A., & Kasim, Z.M. (2011). Fatty acids composition of four different vegetable oils (red palm olein, palm olein, corn oil and coconut oil) by gas chromatography. 2nd International Conference on Chemistry and Chemical Engineering. IPCBEE Vol 14. IACSIT Press, Singapore.
- Delgado, N.C., Aguilar, P.E., Gallegos, I.A., Rocha, G.N., Zazueta, M.J., & Caro, C.J. (2012). Characterization and optimization of extrusion cooking for the manufacture of third-generation snacks with winter squash (*Cucurbita moschata* D.) flour. *Cereal Chemistry*, 89(1), 65-72.
- De la Parra, C., Serna, S.S.O., & Hai, L.R. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55(10), 4177-4183.
- De Pascual-Teresa, S., Santos-Buelga, C., & Rivas-Gonzalo, J.C. (2002). LC-MS analysis of anthocyanins from purple corn cob. *Journal of Science and Food Agriculture*, 82(9), 1003-1006.
- De Pascual-Teresa, S., & Sánchez-Ballesta, T.M. (2008). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemical Reviews*, 7(2), 281-299.
- Del Pozo, I.D., Brenes C.H., Serna, S.S.O., & Talcott, T.S. (2006). Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products. *Food Research International*, 39(6), 696-703.
- Dennys, E.C.C., Andre, G.V.C., Maria D.O., Matta, C.G.P., Marco, S.D.S., & Neuza, M.B.C. (2006). Lipid profile of rats fed high-fat diets based on flaxseed, peanut, trout, or chicken skin. *Nutrition*, 22(2), 197-205.

- Dickerson, G.W. (2003). Nutritional analysis of New Mexico blue corn and dent corn kernels. Co-op Ext. Serv. Guide H-233. pp. 1-2.
- Ding, Q.B., Ainsworth, A., Plunkett, A., Tucker, G. & Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 142-148.
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R.T. (2012). Dietary fibre in foods: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255-266.
- Ditudompo, S., Takar, P.S., Ganjyal, G.M., & Hanna, MA. (2013). The effect of temperature and moisture on the mechanical properties of extruded cornstarch. *Journal of Texture Studies*, 44(3), 225-237.
- Durge, V.A., Sarkar, S. & Sinhgai, S.R. (2013). Stability of anthocyanins as pre-extrusion colouring of rice extrudates. *Food Research International*, 50(2), 641-646.
- Dyckerson, G.W. (2008). Nutritional analysis of New Mexico blue corn and dent corn kernels. Guide H-233. Cooperative Extension Service. College of Agriculture and Home Economics. http://aces.nmsu.edu/pubs/_h/H-233.pdf.
- Dyrby, M., Westergaard, N., & Stapelfeldt, H. (2001). Light and heat sensitivity of red cabbage extract in soft drink model systems. *Food Chemistry*, 72(4), 431-437.
- Dykes, L. & Rooney, L.W. (2007). Phenolic compounds in cereal grains and their health benefits. *Cereal Foods World*, 52(3), 105-111.
- Eastman, J., & Lee, G. (2005). Whole grains in extruded products. *Cereal Foods World*, 50(4), 168-172.
- Escribano-Bailón, M.T., Santos-Buelga, C., & Rivas-Gonzalo, J.C. (2004). Anthocyanins in cereals. *Journal of Chromatography A*, 1054, 129-141.
- Escudero, A.E., & González, S.P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria* 21(2), 61-72.
- Euromonitor. (2012). Euromonitor International- Analysis. <http://www.euromonitor.com/passport-sweet-and-savoury-snacks-americas/passport-subscription>.
- FAO. (1993). Alimentación y nutrición: El maíz en la nutrición humana. Nº 25. Roma. <http://www.fao.org/docrep/t0395s/t0395s00.htm>. Fecha de consulta: 29 Mayo 2014.
- FAOSTAT. (2014). <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> Fecha de consulta: 23 Enero 2014.

Fernández, M.J.L., Rodríguez, G.M.E., Figueroa, C.J.D., Leal, P.M., & Martínez, F.H.E. (2010). Evaluación de cambios fisicoquímicos a diferentes tamaños de partícula de harinas de maíz nixtamalizado como función del tiempo de reposo. *Superficies y Vacío*, 23(4), 21-24.

Figueroa, C.J.D., Martínez-Bustos, F., González-Hernández, J., Sánchez-Sinencio, F., Martínez, M.J.L., & Ruíz, T.M. (2006). Extrusor y proceso continuo para obtención de masa fresca de maíz para la elaboración de tortillas, harinas instantáneas y sus derivados. Patente Mexicana Número 234427.

Figueroa, C.J.D., Narváez, G.D.E., Mauricio, S. A., Taba, S., Gaytán, M.M., Véles, M.J.J. Rincón, S.F., & Aragón, C.F. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 3(3-A), 305-314.

Figueroa, C.J.D., Rodríguez Chong, A., & Véles, M.J.J. (2011). Proceso ecológico de nixtamalización para la producción de harinas, masa y tortillas integrales. Patente Mexicana Número 289339.

Finley, J.W., Kong, A.N., Hintze, K.J., Jeffery, E.H., Ji, L.L., & Lei, X.G. (2011). Antioxidants in foods: State of the science important to the food industry. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 59(13), 6837-6846.

Fleschhut, J., Kratzer, F., Rechkemmer, G., & Kulling, S.E. (2006). Stability and biotransformation of various dietary anthocyanins in vitro. *European Journal of Nutrition*, 45(1), 7-18.

Fossen T., Cabrita, L., & Andersen, Ø.M. (1998). Colour and stability of pure anthocyanins influenced by pH including the alkaline region. *Food Chemistry*, 63(4), 435-440.

Fossen, T., Slimestad, R., & Andersen, Ø.M. (2001). Anthocyanins from maize (*Zea mays* L.) and reed canarygrass (*Phalaris arundinacea*). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 49(5), 2318-2321.

Garber, W.B., Hsieh, F., & Huff, E.H. (1997). Influence of particle size on the twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry*, 74(5), 656-661.

Garzón, G.A. (2008). Anthocyanins as natural colorants and bioactive compounds. A review. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36.

Garzón, G.A., & Worlstad, R.E. (2002). Comparison of the stability of pelargonidin-based anthocyanins in strawberry juice and concentrate. *Journal of Food Chemistry*, 67(4), 1288-1299.

Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, 14(3), 217-225.

Gómez, R.R., Figueroa, C.J.D., Gayosso, M.C., Ramírez, M.E., & Hernández, A.D.F. (2006). Maíces criollos del Altiplano del Estado de Hidalgo. Libro SEP-Instituto Nacional del Derecho de Autor. (pp. 80). Núm. de registro 03-2006-100614290800-01.

Gopalakrishna, S., & Jaluria, Y. (1992). Modeling of starch gelatinization in a single screw extruder. En J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe (Eds.), *Food Extrusion Science and Technology*. (pp.3). New York, USA: Marcel Dekker, Inc.

Gu, L., House, S.E., Rooney, L.W., & Prior, R.L. (2008). Sorghum extrusion increases bioavailability of catechins in weanling pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(4), 1283-1288.

Guy, R.C.E., & Horne, A.W. (1987). Extrusion and co-extrusion cereals, En Blanshard, J.M.V. & J.V. Mitchell (Eds.). *Food structure, its creation and evaluation*. (pp. 331–349). London: Butterworth.

Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking. Technologies and Applications*. Boca Raton, FL: CRC.

Harper, J.M. (1989). Foods extruders and their applications. En Linko & J.M. Harper (Eds.), *Extrusion Cooking*. (pp 1-15). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists.

Heidenreich, S., Jaros, D., Rohm, R., & Ziem, A. (2004). Relationship between water activity and crispiness of extruded rice crisps. *Journal of Texture Studies*, 35(6), 621-633.

Hirth, M., Leiter, A., Beck, S.M., & Schuchmann, H.P. (2014). Effect of extrusion cooking process parameters on the retention of bilberry anthocyanins in starch based food. *Journal of Food Engineering*, 125, 139-146.

Ho, C.T., & Izzo, M.T. (1992). Lipid protein and lipid carbohydrate interactions during extrusion. En J.L. Kokini, C. Ho, & M.V. Karwe (Eds.), *Food Extrusion Science and Technology*. (pp. 145). New York, USA: Marcel Dekker.

Horbowicz, M., Kosson, R., Grzysiuk, A., & Debski, H. (2008). Anthocyanins of fruits and vegetables, their occurrence, analysis and role in human nutrition. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 68, 5-22.

Hoseney, R.C. (1998). *Principles of Cereal Science and Technology* (3rd ed.). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists.

lio, S. & Berghofer, E. (1999). Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering*, 39(1), 73-80.

- Irani, N.G., Hernández, M. & Grotewold, E. (2003). Regulation of anthocyanin pigmentation. En J.T. Romeo (Ed.), *Recent Advances in Phytochemistry*. (59-78 pp.). Edimburg: University Press.
- Iwe, M.O., Zuilichen, D.J., & Ngoddy, P.O. (2001). Extrusion cooking of blends of soy flour and sweet potato flour on specific mechanical energy (SME), extrudate temperature and torque. *Journal of Food Process and Preservation*, 25(4), 251-256.
- Jackson, D.S. & Shandera, J.R. (1995). Corn wet milling: Separation Chemistry and Technology. *Advances in Food and Nutrition Research*, 38, 271-297.
- Jeunink, J., & Cheftel, J.C. (1979). Chemical and physicochemical changes in field bean and soya bean proteins texturized by extrusion. *Journal of Food Science*, 44(5), 1322-1325.
- Kasprzak, M., Rzedzicki, Z., Wirkijowska, A., Zarzycki, P., Sobota, A., Sykut-Domańska, E., & Błaszczak, W. (2013). Effect of fibre-protein additions and process parameters on microstructure of corn extrudates. *Journal of Cereal Science*, 58(3), 488-494.
- Khanal, R.C., Howard, L.R., & Prior, R.L. (2009). Procyanidin content of grape seed and pomace, and total anthocyanins content of grape pomace as affected by extrusion processing. *Journal of Food Science*, 74(6), H174-182.
- Kiefer, J., & Wolfowitz, J. (1960). Optimum designs in regression problems. *Annals of Mathematical Statistics*, B30, 271-294.
- Kuskoski, E.M., Asuero, A.G., García-Parilla, M.C., Troncoso, A.M., & Fett, R. (2003). Actividad antioxidante de pigmentos antocianicos. *Ciencia y Tecnología Alimentarias Campinas*, 24(4), 691-693.
- Launay, B., & Linch, J.M. (1984).Twin-screw extrusion cooking of starches: Flow behavior of starch paste, expansion and mechanical properties of extrudates. En Ed. R. Jowitt. *Extrusion cooking technology*. (pp.180–204). Essex, England: Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- Lazou, A. & Krokida, M. (2010). Structural and textural characterization of corn-lentil extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 392-408.
- Lee, C.H., García, H.S., & Parkin, K.L. (2010). Bioactivities of kernel extracts of 18 strains of maize (*Zea mays* L). *Journal of Food Science*, 75(8), C667-C672.
- Li, E., Dhital, S., & Hasjim, J. (2014). Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties. *Starch Stärke*, 66(1-2), 1-13.
- Lillford, P.J. (2008) Extrusion. En J. M, Aguilera & P. J. Lillford (Eds), *Foods material science. Principles and Practice*. (pp. 632). New York, USA: Springer Science+Business Media.

- Liu, R.H. (2007). Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 207-219.
- Liu, Y., Hsieh, F., Heymann, H., & Huff, H.E. (2000). Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science*, 65(7), 1253-1259.
- López-Martínez, L.X., Parkin, K.L., & García, H.S. (2011). Phase II-Inducing, polyphenols content and antioxidant capacity of corn (*Zea mays* L.) from phenotypes of white, blue, red, and purple colors processed into masa and tortillas. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(1), 41-47.
- Lusas, W.E. & Rooney, W.L. (2001). Snack Foods Processing. En L.W. Rooney (Ed.). (pp. 639). PA, USA: Technomic Publishing CO. Inc. y Lancaster-Basel.
- Maga, J.A. (1978). Cis-trans fatty acids ratios as influenced by product and temperature of extrusion cooking. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 11(4), 183-184.
- Maga, J. & Liu, M.B. (1993). Hopi blue corn extrusion. *Developments in Food Science*, 32, 983-986.
- Maldo, P.A., & Conti-Silva, C. (2014). Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, 121, 9-14.
- Martínez-Bustos, Figueroa, J.D.C., Sánchez-Sinencio, F., González-Hernández, J. Martínez, M.J.L., & Ruiz, T.M. (1996). Method for the preparation of instant fresh corn dough or masa. US Patent 5,532,013.
- Martínez, B.F., Chang, Y.K., Bannwart, A.C., Rodríguez, M.E., Guedes, P.A., & Gaiotti, E.R. (1998). Effects of calcium hydroxide and processing conditions on corn meal extrudates. *Cereal Chemistry*, 75(6), 796-801.
- Martínez-Flores, H.E., Martínez-Bustos, F., Figueroa, C.J.D., & González, H.J. (2006). Studies and biological assays in corn tortillas made from fresh masa prepared by extrusión and nixtamalization processes. *Journal of Food Science*, 67(3), 1196-1199.
- Masuoka, N., Matsuda, N., & Kubo, I. (2012). Characterisation of the antioxidant activity of flavonoids. *Food Chemistry*, 131(2), 541-545.
- Mathew, M.J., Hosney, C.R., & Faubion, M.J. (1999). Effects of corn sample, mill type and particle size on curl and pet food extrudates. *Cereal Chemistry*, 76(5), 621-624.
- Mazza, G., & Miniati, E. (1993). Anthocyanins in fruits, vegetables, and grains. London, UK: CRC Press.

- Medeiros, V.R., Mestdagh, F., Van Poucke, C., Kerkaert, B., De Muer, N., Denon, Q., Van Peteghem, C., & De Meuleaner, B. (2011). Implementation of acrylamide mitigation strategies on industrial production of french fries: Challenges and Pitfalls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 898-906.
- Mendoza-Díaz, S., Ortiz-Valerio, M.C., Castaño-Tostado, E., Figueroa-Cárdenas, J.D., Reynoso-Camacho, R., Ramos-Gómez, M., Campos-Vega, R., & Loarca-Piña, G.F. (2012). Antioxidant capacity and antimutagenic activity of anthocyanin and carotenoid extracts from nixtamalized pigmented creole maize races (*Zea mays* L.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(4), 442-449.
- Menis, M.E.C., Milani, T.M.G., Jordano, A., Boscolo, M., & Conti-Silva, A.C. (2013). Extrusion of flavored corn grits: Structural characteristics, volatile compounds retention and sensory acceptability. *LWT - Food Science and Technology*, 54(2), 434-439.
- Mercado, P.E.B., Morales-Sánchez, E., Reyes, V.M., Gaytán, M.M., Ortega, M.J.A. (2013). Effects of a low-shear transport system on the physicochemical characteristics of nixtamal corn flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, DOI: 10.1111/jfpp.12094.
- Milán, C.J., Gutiérrez, D.R., Perales, S.J.Z.K., Cuevas, R.E.O., Ramírez, W.B. & Reyes, M.C. (2006). The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *Journal of Food Science and Technology*, 41(7), 727-736.
- Min, B., Gu, L., McClung, A.M., Bergman, C.J., & Chen, M.H. (2012). Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours. *Food Chemistry*, 133(3), 715-722.
- Mishra, D.K., Dolan, K.D., & Yang, L. (2008). Confidence intervals for modeling anthocyanin retention in grape pomace during nonisothermal heating. *Journal of Food Science*, 73(1), E9-E15.
- Montgomery, D.C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. (2ª ed.). México DF: Limusa S.A. de C.V. y Grupo Noriega Editores.
- Mora, A. (2000). Diseños de tratamientos aplicados a ensayos de propagación *in vitro* con cultivos de tejidos vegetales. En M.T. Vielma (Ed.), *Cultivos de Tejidos Vegetales* (95-111). Mérida: Manual de Laboratorio.
- Mora-Rochin, S., Gutiérrez-Urbe, J.A., Serna-Saldívar, S.O., Sánchez- Peña, P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization cooking. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502-508.

Murray, D.G., Marotta, N.G., & Boettger, R.M. (1968). Method of making cereal product. US Patent 3,407,070.

Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2009). Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments. (3^a ed.) New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc.

Nakatani, N., Fukuda, H., & Fuwa, H. (1979). Major anthocyanins of Bolivian purple corn (*Zea mays* L.). *Agricultural and Biological Chemistry*, 43, 389-391.

Narváez-González, E.D., Figueroa-Cárdenas, J.D., Taba, S., Castaño, T.E., Martínez, P.R.A., & Rincón, S.F. (2006). Relationships between the microstructure, physical features, and chemical composition of different maize accessions from Latin America. *Cereal Chemistry*, 83(6), 595:604.

Nayak, B., Berrios, J.D.J., Powers, J.R., & Tang, J. (2011a). Thermal degradation of anthocyanins from purple potato (cv. purple majesty) and impact on antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(20), 11040-11049.

Nayak, B., Berrios, J.D.J., Powers, J.R., & Tang, J. (2011b). Effect of extrusion on the antioxidant capacity and attributes of expanded extrudates prepared from purple potato and yellow pea flour mixes. *Food Chemistry*, 76(6), C875-C883.

Núñez-Gastélum, J.A., Sánchez, M.D.I., López, C.J., Paseiro, L.R.S., Sanches, S.A.T., Costa, H.S., Aurrekoetxea, G.P., Angulo, I., & Soto, V.H. (2011). Evaluación físico-química de aceite pigmentado obtenido de la cabeza del camarón. *Grasas y Aceites*, 62(3), 321-327.

Oikonomou, N.A., & Krokida, M.K. (2012). Water absorption index and water solubility index prediction for extruded food products. *International Journal of Food Properties*, 15(1), 157-168.

Olkku, J., Hagqvist, A., & Linko, P. (1983). Steady-state modelling of extrusion cooking employing response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 2(2), 27-49.

Onwulata, C.I., & Konstance, R.P. (2006). Extruded corn meal and whey protein concentrate: Effect of particle size. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(4), 475-487.

Paliwal, L. R. & Granados, G. (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Roma: Colección FAO: Producción y Protección Vegetal. No. 28. <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm>

Pamies, B.V., Roudaut, G., Dacremont, C., Meste, M.L., & Mitchell, J.R. (2000). Understanding texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(11), 1679-1685.

- Pan, Z., Zhang, S., & Jane, J. (1998). Effects of extrusion variables and chemicals on the properties of starch-based binders and processing conditions. *Cereal Chemistry*, 75(4), 541-546.
- Patras, A., Brunton, N.P., O'Donell, C., & Tiwari, B.K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trend in Food Science & Technology*, 21(1), 3-11.
- Pedreschi, R. & Cisneros C.L. (2007). Phenolic profiles of Andean purple corn (*Zea mays* L.). *Food Chemistry*, 100(3), 956-963.
- Platt, L.L.C., Ramírez, W.B., Torres, C.P.I., López, C.J., Sánchez, M.D.I., Reyes, M.C., Milán, C.J., & Morales, R.I. (2010). Improving textural characteristics of tortillas by adding gums during extrusion to obtain nixtamalized corn flour. *Journal of Texture Studies*, 41(5): 736-755.
- Ragae, S., Seetharaman, K., & Abdel-Aal, E.S. (2014). Impact of milling and thermal processing on phenolic compounds in cereal grains. *Critical Reviews of Food Science and Nutrition*, 54(7), 837-849.
- Riaz, N.M. (2000). *Extruders in Food Applications*. (pp. 225). Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster.
- Rhim, J.W. (2002). Kinetics of thermal degradation of anthocyanin pigment solutions driven from red flower cabbage. *Food Science and Biotechnology*, 11(4), 361-364.
- Reyes, C.P. (1990). *El maíz y su cultivo*. (1ª ed.). México: AGT.
- Robin, F., Schuchmann, H.P., & Palzer, F. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 28(1), 23–32.
- Ruiz-Torres, N.A., Rincón-Sánchez, F., Hernández, L.V.M., Figueroa, C.J.D., & Loarca-Piña, M.G. (2008). Determinación de compuestos fenólicos y su actividad antioxidante en granos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3), 29-34.
- Ryu, G.H., & Ng, P.K.W. (2001). Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch Stärke*, 53(3-4), 147-154.
- Sadilova, E., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Thermal degradation of acylated and nonacylated anthocyanins. *Journal of Food Science*, 71(8), C504-C512.
- Sahai, D., Buendia, O.M., & Jackson, S.D. (2001). Analytical techniques for understanding nixtamalized corn flour: Particle size and functionality relationships in a masa flour sample. *Cereal Chemistry*, 78(1), 14-18.
- Salinas, M.Y., Martínez-Bustos, F., Soto-Hernández, M., Ortega- Paczka, R., & Arellano-Vázquez, J.L. (2003). Efecto de la nixtamalización sobre las antocianinas de granos pigmentados. *Agrociencia*, 37(6), 617-628.

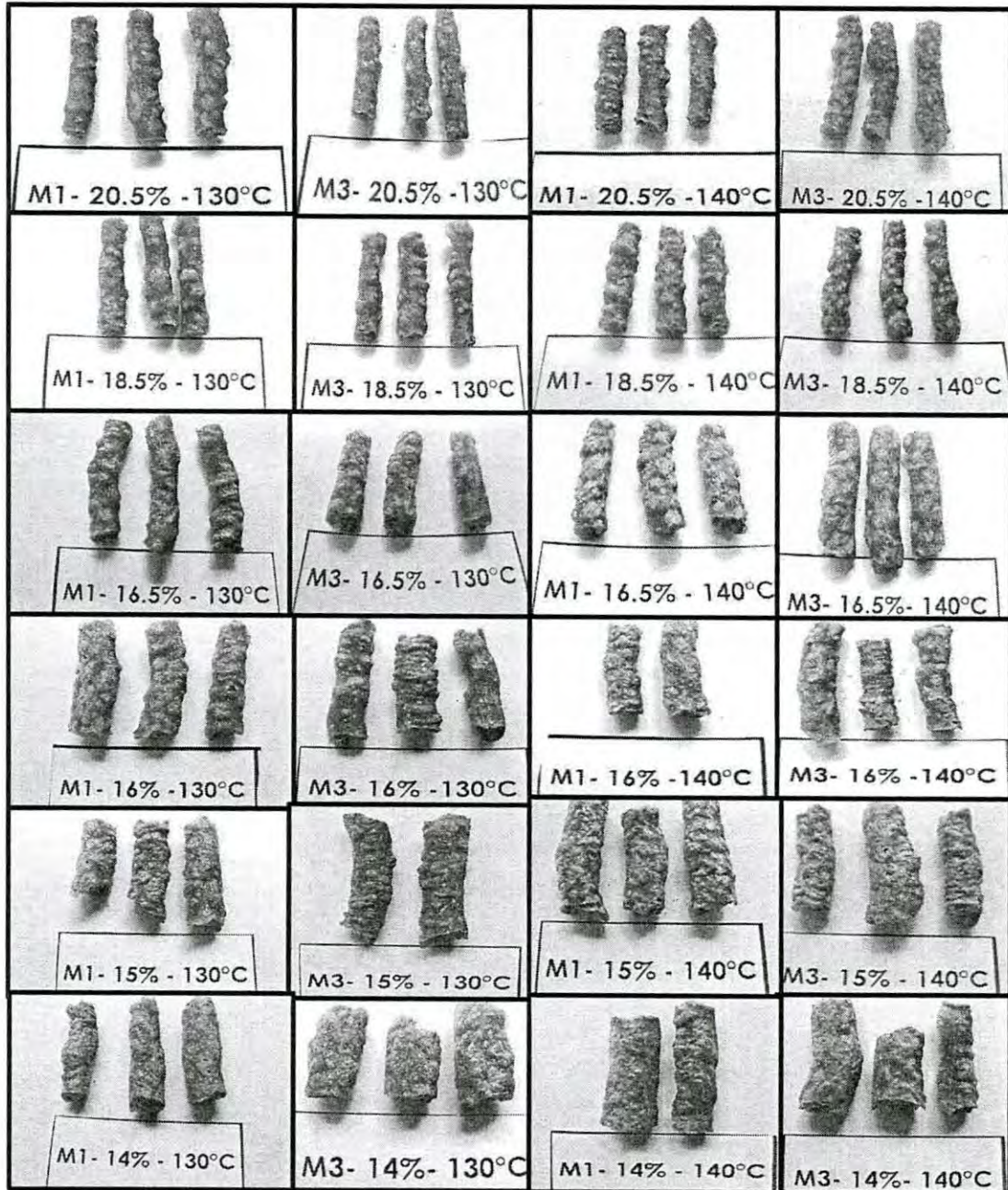
- Salinas, M.Y., López, R.J.J., González, B.G.F., & Vázquez, G.C. (2007). Compuestos fenólicos del grano de maíz y su relación con el oscurecimiento de masa y tortilla. *Agrociencia*, 41(3), 295-305.
- Salinas, M.Y., Soria, R.J., & Espinosa, T.E. (2010). Aprovechamiento y distribución de maíz azul en el Estado de México (1ª ed.). Texcoco, Edo. de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Salinas, M.Y., Cruz, C.F.J., Díaz, O.S.A., & Castillo, G.F. (2012). Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 33-41.
- Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez, M.N., Pineda, S.V., Cristiani, U.E., Juárez, J.C., Ruíz, O.N., & Galíndez, M.J. (2003). Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage bioreactor. *Journal of Environmental Science*, 2(5), 401-406.
- Sánchez, G.J., Goodman, M.M. & Stuber, C.W. (2000). Isoenzymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany*, 54(1), 43-59.
- Sánchez-Madriral, M.A., Quintero-Ramos, A., Martínez-Bustos, F., Meléndez-Pizarro, C.O., Ruíz-Guitérrez, M.G., Camacho-Dávila, A., Torres-Chávez, P.I. & Ramírez-Wong, B. (2014). Effect of different calcium sources on the bioactive compounds stability of extruded and nixtamalized blue maize flours. *Journal of Food Science and Technology*, DOI: 10-1007/s13197-014-1307-9.
- Seeram, N.P., Bourquin, L.D., & Nair, M.G. (2001). Degradation products of cyanidin glycosides from tart cherries and their bioactivities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4924-4929.
- Serna, S.S.O. (2009). Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. (pp. 521). México, DF: AGT.
- Serna, S.S.O. (2003). Manufactura y Control de Calidad de Productos Basados en Cereales. 1ª Ed. (pp. 340). México, DF: AGT, S.A.
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2014). <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42(8), 916-929.
- Singh, S.K., & Singh, N. (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chemistry*, 101(4), 1299-1507.
- Stanley, D.W. (1986). Chemical and structural determinants of texture fabricated foods. *Food Technology*, 12, 65-76.

- Stintzing, F.C., Stintzing, A.S., Carle, R., Frei, B., & Wrolstad, R. E. (2002). Color and antioxidant properties of cyanidin-based anthocyanin pigments. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50(21), 6172-6181.
- Strack, D. & Wray, V. (1989). Anthocyanins. En H.B. Harborne (Ed.), *Methods in plant biochemistry*. (pp. 325-356). New York, USA: Academic Press.
- Strahm, B.S. (2000). Preconditioning. En N.M. Riaz (Ed.), *Extruders in Food Applications*. (pp. 115). Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster.
- Sturtevant, E.L. (1899). Varieties of corn. *USDA Office Experimental Station Bulletin*, 57, 1- 108.
- Thymi, S., Krokida, M.K., Pappa, A., & Maroulis, Z.B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering*, 68(4), 519-526.
- Vasanthan, T., Yeung, J., & Hoover, R. (2001). Dextrinization of starch in barley flours with thermostable alpha-amylase by extrusion cooking. *Starch Stärke*, 53(12), 616-622.
- Vickers, M.Z., & Bourne, M.C. (1976). A physicoacoustical theory of crispiness. *Journal of Food Science*, 41(5), 1158-1164.
- Von Elbe, J. H., & Schwartz, S.J. (1996). Colorants. En O. R. Fennema (Ed.), *Food chemistry*. (pp. 651-722). New York, USA: Marcel Dekker, Inc.
- Whalen, P.J., Bason, M.L., Booth, R.I., Walker, C.E., & Williams, P.J. (1997). Measurement of extrusion effects by viscosity profile using the rapid ViscoAnalyser. *Cereal Foods World*, 42(6), 469-475.
- Watson, S.A. (1987). Corn marketing, processing and utilization. En G.F. Sprague & J.W. Dudley (Eds.), *Corn and Corn Improvement*. (pp. 881-894). Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc.
- Watson, S.A. & Ramstad, P.E. (1987). Corn: Chemistry and Technology. (pp. 892). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists Inc.
- Wilkes, H.G. (1989). Maize: domestication, racial evolution and spread. En D.R. Harris & G.C. Hillman (Eds.), *Forage and Farming*. (pp. 440-454). London, UK: Unwin Hyman.
- Yang, Z., Chen, Z., Yuan, S., Zhai, W., & Piao, X. (2009). Extraction and identification of anthocyanins from purple corn (*Zea mays* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 44(12), 2485-2492.

- Yoshida, K., Okuno, R., Kameda, K., & Kondo, T. (2002). Prevention of UV-light induced E,Z-isomerization of caffeoyl residues in the diacylated anthocyanin, gentiodelphin, by intramolecular stacking. *Tetrahedron Letters*, 43(35), 6181–6184.
- Yue, X., & Xu, Z. Changes of anthocyanins, anthocyanidins, and antioxidant activity in bilberry extract during dry heating. *Food Chemistry*, 73(6), C494-C499.
- Zazueta-Morales, J.J., Martínez-Bustos, F., Jacobo-Valenzuela, N., Ordorica-Falomir, C., & Paredes-López, O. (2001). Effect of the addition of calcium hydroxide on some characteristics of extruded products from blue maize (*Zea mays* L.) using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(14), 1379-1386.
- Zambraro-Zaragoza, M.L., Gutiérrez-Cortés, E., Jiménez-Vieyra, M.E., Gallardo-Navarro, Y.T., Cornejo-Villegas, M.A., & Quintanar-Guerrero, D. (2013). Effects of extrusion process in snacks of oats–nixtamalized corn pericarp mixtures on dietary fiber content and functional properties. *CyTA-Journal of Food*, 2013, 11(S1), 38-45.
- Zhang, W. & Hosney, R.C. (1998). Factors affecting expansion of corn meals with poor and good expansion properties. *Cereal Chemistry*, 75(5), 639-643.
- Zeng, J., Gao, H., Li, G., & Liang, X. (2011). Extruded corn flour changed the functionality behavior of blends. *Czech Journal of Food Science*, 29(5), 520-527.
- Zhao, X., Corrales, M., Zhang, C., Hu, X., Ma, Y., & Tauscher, B. (2008). Composition and thermal stability of anthocyanins from Chinese purple corn (*Zea mays* L.). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 56(22), 10761-10766.





















ANEXO 1

Extrudidos Expandidos Obtenidos en la Primera Etapa de la Investigación



ANEXO 2

Extrudidos Expandidos Obtenidos en la Segunda Etapa de la Investigación

			
Tx 1 HA 23 %, 130°C, 0.13 % Ca(OH) ₂	Tx 6 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 11 HA 19 %, 150°C, 0.13 % Ca(OH) ₂	Tx 16 HA 21.38 %, 118°C, 0.20 % Ca(OH) ₂
			
Tx 2 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 7 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 12 HA 21.38 %, 142°C, 0.20 % Ca(OH) ₂	Tx 17 HA 21.38 %, 118°C, 0.05 % Ca(OH) ₂
			
Tx 3 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 8 HA 19 %, 130°C, 0 % Ca(OH) ₂	Tx 13 HA 21.38 %, 142°C, 0.05 % Ca(OH) ₂	Tx 18 HA 16.62 %, 118°C, 0.20 % Ca(OH) ₂
			
Tx 4 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 9 HA 19 %, 130°C, 0.25% Ca(OH) ₂	Tx 14 HA 16.62 %, 142°C, 0.05 % Ca(OH) ₂	Tx 19 HA 16.62 %, 118°C, 0.05 % Ca(OH) ₂
			
Tx 5 HA 19 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 10 HA 15 %, 130°C, 0.13% Ca(OH) ₂	Tx 15 HA 16.62 %, 142°C, 0.20 % Ca(OH) ₂	Tx 20 HA 19 %, 110°C, 0.13 % Ca(OH) ₂

ANEXO 3

Artículo de Revisión

Artículo de Revisión

Rev. Fitotec. Mex. Vol. 36 (4): 429 - 437, 2013

LA NIXTAMALIZACIÓN Y SU EFECTO EN EL CONTENIDO DE ANTOCIANINAS DE MAÍCES PIGMENTADOS, UNA REVISIÓN

THE NIXTAMALIZATION PROCESS AND ITS EFFECT ON ANTHOCYANIN CONTENT OF PIGMENTED MAIZE, A REVIEW

Anayansi Escalante-Aburto¹, Benjamín Ramírez-Wong^{1*}, Patricia I. Torres-Chávez¹, J. Manuel Barrón-Hoyos¹, Juan de Dios Figueroa-Cárdenas² y Jaime López-Cervantes³

¹Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n. Apdo. Postal 1658, 83000, Hermosillo, Sonora. Tel y Fax 01 (662) 259-2207. ²Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV, Unidad Querétaro). Libramiento Norponiente 2000, Fracc. Real de Juriquilla, 76230, Querétaro, Qro. ³Centro de Investigación e Innovación en Biotecnología Agropecuaria, Instituto Tecnológico de Sonora, Calle 6 de Abril esquina Chihuahua, Unidad Centro, 85130, Ciudad Obregon, Sonora.

*Autor para correspondencia (bramirez@quaymas.uson.mx)

RESUMEN

El objetivo de esta revisión es compilar el conocimiento disponible acerca del contenido y los tipos de antocianinas identificadas en diferentes variedades de maíces (*Zea mays* L.) pigmentados. Principalmente, se pretende identificar el efecto en estos compuestos causado por la nixtamalización tradicional, y especificar los estudios desarrollados con tecnologías alternativas de nixtamalización para disminuir los efectos negativos en la calidad funcional del producto final. El uso de maíces pigmentados se ha incrementado debido al contenido superior de compuestos fenólicos, sobre todo por su contenido de antocianinas. Las antocianinas son los compuestos responsables del color rojo-azul de plantas como el maíz, y poseen propiedades antioxidantes beneficiosas para la salud. Estos pigmentos se encuentran en la capa de aleurona del endospermo y en el pericarpio del grano. Las antocianinas no aciladas de mayor abundancia en los maíces pigmentados son cianidina 3-glucosido (70 %), pelargonidina 3-glucosido y peonidina 3-glucosido, las cuales poseen una alta capacidad antioxidante. En general, los maíces de variedades de color morado, azul y negro son las que contienen más antocianinas. La nixtamalización tradicional es un proceso agresivo para las antocianinas contenidas en los granos pigmentados, ya que provoca pérdidas hasta de 100 % en los productos obtenidos por esta tecnología. No obstante, se puede retener una mayor cantidad de compuestos fenólicos, antocianinas y mayor capacidad antioxidante en productos obtenidos con nixtamalización por extrusión y nixtamalización fraccionada, los cuales son procesos alternativos eficientes a la nixtamalización tradicional. Sin embargo, son necesarias más investigaciones que permitan disminuir la pérdida de estos compuestos naturales útiles para la obtención de nuevos productos nutraceuticos desarrollados con maíces pigmentados.

Palabras clave: *Zea mays*, grano pigmentado, antocianinas, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante, nixtamalización, extrusión.

SUMMARY

The purpose of this review is to compile available knowledge on content and anthocyanin type in different pigmented maize (*Zea mays* L.) varieties. Additionally, the effects of traditional nixtamalization processing on these compounds are listed, and the studies performed to reduce the negative effects of traditional nixtamalization are described. The use of pigmented maize varieties has increased due to their high phenolic compound content, mainly anthocyanins. These compounds

are responsible for the blue-red color in plants like maize, and they have antioxidant capacity. Anthocyanins are contained in the aleurone layer at the endosperm and in the pericarp of corn kernels. The non-acyl type anthocyanins, such as cyanidin 3-glucoside, pelargonidin 3-glucoside and peonidin 3-glucoside are the most abundant compounds in colored maize; they have high antioxidant capacity. Generally, maize varieties with blue, purple and black color kernels contain the highest anthocyanin contents. Traditional nixtamalization processing is highly aggressive for anthocyanins in maize; it causes anthocyanin losses of up to 100 % during traditional nixtamalization. However, alternative processes of nixtamalization, such as lime-cooking extrusion and fractionated nixtamalization can have higher anthocyanin and phenolic content retention. These newer nixtamalization processes can be more efficient than traditional nixtamalization. Nonetheless, more research is needed to further reduce losses of these natural compounds, which are useful for obtaining new nutraceutical products from pigmented maize varieties.

Index words: *Zea mays* pigmented kernels, anthocyanins, phenolic compounds, antioxidant capacity, nixtamalization, extrusion.

INTRODUCCIÓN

Maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y arroz (*Oryza sativa* L.) son los cereales más importantes del mundo, entre los cuales el maíz constituye la base de la alimentación para la mayor parte de los países en desarrollo. El maíz pertenece a la especie *Zea* de la familia de las gramíneas, y es una planta anual dotada de un amplio sistema radicular fibroso (FAO, 1993). La producción mundial anual de este cereal es de 800 millones de toneladas, y los principales productores son Estados Unidos, China, Brasil, Argentina, India, Francia e Indonesia (Singh *et al.*, 2011). En México la producción de maíz en el año 2012 fue de 22 069 254 t (SIAP, 2013). Sin embargo, actualmente no se cuenta con estadísticas oficiales acerca de la producción nacional y mundial de los maíces de color; solamente a nivel estatal existen datos reportados en Chiapas (Salinas *et al.*, 2012), Estado de México (Salinas *et al.*, 2010), Sinaloa y Tlaxcala (Agama-Acevedo *et al.*, 2011).

Recibido: 13 de Diciembre del 2011
Aceptado: 22 de Julio del 2013

ANEXO 4

Artículo Experimental Publicado

CyTA – Journal of Food, 2013
Vol. 11, No. S1, 29–37, <http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2013.764929>



Effect of extrusion processing parameters on anthocyanin content and physicochemical properties of nixtamalized blue corn expanded extrudates

Efecto de los parámetros de extrusión en el contenido de antocianinas, y propiedades fisicoquímicas de extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul

A. Escalante-Aburto^a, B. Ramírez-Wong^{a*}, P.I. Torres-Chávez^a, J.D. Figueroa-Cárdenas^b, J. López-Cervantes^c, J.M. Barrón-Hoyos^a and I. Morales-Rosas^a

^aDepartamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, Sonora, México; ^bCentro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV – Unidad Querétaro), Querétaro, Qro., México; ^cCentro de Investigación e Innovación en Biotecnología Agropecuaria, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora, México

(Received 1 October 2012; final version received 7 January 2013)

Nixtamalized blue corn expanded extrudates were elaborated in a single screw extruder using feed moisture (FM) of 14, 15, 16, 16.5, 18.5 and 20.5%; ground corn with different particle size indexes (PSI, 83.97 and 94.15), and at a final extruder temperature of 130 and 140°C. The physicochemical properties of extrudates evaluated were moisture content, total anthocyanin and cyanidin 3-glucoside (C3G) content, color, density and expansion index. Extrudates processed at 16 and 16.5% of FM showed higher total anthocyanin and C3G contents. The extrudates processed with 16% FM, at 130°C and PSI of 83.97, showed the highest total anthocyanin content (211.1 mg kg⁻¹). Cyanidin 3-glucoside showed an increase (11.3%) in extrudates when compared with raw corn. The expansion index was higher for those made with FMs of 14, 15, 16 and 16.5%. The total anthocyanin and C3G contents were not correlated with any other parameter.

Keywords: blue corn; particle size; extrusion; anthocyanins

Se elaboraron extrudidos expandidos nixtamalizados de maíz azul con un extrusor de tornillo simple bajo las siguientes condiciones: humedad de alimentación: 14, 15, 16, 16.5, 18.5 y 20.5%, maíz con diferente índice de tamaño de partícula (ITP, 83.97 y 94.14); y temperatura final del extrusor: 130 y 140°C. Se evaluaron las siguientes propiedades fisicoquímicas en los extrudidos: humedad, contenido de antocianinas totales y contenido de cianidina 3-glucosido, color, densidad e índice de expansión. Los extrudidos procesados con humedad de alimentación 16 y 16.5%, mostraron los valores más elevados de antocianinas totales y cianidina 3-glucosido. El tratamiento con humedad de alimentación 16%, 130°C y un ITP de 83.97, presentó los valores más altos de antocianinas totales (211.1 mg kg⁻¹). La cianidina 3-glucosido mostró un incremento del 11.3% en los extrudidos comparados con el maíz crudo. El índice de expansión fue mayor a humedades de alimentación 14, 15, 16 y 16.5%. Las antocianinas totales y la cianidina 3-glucosido no correlacionaron con ninguna otra evaluación.

Palabras clave: maíz azul; tamaño de partícula; extrusión; antocianinas

Introduction

Extrusion technology has been widely used by food industries to obtain a variety of products (Harper & Clark, 1979). Extruded products are commonly obtained from starchy materials, especially cereal grains such as corn, sorghum and rice. This process also has been used as an alternative method for the production of nixtamalized products (snacks and corn flours). Recently, many studies have been developed to produce healthier products to counteract chronic-degenerative diseases (Alavi, Karkle, Adhikari, & Keller, 2011; Gupta, Sing, & Dutt, 2008; Milan, Valdez, Gutierrez, Cardenas, & Mora, 2007; Nayak, Hai, Berros, Tang, & Denito, 2011; Rocha, Gallegos, Gonzalez, Bello, & Delgado, 2008). To obtain food products with improved nutritional properties and health benefits, whole grains have been used. Phenolic compounds, mainly of the group of flavonoids denominated anthocyanins, are present in high concentrations in pigmented corns (De Pascual, Santos, & Rivas, 2002). These molecules

are contained in the pericarp, aleurone layer and between the endosperm of the corn grains (Betran, Bockholt, & Rooney, 2001). These compounds give in the pigmented corns, products with additional nutritional value. The anthocyanins contained in blue corn are cyanidin 3-glucoside (C3G), cyanidin 3-galactoside, pelargonidin 3-glucoside and malvidin 3-glucoside (González et al., 2008).

In Mexico and Central America, corn is mostly processed by *nixtamalization*, a thermic-alkaline treatment that includes the addition of calcium hydroxide (lime) to improve the taste of the products (table tortillas, tortilla chips, tamales and snack foods). However, this process requires large amounts of water and long steeping times. Nixtamalized snacks are widely consumed in many Latin-American countries and in the United States. Nixtamalized extruded snacks and similar products are made from alkaline-treated flours (Pfaff et al., 2010). As an alternative method to obtain products with similar characteristics, extrusion has been used as a high-

*Corresponding author. Email: bramirez@guaymas.uson.mx

ANEXO 5

Artículo Experimental Enviado

Cereal Chemistry



Optimization of Extrusion Process to Obtain an Expanded Nixtamalized Corn Snack with Anthocyanins

Journal:	<i>Cereal Chemistry</i>
Manuscript ID:	CCHEM-03-14-0040-R
Manuscript Type:	Research
Date Submitted by the Author:	05-Mar-2014
Complete List of Authors:	Escalante-Aburto, Anayansi; Universidad de Sonora, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos Ramirez-Wong, Benjamin; Universidad de Sonora, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos Torres, Patricia; Universidad de Sonora, Investigación y Posgrado en Alimentos López-Cervantes, Jaime; Instituto Tecnológico de Sonora, Centro de Investigación e Innovación en Biotecnología Agropecuaria Gutierrez-Dorado, Roberto; Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas Figueroa, Juan de Dios; Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Querétaro Barrón-Hoyos, Jesus; Universidad de Sonora, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos Ponce-García, Nestor; UAEM Campus Universitario "El Cerrillo", Morales-Rosas, Ignacio; Universidad de Sonora, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos Márquez-Meléndez, Rubén; Universidad Autónoma de Chihuahua,
Area of Expertise:	Corn (maize), Extrusion

SCHOLARONE[®]
Manuscripts

1
2
3
4 1 Optimization of Extrusion Process to Obtain an Expanded Nixtamalized Corn Snack with
5
6 2 Anthocyanins
7
8
9 3

10 4 Anayansi Escalante-Aburto¹, Benjamín Ramírez-Wong^{1,2}, Patricia Isabel Torres-Chávez¹, Jaime
11
12 López-Cervantes³, Roberto Gutiérrez-Dorado⁴, Juan de Dios Figueroa-Cárdenas⁵, Jesús Mammel
13
14 Barrón-Hoyos¹, Néstor Ponce-García^{1,6}, Ignacio Morales-Rosas¹, Rubén Márquez-Meléndez⁷
15
16
17 7

18
19 8
20
21 9
22
23 11 ¹Programa de Doctorado en Ciencias de los Alimentos, Universidad de Sonora, Sonora, México.
24
25 12 ²Corresponding author. Phone/Fax: +52 (662) 259 22 07. E-mail: bramirez@guaymas.uson.mx
26
27 13 ³Centro de Investigación e Innovación en Biotecnología Agropecuaria, Instituto Tecnológico de
28
29 14 Sonora, Sonora, México.
30
31 15 ⁴Programa Regional del Noroeste para el Doctorado en Biotecnología, Universidad Autónoma
32
33 16 de Sinaloa, Sinaloa, México.
34
35 17 ⁵Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV- Unidad Querétaro), Querétaro,
36
37 18 México.
38
39 19 ⁶UAEM Campus Universitario "El Cerrillo", El Cemillo Piedras Blancas S/N, Toluca Edo. de
40
41 20 México.
42
43 21 ⁷Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.
44
45
46
47
48
49
50
51
52

1
2
3
4 24 ABSTRACT
5
6
7 25 Extrusion is an alternative technology for the production of nixtamalized products. The objective
8
9 26 of this study was to produce an expanded nixtamalized snack, with whole blue corn using the
10
11 27 extrusion process, to preserve the highest possible total anthocyanin content, intense blue purple
12
13 28 coloration (color *b*) and the highest expansion index. A central composite experimental design
14
15 29 was used, the extrusion process factors were: feed moisture (FM, 15-23%), calcium hydroxide
16
17 30 concentration (CHC, 0-0.25%) and final extruder temperature (T, 110-150°C). The chemical and
18
19 31 physical properties evaluated in the extrudates were moisture content (MC%), total anthocyanins
20
21 32 (TA mg·kg⁻¹), color (*L*, *a*, *b*) and expansion index (EI). An ANOVA and surface response
22
23 33 methodology were applied to evaluate the effects of the extrusion factors. FM and T significantly
24
25 34 affected the response variables. An optimization step was performed by overlaying 3 contour
26
27 35 plots to predict the best combination region. The extrudates were obtained under the following
28
29 36 optimum factors: FM(%)=16.94, CHC(%)=0.095 and T(°C)=141.89. The predicted extrusion
30
31 37 processing factors were highly accurate, yielding an expanded nixtamalized snack with 158.87
32
33 38 mg·kg⁻¹ TA (estimated: 160 mg·kg⁻¹), an EI of 3.19 (estimated: 2.66), and color parameter *b* of -
34
35 39 0.44 (estimated: 0.10).
36
37
38
39
40
41
42