



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Desarrollo de Botanas Saludables de Segunda Generación
Producidas por Extrusión a Partir de Mezclas de Harinas de
Maíz Azul (*Zea mays* L.) y Amaranto (*Amaranthus
hypochondriacus* L.)**

TESIS

que presenta

IBQ. Carlos Francisco Ramos Ferra

como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ciencia

y

Tecnología de Alimentos

Directores

Dr. Roberto Gutiérrez Dorado

Dra. Janitzio Xiomara Korina Perales Sánchez

Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

Agosto 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas en la Universidad Autónoma de Sinaloa por permitirme realizar mis estudios de maestría

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONHACYT) por brindarme la beca que financió mis estudios en el periodo 2022-2024.

Agradezco especialmente a mis directores de tesis Dr. Roberto Gutiérrez Dorado y Dra. J. Xiomara K. Perales Sánchez por permitirme trabajar en el Laboratorio de Bioprocesos y Alimentos funcionales, y guiarme con paciencia y empatía durante esta etapa. Sin duda alguna, han sido quienes más me inspiran a seguir adelante y a no rendirme nunca. Gracias por su apoyo incondicional y enseñanzas.

A mis asesores Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos, Dra. Jennifer Vianey Félix Medina y Dra. Evangelina García Armenta por formar parte de este proyecto, asesorarme cuando los necesité y por la confianza que me brindaron.

A mis compañeros de generación Ernesto, Greysel, Alejandra, Diana, Karen y Jennifer por todos los momentos que compartimos juntos durante nuestros estudios, que sin duda me dieron la felicidad, confianza y determinación que necesitaba para continuar adelante.

A quienes han sido mis compañeros y amigos en el laboratorio de bioprocesos y alimentos funcionales: Ana, Zaida, Lizbeth, Francisco, Fernanda, Marco, Dulce, Jose, Juan Manuel, Dajanara, Diana, Luis, Dana y Fernando, por hacer alegres los días en el laboratorio, y por permitirme contar con ellos cuando necesité de su apoyo y asesoría.

A mis profesores, compañeros y amigos del posgrado: Dra. Karen, Dr. Caro, Dr. Marco César, Marco, Benjamín y Carmen por compartir conmigo sus áreas de trabajo y orientarme cuando los necesité.

Agradezco especialmente a Agustín por acompañarme, asesorarme y brindarme su apoyo durante esta etapa. Desde que lo conozco ha sido para mí un gran modelo a seguir por su dedicación y sabiduría, admiro su capacidad por superar tantos desafíos y aprecio mucho su amistad, paciencia y comprensión.

A mis padres, Juan Carlos y Flor, quienes han sido mis pilares y mayor apoyo. Gracias por cada sacrificio que han hecho para darme lo mejor, y gracias por su amor y orientación brindados en cada etapa de mi vida.

Finalmente agradezco a mi novia, Roxana, quien ha sido un gran soporte emocional durante esta etapa. Gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia, comprensión y capacidad de escucharme, por cada momento juntos y por apoyarme en mis metas y sueños.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE CUADROS	xvii
I. RESUMEN	1
ABSTRACT	2
II. INTRODUCCIÓN	3
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
A. ALIMENTOS BOTANA	5
1. Producción y consumo	5
2. Clasificación	5
a. Botanas de primera generación	5
b. Botanas de segunda generación	5
c. Botanas de tercera generación	6
3. Elaboración de botanas	6
4. Efectos en la salud	8
5. Botanas saludables	10
B. EXTRUSIÓN	10
1. Generalidades del procesamiento de granos	10
2. Procesamiento de alimentos por extrusión	11

3.	Componentes de un extrusor	11
4.	Clasificación de extrusores	12
a.	Extrusor de tornillo simple	12
b.	Extrusor de doble tornillo	12
5.	Efecto de la extrusión sobre el valor nutricional	13
a.	Carbohidratos	13
b.	Proteínas	13
c.	Lípidos	13
d.	Vitaminas	14
e.	Minerales	14
6.	Efecto de la extrusión sobre las propiedades nutracéuticas	14
C.	MAÍZ (<i>ZEA MAYS</i> L.)	15
1.	Características generales	15
a.	Origen	15
b.	Taxonomía	16
c.	Estructura del grano	16
1)	Pedicelo	16
2)	Pericarpio	16
3)	Endospermo	18

4)	Germen	18
d.	Estadísticas de producción	18
1)	Producción global	18
2)	Producción en México	20
e.	Razas de maíz en México	20
2.	Maíz azul	24
a.	Producción en México	24
b.	Composición química del grano	24
1)	Carbohidratos	24
2)	Fibra dietaria	24
3)	Proteínas	25
4)	Lípidos	25
5)	Minerales	25
6)	Vitaminas	26
c.	Fitoquímicos presentes	26
1)	Compuestos fenólicos	26
2)	Carotenoides	28
d.	Propiedades nutracéuticas	28
D.	AMARANTO (<i>AMARANTHUS HYPOCHONDRIACUS</i> L.)	30

1.	Origen	30
2.	Taxonomía	30
3.	Estadísticas de producción	32
a.	Producción global	32
b.	Producción en México	32
4.	Composición química	32
a.	Carbohidratos	32
b.	Fibra dietaria	32
c.	Proteína	35
d.	Lípidos	35
e.	Minerales	35
f.	Vitaminas	38
5.	Fitoquímicos presentes	40
a.	Compuestos fenólicos	40
b.	Betalaínas	40
c.	Carotenoides	40
d.	Saponinas y fitatos	42
6.	Valor e importancia nutricional	42
7.	Propiedades nutracéuticas	43

IV.	JUSTIFICACIÓN	44
V.	HIPÓTESIS	45
VI.	OBJETIVOS	46
A.	OBJETIVO GENERAL	46
B.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	46
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS	47
A.	MATERIALES	47
B.	MÉTODOS	47
1.	Caracterización de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	47
a.	Características físicas de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	47
1)	Dimensiones	47
2)	Peso de 1,000 semillas	47
3)	Peso hectolítrico	48
b.	Propiedades fisicoquímicas de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	48
1)	Diferencia total de color (ΔE)	48
2)	Actividad acuosa (a_w)	49

c.	Composición química de las semillas de Zea mays y Amaranthus hypochondriacus	49
1)	Humedad	49
2)	Proteína	50
3)	Lípidos	50
4)	Cenizas	50
5)	Fibra cruda	51
6)	Carbohidratos	51
d.	Caracterización nutricional de las semillas de Zea mays y Amaranthus hypochondriacus	52
1)	Digestibilidad proteínica in vitro	52
2)	Contenido de triptófano	52
e.	Caracterización antioxidante y fitoquímica de las semillas de Zea mays y Amaranthus hypochondriacus	53
1)	Actividad antioxidante	53
a)	Obtención de los extractos de compuestos fenólicos libres y ligados	53
b)	Determinación de actividad antioxidante (AAox) en extractos de compuestos fenólicos libres y ligados	54
2)	Contenido de compuestos fenólicos totales	55
3)	Contenido de flavonoides totales	55

4)	Contenido de antocianinas totales	56
2.	Proceso de optimización de extrusión para producir botanas extrudidas expandidas optimizadas a partir de maíz azul y amaranto	57
a.	Diseño experimental	57
b.	Preparación de las mezclas	58
c.	Proceso de extrusión	60
d.	Medición de las variables de respuesta	61
1)	Índice de expansión radial	61
2)	Densidad aparente	61
3)	Dureza	62
4)	Actividad antioxidante	62
5)	Contenido de compuestos fenólicos totales	62
6)	Contenido de flavonoides totales	62
7)	Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	63
e.	Análisis de varianza y regresión	63
f.	Optimización	65
3.	Caracterización de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO) a partir de diferentes mezclas de maíz azul y amaranto	66
a.	Obtención de las BEEO	66
b.	Características físicas, texturales y morfométricas de las BEEO	66

1)	Índice de expansión	66
2)	Densidad aparente	66
3)	Dureza	67
4)	Crispness / crunchiness	67
5)	Propiedades morfométricas	68
	a) Adquisición de imágenes con Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	68
	b) Análisis Digital de Imágenes (ADI)	68
	c) Dimensión Fractal de textura (D_{ft}) y lagunaridad (Λ_t)	69
c.	Características fisicoquímicas de las BEEO	69
	1) Diferencia total de color	69
	2) Actividad acuosa	70
d.	Composición química de las BEEO	70
	1) Humedad	70
	2) Proteína	70
	3) Lípidos	70
	4) Cenizas	70
	5) Fibra cruda	70
	6) Carbohidratos	71
e.	Características nutricionales de las BEEO	71

1)	Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	71
2)	Triptófano	71
f.	Propiedades antioxidantes y fitoquímicas de las BEEO	71
1)	Obtención de extractos de compuestos fenólicos libres y ligados	71
2)	Actividad antioxidante	71
a)	Determinación de actividad antioxidante por el método ABTS	71
b)	Determinación de actividad antioxidante por el método DPPH	72
3)	Contenido de compuestos fenólicos totales	72
4)	Contenido de flavonoides totales	73
5)	Contenido de antocianinas totales	73
g.	Evaluación sensorial de las BEEO	73
h.	Análisis estadístico	74
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
A.	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>ZEА MAYS</i> Y <i>AMARANTHUS</i> <i>HYPOCHONDRIACUS</i>	75
1.	Características físicas de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus</i> <i>hypochondriacus</i>	75
2.	Propiedades fisicoquímicas, composición química y características nutricionales de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	78
a.	Propiedades fisicoquímicas	78

b.	Composición química	80
c.	Características nutricionales	81
3.	Actividad antioxidante y caracterización fitoquímica de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i> .	82
a.	Actividad antioxidante	82
b.	Compuestos fenólicos totales	85
c.	Flavonoides totales	85
d.	Antocianinas totales	85
B.	ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (MSR) PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BOTANA EXTRUDIDA EXPANDIDA OPTIMIZADA A PARTIR DE MEZCLAS DE <i>ZEA MAYS</i> Y <i>AMARANTHUS HYPOCHONDRIACUS</i>	86
1.	Modelos de predicción de las variables de respuesta	86
a.	Índice de expansión radial	86
b.	Densidad Aparente	91
c.	Dureza	95
d.	Actividad antioxidante	97
e.	Compuestos Fenólicos totales	98
f.	Flavonoides totales	102
g.	Digestibilidad proteínica in vitro	104
2.	Condiciones óptimas de extrusión	106

a.	Optimización	106
b.	Validación	109
C.	CARACTERIZACIÓN DE BOTANAS EXTRUDIDAS EXPANDIDAS OBTENIDAS CON CONDICIONES OPTIMIZADAS DE EXTRUSIÓN	109
1.	Caracterización física, textural y morfométrica	109
a.	Índice de Expansión Radial	109
b.	Densidad Aparente	114
c.	Dureza	116
d.	Crispness y Crunchiness	117
e.	Propiedades morfométricas	118
2.	Caracterización fisicoquímica, química y nutricional	121
a.	Propiedades fisicoquímicas de las BEEO	125
b.	Composición química de las BEEO	125
c.	Características nutricionales de las BEEO	127
3.	Caracterización antioxidante y fitoquímica	129
a.	Actividad antioxidante	129
b.	Contenido de compuestos fenólicos totales	133
c.	Contenido de flavonoides totales	134
d.	Contenido de antocianinas totales	134
4.	Evaluación sensorial de textura	135

IX.	CONCLUSIONES	141
X.	BIBLIOGRAFÍA	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.	Descripción	Pág.
1.	Diagrama general de proceso para la elaboración de botanas saludables.	7
2.	Principales causas de muerte en México (INEGI 2024).	9
3.	Principales estados productores de maíz en México (SIAP 2018).	21
4.	Superficies sembradas de otros colores de maíz en México (SIAP 2018).	22
5.	Principales países productores de amaranto (Khan y col 2022).	33
6.	Producción de amaranto en México (Statista 2022).	34
7.	Modelo matemático de la "caja negra" que muestra la relación entre las variables de proceso y de respuesta del proceso de extrusión.	64
8.	Granos de a) maíz azul y b) amaranto empleados en el presente estudio.	77
9.	Gráficos de superficie de respuesta para Índice de Expansión Radial (IER) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)].	92

10. Gráficos de superficie de respuesta para Densidad Aparente (DA) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)]. 94
11. Gráficos de superficie de respuesta para Dureza (Du) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)]. 96
12. Gráficos de superficie de respuesta para Actividad Antioxidante (AAox) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)]. 99
13. Gráficos de superficie de respuesta para Compuestos Fenólicos Totales (CFT) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)]. 101
14. Gráficos de superficie de respuesta para Flavonoides Totales (FT) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)]. 103
15. Gráficos de superficie de respuesta para Digestibilidad Proteínica in vitro (DPIV) en función de las variables de

	proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)].	105
16.	Gráficos de deseabilidades individuales y global para las variables de respuesta [Índice de Expansión Radial (IER), Densidad Aparente (DA), Dureza (Du), Actividad Antioxidante (AAox), Compuestos Fenólicos Totales (CFT), Flavonoides Totales (FT) y Digestibilidad Proteínica in vitro (DPIV)] para determinar las condiciones óptimas de extrusión con los rangos de proceso completos.	107
17.	Gráficos de deseabilidades individuales y global para las variables de respuesta [Índice de Expansión Radial (IER), Densidad Aparente (DA), Dureza (Du), Actividad Antioxidante (AAox), Compuestos Fenólicos Totales (CFT), Flavonoides Totales (FT) y Digestibilidad Proteínica in vitro (DPIV)] para determinar las condiciones óptimas de extrusión con máxima HA.	108
18.	Botanas expandidas obtenidas por condiciones optimizadas de extrusión.	115
19.	Imágenes obtenidas por MEB de la estructura interna de las diferentes botanas mediante corte longitudinal.	120
20.	Imágenes obtenidas por MEB de la estructura interna de las diferentes botanas mediante corte transversal.	122

21.	Escala hedónica de 9 puntos empleada para evaluar sensorialmente las botanas para sus atributos de textura y aceptabilidad global.	136
22.	Calificación sensorial para textura y aceptabilidad global de las BEEO.	137
23.	Gráficos de puntuaciones asignadas al atributo de textura en relación con el número de evaluadores.	139
24.	Gráficos de puntuaciones asignadas al atributo de aceptabilidad global en relación con el número de evaluadores.	140

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1.	Taxonomía del maíz (<i>Zea mays</i> L.).	17
2.	Principales regiones productoras de maíz.	19
3.	Grupos y razas de maíces en México.	23
4.	Principales ácidos fenólicos contenidos en el maíz.	27
5.	Contenido de carotenoides (μg / 100 g, bs) en diferentes maíces.	29
6.	Taxonomía del amaranto (<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.)	31
7.	Contenido de aminoácidos esenciales en 100 g de amaranto.	36
8.	Contenido de minerales en 100 g de amaranto.	37
9.	Contenido de vitaminas en 100 g de amaranto.	39
10.	Contenido de fitoquímicos en la semilla de amaranto.	41
11.	Diseño experimental con las combinaciones de variables de proceso para la elaboración de botanas extrudidas expandidas (BEE) a partir de mezclas de maíz azul (Ma) y amaranto (Am).	58
12.	Características físicas de semillas de maíz azul y amaranto.	76

13.	Composición química y propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz azul y amaranto.	79
14.	Actividad antioxidante y caracterización fitoquímica de las semillas de <i>Zea mays</i> y <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	83
15.	Resultados experimentales obtenidos para las variables de respuesta evaluadas en botanas extrudidas expandidas (BEE) en función de las diferentes combinaciones de variables de proceso.	87
16.	Coeficientes de regresión y análisis de varianza para los modelos de predicción de las variables de respuesta estudiadas en función de las variables de proceso.	89
17.	Valores teóricos vs valores experimentales de las variables de respuesta evaluadas en las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO).	110
18.	Características físicas, texturales y morfométricas de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO).	112
19.	Características fisicoquímicas, químicas y nutricionales de las Botanas Extrudidas Expandidas Optimizadas (BEEO).	123
20.	Actividad antioxidante y contenido de fitoquímicos en las Botanas Extrudidas Expandidas Optimizadas (BEEO).	130

I. RESUMEN

Debido a la elevada demanda de alimentos tipo botana y al interés científico y social por elaborar este tipo de productos en presentación saludable con propiedades funcionales, se han desarrollado botanas a partir de granos enteros de maíz azul, chía, frijol, entre otras. En el presente trabajo se utilizó la metodología de superficie de respuesta y un diseño experimental central compuesto rotatable para optimizar las condiciones del proceso de extrusión [Temperatura de Extrusión (**TE** = 120 - 170 °C), Velocidad de Tornillo (**VT** = 50 - 240 rpm)] y el nivel de inclusión de harina de amaranto (**HA** = 0 - 70 %) a mezclas con maíz azul para la obtención de botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**) con propiedades físicas y texturales aceptables, y características nutricionales / antioxidantes altas. La optimización resultó en la obtención de dos **BEEO** con diferentes condiciones de proceso, las cuales se compararon contra una **BEEO** sin amaranto y una botana Control (fracciones ricas en almidón). Todas las **BEEO** presentaron valores aceptables de Índice de Expansión Radial (**IER** = 2.03 - 2.15), Densidad Aparente (**DA** = 0.19 - 0.23 g / cm³) y Dureza (**Du** = 10.46 - 12.90 N), y máximos valores de Actividad Antioxidante (**AAox** = 3916.6 - 4413.9 μmol ET / 100 g, bs), Compuestos Fenólicos Totales (**CFT** = 315.3 - 337.3 mg EAG / 100 g, bs), Flavonoides Totales (**FT** = 398.9 - 579.2 mg EQ / 100 g, bs) y Digestibilidad Proteínica *in Vitro* (**DPIV** = 71.45 - 80.36 %). Además, las **BEEO** exhibieron resultados similares o mejores en contenidos de proteína, cenizas y fibra cruda, así como también en crispness, crunchines, dimensión fractal de textura y lagunaridad en comparación a la botana **Control**.

Palabras clave: optimización, caracterización, nutricional, antioxidantes.

ABSTRACT

Due to the high demand for snack-type foods and the scientific and social interest in producing this type of products in a healthy presentation with functional properties, snacks have been developed from whole blue corn, chia and bean grains, among others. In the present work, the response surface methodology and a rotatable central composite experimental design were used to optimize the extrusion process conditions [Extrusion Temperature (**TE** = 120 - 170 °C), Screw Speed (**VT** = 50 - 240 rpm)] and the inclusion level of amaranth flour (**HA** = 0 - 70%) to mixtures with blue corn to obtain optimized expanded extruded snacks (**BEEO**) with acceptable physical and textural properties, and high nutritional / antioxidant characteristics. The optimization resulted in obtaining two **BEEO** with different process conditions, which were compared against a **BEEO** without amaranth and a **Control** snack (starch-rich fractions). All **BEEO** presented acceptable values of Radial Expansion Index (**IER** = 2.03 - 2.15), Apparent Density (**DA** = 0.19 - 0.23 g / cm³) and Hardness (**Du** = 10.46 - 12.90 N), and maximum values of Antioxidant Activity (**AAox** = 3916.6 - 4413.9 μmol ET / 100 g, ds), Total Phenolic Compounds (**CFT** = 315.3 - 337.3 mg EAG / 100 g, ds), Total Flavonoids (**FT** = 398.9 - 579.2 mg EQ / 100 g, ds) and *in Vitro* Protein Digestibility (**DPIV** = 71.45 - 80.36 %). In addition, the **BEEO** exhibited similar or better results in protein, ash and crude fiber contents, as well as in crispness, crunchiness, texture fractal dimension and lacunarity compared to the **Control** snack.

Keywords: optimization, characterization, nutritional, antioxidants.

II. INTRODUCCIÓN

Las botanas son un tipo de alimento preparado y más pequeño que se consume entre comidas y que sirve para proporcionar al cuerpo la mínima cantidad de energía y saciedad. Hoy en día, este tipo de alimento se ha vuelto más famoso y se ha encontrado una relación entre el consumo de botanas y la prevalencia de malnutrición en el mundo (Shah y col 2018).

La malnutrición es un estado patológico que resulta de la deficiencia o exceso de uno o más nutrientes o, en otras palabras, es un desbalance nutrimental causado por falta de nutrimentos o por el exceso en el consumo de alimentos. (Saunders y Smith 2010; Shah y col 2018). Las botanas son un ejemplo muy utilizado al referirse a alimentos de excesivo consumo debido al incremento en su demanda principalmente entre niños y adolescentes, además que estos productos se caracterizan por ser de alto índice calórico al tener azúcares y grasas añadidas (Shah y col 2018; Casey y col 2021).

Hoy en día ya se han desarrollado botanas saludables elaborados a base de granos como materia prima con buen aporte nutricional y nutracéutico, por ejemplo, algunas razas de maíz, chía, frijol negro, entre otros. Félix y col (2021) elaboraron botanas extrudidas expandidas a base de maíz y frijol común por medio de extrusión y obtuvieron un producto final con buena aceptabilidad nutricional, propiedades antioxidantes y compuestos bioactivos que ayudan a reducir la incidencia de enfermedades crónico-degenerativas.

El maíz, uno de los cultivos más importantes en el mundo para la alimentación y uso industrial, es una buena fuente de fibra, vitaminas liposolubles (A, D, E y K),

vitaminas del complejo B, aminoácidos esenciales, entre otros nutrientes (Bathla y col 2019). Además, el maíz azul ha sido de interés científico debido a su contenido de antocianinas con propiedades antioxidantes y anticancerígenas, lo que hace de este una buena materia prima la elaboración de productos a base de harina como tortillas o botanas (Escalante y col 2014; Herrera y col 2017). Por otro lado, el amaranto es fuente de proteínas, aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales y fitoquímicos que en conjunto le confieren propiedades cardioprotectivas, hepatoprotectivas, antiinflamatorias, anticancerígenas, actividad antioxidante, y ayuda a prevenir diabetes, anemia, entre otros beneficios a la salud (Soriano y col 2019).

Por todo lo anterior mencionado, este trabajo tiene como objetivo desarrollar una botana saludable a base de mezclas de harinas de maíz azul y amaranto, utilizando el proceso de extrusión bajo condiciones óptimas que permitan obtener las mejores características nutricionales y antioxidantes.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. ALIMENTOS BOTANA

1. Producción y consumo

Las botanas son alimentos que se suelen consumir entre comidas con el objetivo de saciar, entretener o degustar, o por motivos socioculturales. Entre los diferentes tipos de botanas se pueden encontrar galletas, pan, bebidas azucaradas, chips, palomitas, extrudidos, entre otros, que en su mayoría se caracterizan por ser productos con bajo aporte nutrimental y altos contenidos de sodio, grasa y azúcares (Hess y col 2016; Ostermier y col 2020). El consumo de botanas en México es de hasta 7.8 kg por persona al año y se ha reportado que más del 90 % de los hogares mexicanos consumen algún tipo de botanas (LABDO 2023). Además, el INEGI (2023) ha reportado una producción de hasta 2,800, 16,900 y 10,100 toneladas / mes para churritos, totopos y botanas infladas, dentro de las cuales las botanas tipo chips son las más producidas y consumidas por la población mexicana.

2. Clasificación

a. Botanas de primera generación

Las botanas de primera generación son productos extrudidos que incluyen a aquellos que se elaboran con materiales naturales como nuez, papa y maíz (Gandhi y col 2016; Ríaz y col 2016).

b. Botanas de segunda generación

Las botanas de segunda generación son productos extrudidos directamente

expandidos al salir del dado del extrusor bajo condiciones de humedad de 7-12 %. Estas botanas se caracterizan por tener altos contenidos de fibra y proteína, y bajo contenido calórico (Gandhi y col 2016; Ríaz y col 2016).

c. Botanas de tercera generación

Las botanas de tercera generación son productos sin terminar, cuya preparación involucra dos etapas: (1) extrusión y formado a baja presión para evitar expansión, esto permite obtener pellets cuya vida de anaquel es prolongada y pueden ser almacenados hasta por 1 año sin necesidad de refrigerarlos; (2) expansión por exposición a aire caliente o freído para obtener el producto final (Gandhi y col 2016; Ríaz y col 2016).

3. Elaboración de botanas

En la **Figura 1** se muestra el diagrama general de proceso para la producción de botanas saludables por medio de extrusión. Este proceso consiste en: (1) moler los granos o materia prima para obtener harinas; (2) formular y preparar las mezclas de los ingredientes que se introducirán al extrusor; (3) acondicionar las mezclas a un contenido de humedad que permita lograr una buena fluidez de los ingredientes dentro del extrusor; (4) extrudir las mezclas para obtener botanas expandidas; y (5) enfriar y secar a temperatura ambiente para empacar (Félix y col 2021). El fenómeno de expansión que se presenta en este tipo de productos extrudidos es explicado por la diferencia de presiones entre el interior y exterior del extrusor. Durante la etapa de extrusión en el proceso de elaboración de botanas saludables, los ingredientes son sometidos a altas presiones y temperaturas por encima de 100 °C, permitiendo que el

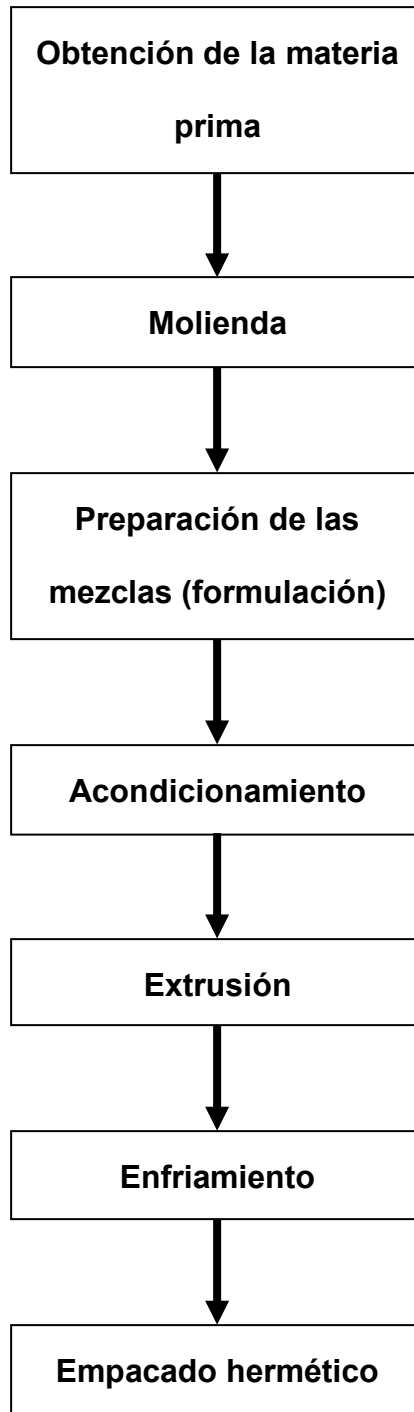


Figura 1. Diagrama general de proceso para la elaboración de botanas saludables.

agua permanezca en estado líquido dentro del extrusor, sin embargo, cuando el agua líquida sobrecalentada entra en contacto con la atmosfera exterior al llegar a la boquilla del extrusor, esta cambia de fase y el vapor escapa inmediatamente desde el producto al ambiente provocando que la botana se expanda y se vuelva porosa. Finalmente, el grado de expansión y la porosidad obtenida le otorgan a la botana tamaño, forma y textura características (De Barros y col 2013).

4. Efectos en la salud

Las botanas se han caracterizado por ser alimentos hipercalóricos con altos contenidos de sodio, grasas y azúcares, por lo que también han sido reconocidas como “alimentos chatarra” debido a que no aportan todos los nutrimentos necesarios y son causa de problemas en la salud como obesidad y enfermedades crónico-degenerativas (Hess y col 2016; Begum y col 2023).

ENSANUT (2023) reportó que la prevalencia de sobrepeso y obesidad en adultos mexicanos fue de 38.3 y 36.9 %, respectivamente, siendo más alta la prevalencia de obesidad en mujeres y la prevalencia de sobrepeso en hombres. Además, se reportó una prevalencia de sobrepeso y obesidad de 18.4 y 19.9 %, respectivamente, para la región Pacífico-Norte, a la cual pertenece el estado de Sinaloa. Por otro lado, se ha encontrado que aumento en el peso corporal está asociado con el riesgo de padecer enfermedades crónico-degenerativas como diabetes tipo 2, presión arterial alta, enfermedades cardiovasculares, cáncer, asma, apnea del sueño y artritis, además de depresión y mala salud mental (Keramat y col 2021). En la **Figura 2** se muestran las principales causas de muerte en México (INEGI 2024), destacando enfermedades del corazón, diabetes e hígado graso, las cuales han sido asociadas a la obesidad.

Rango	Total
1	Enfermedades del corazón 97 187 En 2022 fueron 105 752
2	Diabetes mellitus 55 885 En 2022 fueron 59 568
3	Tumores malignos 45 409 En 2022 fueron 44 322
4	Enfermedades del hígado 19 819 En 2022 fueron 20 547
5	Accidentes 19 230 En 2022 fueron 18 648
6	Enfermedades cerebrovasculares 17 766 En 2022 fueron 18 550
7	Influenza y neumonía 16 386 En 2022 fueron 17 103
8	Agresiones (homicidios) 15 082 En 2022 fueron 16 316
9	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas 9 953 En 2022 fueron 9 394
10	Insuficiencia renal 7 800 En 2022 fueron 6 897

Figura 2. Principales causas de muerte en México (INEGI 2024).

5. Botanas saludables

Debido a la prevalencia de obesidad e incidencia de enfermedades crónico-degenerativas causados por el consumo excesivo de alimentos hipercalóricos, ha sido necesario implementar estrategias que permitan disminuir la incidencia de estas enfermedades a la salud. Una estrategia que se ha desarrollado es la elaboración de productos saludables con valor nutricional y nutracéutico alto que puedan reemplazar a los productos hipercalóricos que actualmente se comercializan. Anteriormente Espinoza y colaboradores (2016) elaboraron una botana saludable por extrusión a partir de mezclas de maíz transgénico con expresión de proteínas del amaranto y frijol negro común, obteniendo como resultado una botana con buenas propiedades texturales y de expansión, además de valor nutricional y antioxidante alto. Por otro lado, Gómez y colaboradores (2021) elaboraron una botana extrudida libre de gluten con maíz de calidad proteínica y frijol tépari, obteniendo como resultado una botana con mejor contenido proteínico, fibra dietaria total y actividad antioxidante.

B. EXTRUSIÓN

1. Generalidades del procesamiento de granos

El procesamiento de granos puede ser dividido en: (1) tratamientos no térmicos (ultrasonido, altas presiones, pulsos eléctricos, irradiación, microondas), (2) tratamientos térmicos (cocción, extrusión, freído, horneado), (3) tratamientos mecánicos (molienda, remojo, descascarillado) y (4) tratamientos biológicos (germinación, fermentación, tratamientos enzimáticos) (Li y col 2022). Dentro de los diferentes tipos de tratamientos de granos, los tratamientos térmicos han sido asociados con la alteración de la matriz proteica en el endospermo y la estructura del

almidón en los granos, además permiten mejorar la biodisponibilidad del almidón, destruir micotoxinas e incrementar los contenidos de algunos compuestos bioactivos (Safaei y Yang 2016; Li y col 2022).

2. Procesamiento de alimentos por extrusión

La extrusión es un proceso versátil que combina múltiples operaciones a la vez: mezclado, cortado, formado y cocción para transformar materias alimenticias en productos extrudidos con características específicas y mejor valor nutricional. Durante la extrusión, el material es forzado a pasar a través de una entrada por medio de altas presiones provocando cambios estructurales, fisicoquímicos y químicos en el alimento, por ejemplo, la gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, oxidación de lípidos, solubilización de fibra, degradación de vitaminas, entre otros (Leonard y col 2019; Ek y Ganjyal 2020).

3. Componentes de un extrusor

Las partes o componentes de un equipo de extrusión incluyen principalmente alimentador, tornillo, barril, dado y motor. El alimentador se ubica en la parte superior del extrusor y permite una entrada continua de material crudo hacia el interior del equipo. El tornillo al interior del extrusor se encuentra rodeado por el material alimentado y, por medio de fuerza mecánica, transporta al material hacia un orificio de salida al final del equipo; la energía requerida para el movimiento proviene del motor. El barril se encuentra rodeando al tornillo y al material alimentado, este es usualmente acoplado con calentadores eléctricos para transferir el calor necesario para la cocción del alimento. El dado se encuentra en el orificio al final del barril y se encarga de darle una forma final al producto extrudido (WSU 2017; Shelar y Gaikwad 2019; Choton y

col 2020).

4. Clasificación de extrusores

a. Extrusor de tornillo simple

Los extrusores de tornillo simple contienen un único tornillo dentro del barril del extrusor. Estos extrusores se pueden subclasificar según sus capacidades de corte, la fuente de calor y el diseño del tornillo. La ventaja de los extrusores de tornillo simple es que el consumo de energía es menor, sin embargo, algunas desventajas son el rango de productos que es capaz de soportar y una menor homogeneidad al mezclar ingredientes. El extrusor de tornillo simple es comúnmente utilizado para productos alimenticios simples como productos basados en almidón y azúcares (pastas, cereales, alimento para mascota) (Choton y col 2020; Ek y Ganjyal 2020).

b. Extrusor de doble tornillo

Los extrusores de doble tornillo presentan dos tornillos de misma longitud rotando dentro del barril del extrusor, estos tornillos pueden girar en el mismo sentido o en sentido contrario, de los cuales el extrusor de doble tornillo con giro en el mismo sentido es el más utilizado debido a que imparte más esfuerzos mecánicos hacia el material. Las ventajas de un extrusor de doble tornillo son que permite mejor control sobre el proceso, el rango de productos que el equipo puede soportar es mayor, y hay mayor homogeneidad en el mezclado de los ingredientes dentro del equipo, sin embargo, también requiere mayores costos de mantenimiento. Este tipo de extrusor es comúnmente utilizado para obtener productos especializados con altos contenidos de proteína y fibra, y de alta calidad (Shelar y Gaikwad 2019; Choton y col 2020; Ek y

Ganjyal 2020).

5. Efecto de la extrusión sobre el valor nutricional

a. Carbohidratos

El almidón es uno de los principales carbohidratos contenidos en los alimentos, y durante el proceso de extrusión sufre cambios estructurales debido a la gelatinización, despolimerización y dextrinización. Además, se ha reportado pérdida de azúcares debido a la liberación de azúcares reductores (glucosa y fructosa) por conversión de la sacarosa durante el proceso, y su posterior pérdida al participar en reacciones de Maillard (Leonard y col 2019; Shelar y Gaikwad 2019; Choton y col 2020).

b. Proteínas

Durante el proceso de extrusión se da la desnaturalización de las proteínas debido al efecto de las altas temperaturas sobre el material, causando la inactivación de factores antinutricionales y mejorando la digestibilidad proteínica. Además, el rompimiento de enlaces entre proteínas conduce a su interacción con otros componentes en la matriz del alimento y formación de nuevos compuestos (Leonard y col 2019; Choton y col 2020).

c. Lípidos

Ha sido reportado que en el proceso de extrusión se da una liberación de lípidos debido a su derretimiento bajo el efecto de altas temperaturas y posterior difusión hacia fuera del alimento, además que el esfuerzo mecánico por parte del tornillo provoca rompimiento de las paredes celulares. Los lípidos liberados pueden interactuar con moléculas de almidón y proteínas formando complejos entre ellos, sin embargo, los

cambios que sufren los lípidos aún son complejos y dependen de diferentes factores como el balance hidrofílico-lipofílico, el tipo de lípidos y su cantidad, y el tipo de alimento que se está procesando (Leonard y col 2019; Shelar y Gaikwad 2019; Choton y col 2020).

d. Vitaminas

Las vitaminas A, E y C son termosensibles, y durante la extrusión se ven fácilmente degradadas con el incremento de la temperatura en el proceso. Por otro lado, la vitamina B12 se logra retener en el alimento bajo condiciones de alta humedad y bajas temperaturas, esto debido a la disminución de la viscosidad que conduce a mayor fluidez del alimento a través del extrusor y, por lo tanto, menor tiempo de retención, sin embargo, se han reportado pérdidas de vitamina B12 a altas temperaturas de extrusión (Leonard y col 2019; Choton y col 2020).

e. Minerales

Los minerales representan una pequeña parte del alimento y no pueden ser descompuestos debido a que se mantienen sólidos y cristalinos, pero el contenido de estos puede verse afectado indirectamente debido al efecto de la extrusión sobre componentes más grandes. Durante la extrusión se han observado incrementos en los contenidos de Ca, K, Na, Zn y Fe, además su absorción se ve mejorada debido a la inactivación de factores antinutricionales (Wani y Kumar 2015; Leonard y col 2019).

6. Efecto de la extrusión sobre las propiedades nutraceuticas

La actividad antioxidante de los alimentos proviene principalmente del contenido de compuestos fenólicos, y estos últimos se ven afectados durante el proceso de

extrusión. Por un lado, se ha reportado que la extrusión permite incrementar el contenido de compuestos fenólicos debido a (1) la liberación de aquellos compuestos que se encuentran ligados a las paredes celulares en la matriz del alimento, haciendo que estos sean más fáciles de extraer y (2) la formación de compuestos fenólicos en reacciones de Maillard; por otro lado, dependiendo del tipo de alimento y del tipo de compuestos fenólicos, podría haber disminución de ellos debido a la destrucción de los compuestos fenólicos libres bajo el efecto de altas temperaturas. Los cambios en estos compuestos y, por lo tanto, en la actividad antioxidante varían mucho y dependen de la complejidad del alimento, de las variables de proceso y de las reacciones químicas involucradas (Leonard y col 2019).

C. MAÍZ (*ZEA MAYS* L.)

1. Características generales

a. Origen

El maíz por su nombre en español es también conocido por otros nombres alrededor del mundo como “mais” en francés, “milho” en portugués, “makka” en indio, y “corn” o “maize” en inglés, y se clasifica en dos diferentes: (1) indígena o antiguo que incluye a los maíces Chapalote, Palomero Toluqueño o Arrocillo Amarillo; y (2) precolombiano exótico que incluye a los maíces *cacahuaicintle*, oloton y dulce (García y Serna 2019).

En la actualidad, 64 de las 220 razas conocidas del maíz son asociadas con México, además los datos históricos más antiguos encontrados sobre el maíz muestran su origen en esta misma región. Entre 6000 y 20000 años a.C. el maíz ya había sido

domesticado en tres cuevas encontradas al sur del estado de Tamaulipas, México, además antecedentes arqueológicos muestran que el maíz ya era cultivado entre 2000 a 2500 años a.C. (García y Serna 2019).

b. Taxonomía

Las características taxonómicas del maíz se muestran en el **Cuadro 1**. La especie *Zea mays* L. del género *Zea* y familia *Poaceae* es una planta vascular (*Tracheophyta*) que produce semillas (*Spermatophytina*) y pertenece al reino planta (*Plantae*), subreino de plantas verdes (*Viridiplantae*) e infrarreino de plantas de tierra (*Streptophyta*) (ITIS 2011a; García y col 2019).

c. Estructura del grano

1) Pedicelo

El pedicelo es una extensión de la mazorca que permite su unión con el grano y en él se encuentran algunos conductos que transportan productos fotosintéticos hacia el grano para su desarrollo. Al término del desarrollo del grano, el pedicelo se rompe y una parte cónica y fibrosa permanece en el grano (Watson 2003; García y col 2019).

2) Pericarpio

El pericarpio es la capa más externa del grano de maíz, se subdivide en epicarpio, mesocarpio y endocarpio y se conforma por células fibrosas muertas ricas en fitoquímicos. La principal función de esta parte del grano es proteger a las partes más internas (endospermo y germen) del estrés biótico y abiótico (Serna 2010; García y col 2019).

Cuadro 1. Taxonomía del maíz (*Zea mays* L.).

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Viridiplantae</i>
Infrarreino	<i>Streptophyta</i>
Superdivisión	<i>Embryophyta</i>
División	<i>Tracheophyta</i>
Subdivisión	<i>Spermatophytina</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Superorden	<i>Lilianaes</i>
Orden	<i>Poales</i>
Familia	<i>Poaceae</i>
Género	<i>Zea</i> L.

ITIS (2011a); García y col (2019).

3) Endospermo

El endospermo se constituye principalmente por aleuronas, endospermo periférico y endospermo almidonoso. La capa de aleuronas es la capa más externa del endospermo y el germen, y en esta se almacenan proteínas, cuerpos lipídicos, fósforo, potasio y magnesio; el endospermo periférico se encuentra por debajo de la capa de aleuronas y se conforma por una a tres capas de gránulos pequeños de almidón rodeados por una matriz proteínica; el endospermo almidonoso (86-89 % almidón) se conforma por gránulos de almidón más grandes hacia el centro dentro de una matriz proteínica que es más delgada hacia el centro (Watson 2003; García y col 2019).

4) Germen

El germen es la parte estructural más interna del grano, constituye alrededor de un 10 % del peso del grano y almacena todos los nutrientes necesarios para el desarrollo y crecimiento del embrión, por ejemplo, fósforo en forma de ácido fítico, potasio, magnesio, azufre como constituyente de los aminoácidos, lípidos (triacilglicéridos), entre otros (García y col 2019).

d. Estadísticas de producción

1) Producción global

A nivel global se produce un total de 1,224,789 miles de toneladas métricas por año, siendo Estados Unidos y China los principales productores con alrededor del 55 % de la producción total de maíz. México logra ubicarse en el octavo lugar a nivel mundial con una producción total de 25,000 miles de toneladas métricas por año. En el **Cuadro 2** se muestran los principales países productores de maíz y su producción

Cuadro 2. Principales regiones productoras de maíz.

Región	Área de cultivo (millones ha)	Rendimiento (TM/ha)	Producción (1000 TM)
Estados Unidos	33.77	11.36	383558
China	44.70	6.53	292000
Brasil	22.30	5.70	127000
Unión Europea	8.65	7.40	64000
Argentina	6.40	6.40	51000
India	11.00	3.41	37500
Ucrania	3.90	7.10	27700
México	6.40	3.91	25000
África del Sur	3.15	5.40	17000
Rusia	2.50	6.00	15000
Canadá	1.45	10.00	14500
Indonesia	3.80	3.47	13200
Nigeria	5.10	2.16	11000

USDA (2024)

anual (USDA 2024).

2) Producción en México

México es uno de los principales productores de maíz a nivel mundial debido a que este grano es de importancia cultural y base de la alimentación mexicana. Actualmente se producen más de 27 millones de toneladas de maíz en los 32 estados del país, siendo Sinaloa, Jalisco, Estado de México, Guanajuato y Michoacán los principales estados productores a nivel nacional (**Figura 3**). Por otro lado, 91.5 % del maíz producido en México es maíz blanco, 8% es maíz amarillo y el resto es maíz de otros colores entre los cuales destaca el maíz azul (INIFAP 2020; SADER 2023a).

e. Razas de maíz en México

El término raza es utilizado para categorizar o clasificar individuos o poblaciones dentro de diferentes grupos dependiendo de sus características genéticas, morfológicas o de su historia de cultivo. En México existen hasta 64 razas de maíz (59 nativas) con una gran variedad de colores con tonalidades como azules, negras, rojas, blancas y amarillas. En la **Figura 4** se muestran los estados de México y superficie correspondiente a la siembra de maíz de otro color (SIAP 2018; SADER 2023a). Además de los mencionado, las 64 razas de maíz que existen en México se dividen en 7 grupos: (1) cónicos, (2) maduración tardía, (3) Sierra de Chihuahua en la cual se encuentra el maíz azul, (4) Ocho Hileras, (5) tropicales precoces, (6) dentados tropicales y (7) chapalote. En el **Cuadro 3** se muestra la lista de maíces por grupo (SADER 2023a).



Figura 3. Principales estados productores de maíz en México (SIAP 2018).

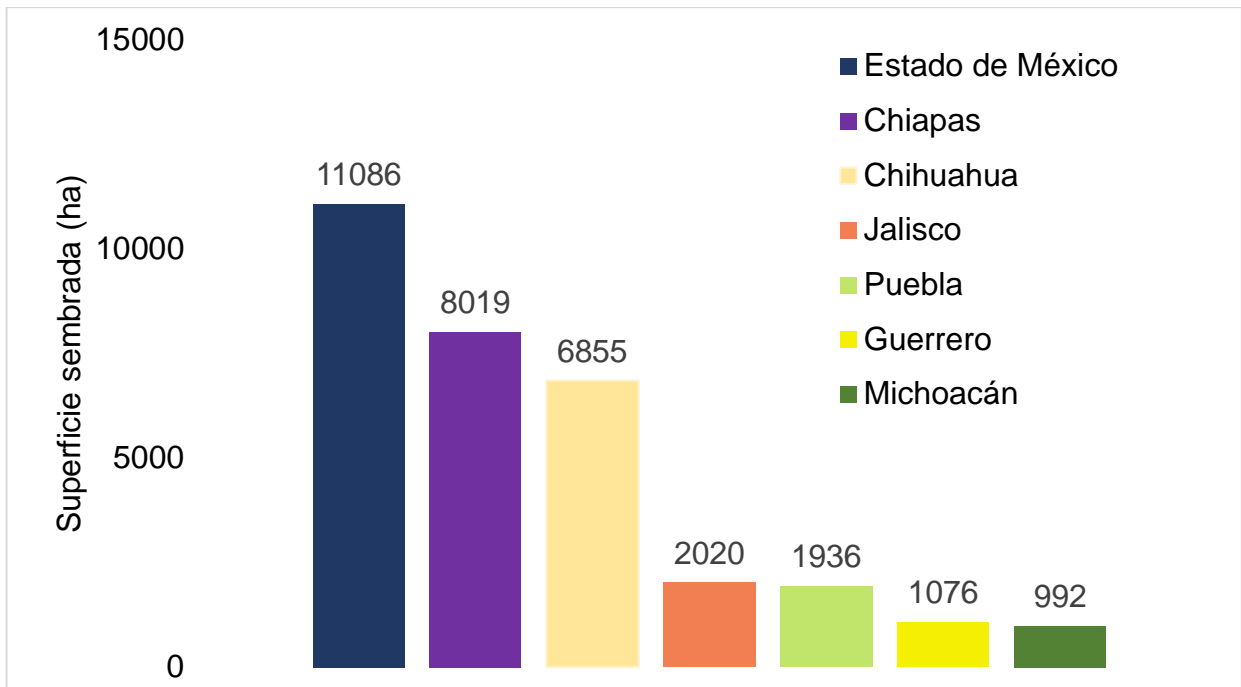


Figura 4. Superficies sembradas de otros colores de maíz en México (SIAP 2018).

Cuadro 3. Grupos y razas de maíces en México.

Grupo de maíz	Razas
Cónicos	Arrocillo, Dulce, Chalqueño, Cacahuacintle, Cónico, Cónico Norteño, Palomero Toluqueño, Palomero de Jalisco, Elotes Cónicos, Mixteco, Mushito, Mushito de Michoacán, Negro y Uruapeño
Maduración tardía	Olotillo, Olotón, Quicheño, Serrano Mixe, Serrano Mixeño, Comiteco, Dzit-Bacal, Coscometapec, Motozinteco, Tehua y Negro de Chimaltenango
Sierra de Chihuahua	Apachito, Azul, Complejo Serrano de Jalisco, Cristalino de Chihuahua, Gordo y Mountain Yellow
Ocho hileras	Blando, Onaveño, Harinoso de Ocho, Tabloncillo, Tabloncillo Perla, Bofo, Elotes Occidentales, Tablilla de Ocho, Jala, Zamorano Amarillo, Ancho y Bolita
Tropicales precoces	Conejo, Nal-Tel, Ratón y Zapalote Chico
Dentados tropicales	Celaya, Tepecintle, Tuxpeño, Tuxpeño Norteño, Vandeño, Zapalote Grande, Nal-Tel de Altura, Pepitilla, Chiquito, Choapaneco y Cubano Amarillo
Chapalote	Chapalote, Dulcillo del Noroeste, Elotero de Sinaloa y Reventador

SADER (2023a).

2. Maíz azul

a. Producción en México

La siembra de maíces de colores en México produce alrededor del 0.5 % del maíz total producido, y el maíz azul es el de mayor importancia entre los diferentes colores. El maíz azul es cultivado mayormente en el Estado de México, seguido de los estados de Campeche, Chiapas, Jalisco, Guerrero, Puebla, Chihuahua y Michoacán, llegando hasta 200 mil toneladas anuales (INIFAP 2020). En 2016 se sembraron más de 14 mil ha de maíz de color en el Estado de México y el 80 % fue maíz azul destinado al consumo humano (INIFAP 2017).

b. Composición química del grano

1) Carbohidratos

El almidón es el principal carbohidrato en el grano de maíz y representa la mayor parte de su contenido, el cual puede variar dependiendo de la variedad de maíz y las condiciones de cultivo. Matlu y col (2018) reportaron un contenido de almidón de 63.94 %, mientras que otros autores reportaron valores de 78.5 % a 89.9 % (Agama y col 2011), 58.07 % a 71.54 % (Uriarte y col 2015), y 66.5 % (Somavat y col 2016).

2) Fibra dietaria

El contenido total de fibra dietaria ha sido reportado de 1.50 % a 1.82 % por Nankar y col (2016), mientras que Matlu y col (2018) reportaron 2.68 %, y Urias y col (2015) reportaron de 2.5 % a 2.7 %. Por otro lado, Uriarte y col (2016) reportaron contenidos más altos de 14.5 % a 25.7 %, similar al resultado de 25.5 % obtenido por Montoya y col (2020).

3) Proteínas

El contenido de proteína en el grano de maíz azul ha sido reportado en un rango de 6.73 % a 9.37 % por Agama y col (2011), mientras que otros autores han reportado contenidos de 11.16 % y 13.13 % (Somatev y col 2016; Matlu y col 2018). Además, entre el contenido de proteínas se encuentran todos los aminoácidos esenciales que son requeridos en la dieta debido a que el cuerpo humano es incapaz de sintetizarlos por sí mismo, sin embargo, entre estos se ha observado una deficiencia de lisina y triptófano. Por otro lado, la cantidad de proteína contenida en el grano de maíz es afectada por las condiciones de crecimiento, factores genéticos, factores ambientales y el contenido del suelo donde se siembre, este último debido a los fertilizantes utilizados y al contenido de nitrógeno que afecta en la medición del contenido de proteína (Agama y col 2011; Matlu y col 2018).

4) Lípidos

Agama y col (2011) reportaron un contenido total de lípidos en maíz azul de 4.46 % a 5.98 % para diferentes variedades en México, además mencionan que este valor puede ser afectado por la variedad del maíz y que suelos áridos reducen su contenido. Por otro lado, Matlu y col (2018) reportaron un contenido total de lípidos de 4.30 % e identificaron los ácidos grasos oleico (52.21 %), linoleico (44.85 %), palmítico (2.86 %) y esteárico (0.43 %).

5) Minerales

Agama y col (2011) reportaron un contenido de cenizas de 0.014 % a 1.82 %, y la variabilidad entre los valores obtenidos la atribuyen a cambios ambientales, diferentes

condiciones de suelo y el tipo de fertilizante utilizado. Por otro lado, Matlu y col (2018) reportaron un contenido de cenizas de 1.34 % y Trujillo y col (2015) reportaron contenido de cenizas de 1.0 % a 1.3 %, entre los cuales se han identificado Fe, Zn, Ca, Mg, P y Cu (Gogoi y col 2022).

6) Vitaminas

Entre las vitaminas del maíz se pueden identificar vitaminas del complejo B (tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantoténico, B6, biotina y folatos), vitaminas A, D, E y K, ergocalciferol, tocoferoles, además de carotenoides conocidos como provitamina A que pueden convertirse a retinol (vitamina A) después de metabolizarse (Bathla y col 2019).

c. Fitoquímicos presentes

1) Compuestos fenólicos

Dentro de los compuestos fenólicos se pueden encontrar los ácidos fenólicos y flavonoides, y entre estos últimos se pueden identificar flavonoles, flavonas, flavanoles, flavanonas, antocianinas e isoflanoides (Liu 2013). Los ácidos fenólicos y las antocianinas son los principales compuestos fenólicos en el maíz y su contenido varía dependiendo de la variedad y la raza del maíz en estudio, y puede estar en un rango de 243.8 a 320.1 mg equivalentes de ácido gálico (EAG) / 100, base seca (bs). De acuerdo con de la Parra y col (2007), los maíces amarillo, azul, blanco y rojo contienen 285.8, 266.2, 260.7 y 243.8 mg EAG / 100, bs, respectivamente, y en el caso del maíz azul se encuentra una concentración mayor de antocianinas que se almacenan en el pericarpio y aleuronas. En el **Cuadro 4** se muestran los contenidos de los principales

Cuadro 4. Principales ácidos fenólicos contenidos en el maíz.

Tipo de maíz	Ácido <i>p</i> -cumárico (mg / kg, bs)	Ácido ferúlico (mg / kg, bs)
Dentado amarillo	18.9	265
Azul americano	N.D.	927
Azul mexicano	1.3	202
Blanco	6.6	2484

Del Pozo y col (2006); Sheng y col (2018).

ácidos fenólicos en algunas variedades de maíz incluyendo el maíz azul (Luna y col 2017; Sheng y col 2018).

Por otro lado, el contenido de antocianinas en el maíz azul ha sido reportado en 62.7 mg equivalentes de Cianidina-3-Glucósido (ECG) / 100 g, bs (Moreno y col 2005), y 91.5 mg ECG / 100 g, bs (Matlu y col 2018). Además, Guzmán y col (2017) identificaron las principales antocianinas en el maíz azul: cianidina-3-(3", 6"-dimalonil-glucósido), pelargonidina-3-glocósido dimalonato, pelargonodina-3-(sinapoil glucósido)-5-glucósido, entre otros.

2) Carotenoides

Los carotenoides se clasifican en carotenos y xantofilas. Los carotenos como β -caroteno, α -caroteno y β -criptoxantina son también conocidos como provitamina A debido a que estos pueden ser utilizados por el cuerpo humano para sintetizar vitamina A, mientras que las xantofilas no pueden ser metabolizadas para sintetizar vitamina A, pero son absorbidas y llevadas a una región específica en el ojo (mácula) donde pueden absorber la luz azul para evitar que llegue a causar daño oxidativo. En el **Cuadro 5** se muestran los contenidos de los principales carotenoides para algunos tipos de maíz incluyendo el maíz azul (Liu 2007; Sheng y col 2018).

d. Propiedades nutracéuticas

Reducción de enfermedad cardiovascular

Tighe y col (2010) reportaron que el consumo de granos enteros reduce el riesgo de enfermedad cardiovascular debido a una disminución de las lipoproteínas de baja densidad (LDL) y el colesterol total, que a su vez favorecen la presión sanguínea. Por

Cuadro 5. Contenido de carotenoides (μg / 100 g, bs) en diferentes maíces.

Tipo de maíz	Luteína	Zeaxantina	β-criptoxantina	β-caroteno	α-caroteno
Blanco	5.73	6.01	1.27	4.92	0.04
Amarillo	406.2	353.2	19.1	33.6	11.7
Rojo	121.7	111.9	13.1	20.2	N.D.
Azul	5.17	14.3	3.41	23.1	N.D.
Alto en carotenoides	245.6	322.3	23.1	45.8	N.D.

Scott y Eldridge (2005); de la Parra y col (2007); Sheng y col (2018).

otro lado, se ha reportado una disminución de hasta 16 % en el riesgo de padecer enfermedad cardiovascular (Aune y col 2016; Zhang y col 2017).

Actividad anticancerígena

El consumo de granos enteros ha sido asociado con disminución en el riesgo de padecer algún tipo de cáncer debido a los contenidos de fibra, carbohidratos fermentables, minerales, compuestos fenólicos, antioxidantes y fitoestrógenos que están relacionados con la protección anticancerígena (Slavin 2000). En el caso del maíz, su contenido en antocianinas, vitamina E y ligninas hace que este grano presente efecto anticancerígeno (Peh y col 2016; Wu y col 2017).

D. AMARANTO (*AMARANTHUS HYPOCHONDRIACUS L.*)

1. Origen

El pseudo cereal "*Amaranthus* spp." ha sido cultivado en América desde al menos 4000 años a.C. cuando los Mesoamericanos pre-colombianos ya lo habían domesticado junto a otras civilizaciones. Este pseudo cereal es comúnmente conocido como amaranto, sin embargo, su nombre proviene de la palabra *Amaranthus* que significa flor eterna, y ha sido conocido también como "Huautli" en la civilización azteca y "Xtes" en la civilización maya (Rosentrater y Evers 2018; Soriano y col 2018).

2. Taxonomía

La taxonomía del amaranto se muestra en el **Cuadro 6**. El *Amaranthus hypochondriacus L.* pertenece al reino planta (*plantae*), subreino de las plantas verdes (*viridiplantae*) e *infrarreino* de las plantas terrestres (*streptophyta*), es además una planta vascular (*Tracheophyta*) con semillas (*Spermatophytina*) (ITIS 2011b).

Cuadro 6. Taxonomía del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.)

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Viridiplantae</i>
Infrarreino	<i>Streptophyta</i>
Superdivisión	<i>Embryophyta</i>
División	<i>Tracheophyta</i>
Subdivisión	<i>Spermatophytina</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Superorden	<i>Caryophyllanae</i>
Orden	<i>Caryophyllales</i>
Familia	<i>Amaranthaceae</i>
Género	<i>Amaranthus</i> L.

ITIS (2011b).

3. Estadísticas de producción

a. Producción global

Los datos de producción global se muestran en la **Figura 5**. India y China son los principales países productores con alrededor de 15.20 % y 11.70 %, respectivamente, mientras que México destaca entre los 10 principales productores a nivel global con 2.40 % (Khan y col 2022).

b. Producción en México

Los datos de producción en México se muestran en la **Figura 6**. De acuerdo con los datos publicados por el Gobierno de México, en 2019 y 2020 los estados de Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Ciudad de México, Oaxaca y Morelos fueron los principales productores con 61, 22, 13, 3, 2 y 1 % de la producción nacional de amaranto, respectivamente (SADER 2020, 2022, 2023b). Por otra parte, en 2023 México produjo 5492 toneladas, representando el 2.65 % de la producción global (FAO 2023, ICAMEX 2024).

4. Composición química

a. Carbohidratos

El contenido de carbohidratos en los granos de amaranto varía en un rango de 45 a 65 %, del cual la mayor parte es almidón y, a diferencia de los cereales, este se encuentra en menor cantidad y localizado en el perisperma donde es generado por los amiloplastos (Schoenlechner y col 2002; Baraniak y Kania 2022).

b. Fibra dietaria

El contenido de fibra dietaria total varía de 2 a 8 % del peso del grano seco. La

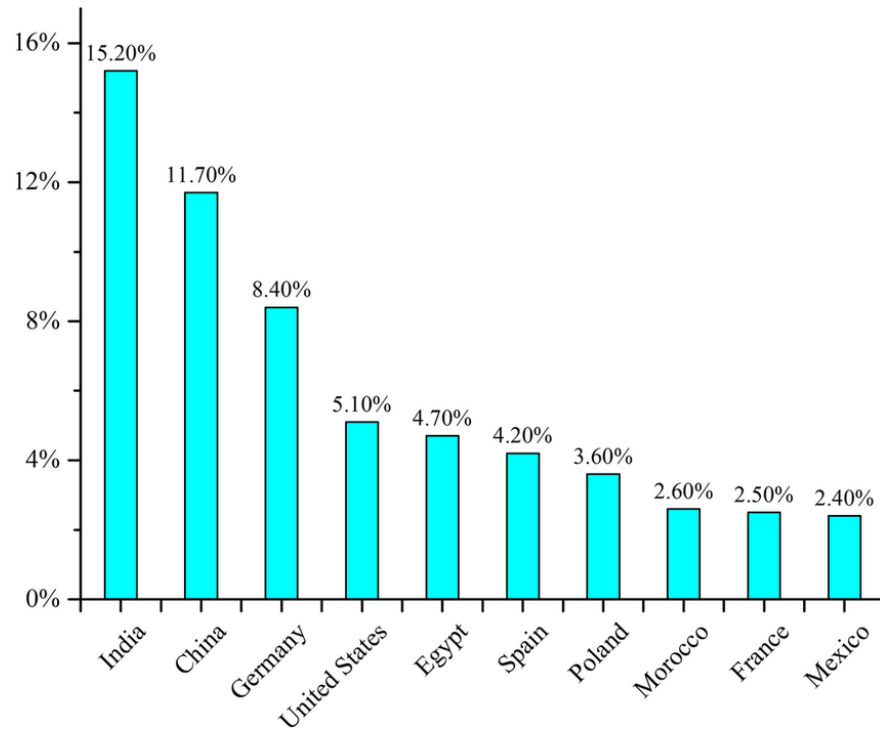


Figura 5. Principales países productores de amaranto (Khan y col 2022).

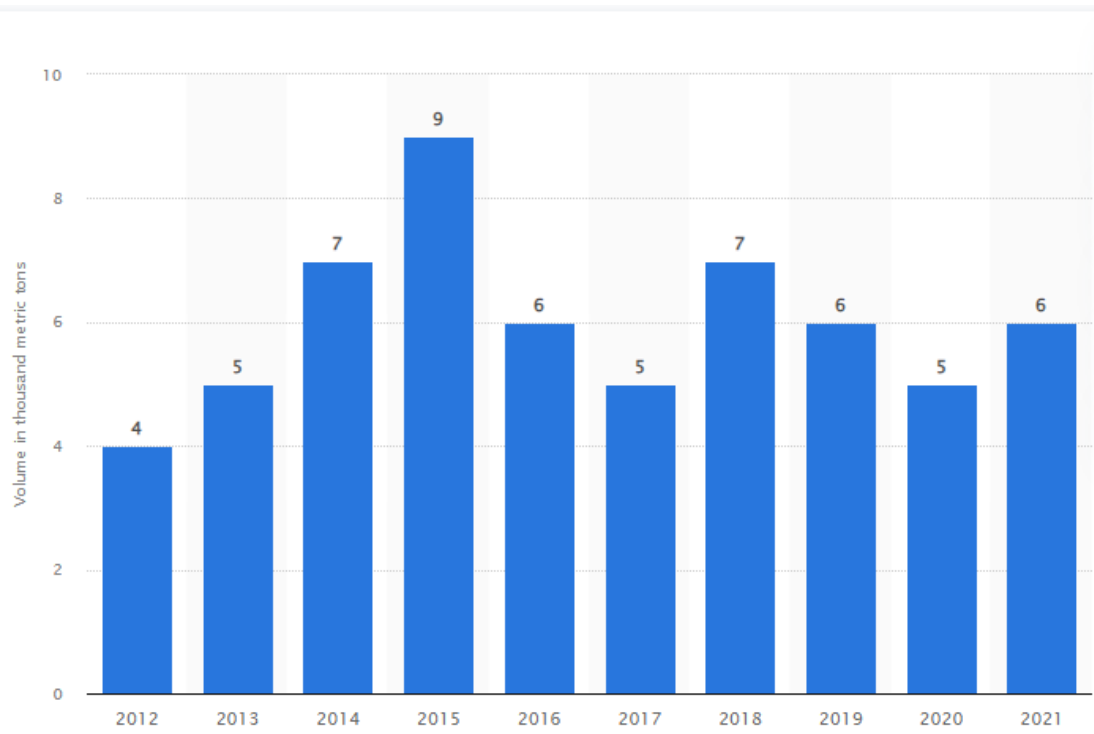


Figura 6. Producción de amaranto en México (Statista 2022).

fracción insoluble de fibra en el amaranto es mayor y consiste en celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales tienen efecto benéfico sobre el sistema digestivo, mientras que la parte insoluble consiste principalmente de pectinas (Soriano y col 2018; Baraniak y Kania 2022).

c. Proteína

El amaranto tiene un contenido de proteínas de 13 a 18%, dentro de las cuales se encuentran todos los aminoácidos esenciales, especialmente lisina y triptófano (**Cuadro 7**), por lo que su consumo permite tener una dieta sana y balanceada. Entre las proteínas contenidas en el grano de amaranto, las albuminas y globulinas son las que predominan con aproximadamente 10 % en cada una, mientras que las prolaminas y glutelinas se encuentran en menor proporción (USDA 2018; Soriano y col 2018; Singh y Punia 2020; Baraniak y Kania 2022).

d. Lípidos

El contenido de lípidos en el amaranto es otra de sus buenas características nutricionales, contiene alrededor de 7.1 - 7.6 % con una buena relación de ácidos grasos saturados e insaturados. Dentro de los ácidos grasos insaturados en el amaranto se encuentran los ácidos linoleico (omega-6, 62 %), oleico (20 %), linolenico (omega-3, 1 %) y araquidónico, mientras que en los ácidos grasos saturados se encuentran los ácidos palmítico (13 %), esteárico (2.6 %), araquídico (0.7 %) y mirístico (0.1 %) (Gajewska y col 2002; Karamac y col 2019; Baraniak y Kania 2022).

e. Minerales

En el **Cuadro 8** se muestra el contenido de minerales para el grano de amaranto.

Cuadro 7. Contenido de aminoácidos esenciales en 100 g de amaranto.

Aminoácido	Contenido (g / 100 g)
Arginina	1.06
Histidina	0.39
Isoleucina	0.58
Leucina	0.88
Lisina	0.75
Metionina	0.23
Fenilalanina	0.54
Treonina	0.56
Triptófano	0.18
Valina	0.68

USDA (2018).

Cuadro 8. Contenido de minerales en 100 g de amaranto.

Mineral	Contenido
Calcio	159 – 179 mg
Hierro	7.61 – 66 mg
Magnesio	248 – 285 mg
Manganeso	3.33 – 5.71 mg
Potasio	401 – 508 mg
Fósforo	557 mg
Sodio	4 mg
Zinc	2.87 – 11.3 mg
Cobre	0.53 mg
Selenio	18.7 µg

Abolaji y col (2016); USDA (2018).

Actualmente la incidencia de deficiencia de vitaminas en la dieta es muy común y conlleva a daños a la salud, algunas deficiencias destacadas son la deficiencia de zinc que genera daño en el sistema inmune, deficiencia de hierro que anemiza al reducirse la capacidad de transporte de oxígeno en las enzimas que permiten metabolizarlo. En el amaranto se ha reportado un contenido de cenizas de 3.1 - 3.4 % con buenos contenidos de zinc y hierro que al ser añadidos en la dieta podrían prevenir la deficiencia de estos minerales y, por lo tanto, reducir complicaciones de salud, además que contienen otros minerales de importancia como calcio, magnesio, fósforo, potasio, sodio, manganeso y selenio que permiten estabilizar los ácidos nucleicos, participan en transportadores de membrana, regulan la presión osmótica, y actúan como cofactores enzimáticos, constituyentes de vitaminas y antioxidantes (Biziuk y Kuczyńska 2006; Abolaji y col 2017; Baraniak y Kania 2022).

f. Vitaminas

En el **Cuadro 9** se muestra el contenido de vitaminas en el amaranto. Diferentes vitaminas han sido identificadas en las semillas de amaranto, principalmente vitaminas del grupo B que intervienen en el metabolismo energético y permiten asimilar mejor otros nutrientes, vitamina C que participa como antioxidante natural, y tocoferoles y tocotrienoles (vitamina E) de los cuales se han identificado todas las isoformas del tocoferol (α , β , γ y δ) y dos isoformas del tocotrienol (β y γ) (Tang y col 2016; Sarker y col 2020; Baraniak y Kania 2022).

Cuadro 9. Contenido de vitaminas en 100 g de amaranto.

Vitamina	Contenido
Ácido ascórbico (vitamina C)	4.2 mg
Tiamina (vitamina B1)	0.116 mg
Riboflavina (vitamina B2)	0.2 mg
Niacina (vitamina B3)	0.923 mg
Ácido pantoténico (vitamina B5)	1.46 mg
Piridoxina (vitamina B6)	0.591 mg
Folato	82 µg
Vitamina A	2 IU
α-tocoferol (vitamina E)	1.19 mg
β-tocoferol (vitamina E)	0.96 mg
γ-tocoferol (vitamina E)	0.19 mg
δ-tocoferol (vitamina E)	0.69 mg
β-tocotrienol (vitamina E)	0.48 mg
γ-tocotrienol (vitamina E)	0.29 mg

USDA (2018).

5. Fitoquímicos presentes

a. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos como ácidos fenólicos, flavonoides y taninos son los principales metabolitos secundarios en las plantas, estos se encuentran en las capas más externas de la semilla de amaranto y son un mecanismo de defensa contra microorganismos e insectos. Algunos compuestos fenólicos se pueden encontrar libres y son normalmente separados e identificados por cromatografía, mientras que otros compuestos fenólicos se encuentran asociados o ligados a las estructuras de la pared celular. Entre los compuestos fenólicos se han identificado principalmente los ácidos gálico, *p*-hidroxibenzoico, ferúlico, vanílico, cafeico, quercetina y kaempferol. El contenido de estos compuestos fenólicos se muestra en el **Cuadro 10** (Bunzel y col 2005; Pasko y col 2008; Tang y Tsao 2017).

b. Betalaínas

Las betalaínas son pigmentos nitrogenados que se clasifican en betacianinas (rojo violeta) y betaxantinas (amarillo-naranja). Estos pigmentos han sido identificados en la semilla de amaranto (19 mg/kg) y ayudan a evitar la oxidación de la lipoproteína de baja densidad (LDL) y el daño al ADN por eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Los contenidos de betalaínas se muestran en el **Cuadro 10** (Cai y col 2003; Repo y col 2010; Tang y Tsao 2017).

c. Carotenoides

Los carotenoides también conocidos como provitamina A son pigmentos con beneficios en la salud como antioxidantes, antiinflamatorios y anticancerígenos. Entre

Cuadro 10. Contenido de fitoquímicos en la semilla de amaranto.

Compuesto fitoquímico	Contenido (mg/kg)
Ácido p-hidroxibenzoico	8.5-20.9 ^a
Ácido vanílico	15.5-69.5 ^a
Ácido gálico	11.0-440 ^a
Ácido ferúlico	120-620 ^a
Ácido cafeico	6.41-6.61 ^b
Quercetina	214-843 ^a
Kaempferol	22.4-59.7 ^a
Isorhamnetina	142-600 ^a
Amarantina	151.3 ^c
Isoamarantina	58.7 ^c
Betanina	17.7 ^c
Isobetanina	5.0 ^{cd}
Luteina	3.55-4.29 ^e
Zeaxantina	0.14-0.32 ^e

^aRepo y col (2010); ^bPaško y col (2011); ^cKhanam y Oba (2013); ^dSteffensen y col (2011); ^eTang y col (2016).

estos compuestos se han logrado identificar la luteína y la zeaxantina en las semillas de amaranto. Los contenidos de luteína y zeaxantina se muestran en el **Cuadro 10** (Tang y col 2016; Tang y Tsao 2017).

d. Saponinas y fitatos

Las saponinas son compuestos pequeños y, dependiendo de su estructura, estos pueden ser tóxicos. Algunos efectos positivos de las saponinas son su actividad antifúngica y antiinflamatoria, mientras que algunos efectos negativos son la formación de complejos insolubles con minerales afectando la absorción y biodisponibilidad de estos. Por otro lado, los fitatos son compuestos insolubles que se forman por la interacción del ácido fítico con cationes como calcio, potasio, hierro, zinc y cobre, afectando la absorción y biodisponibilidad de estos minerales, además de disminuir la solubilidad de las proteínas y la actividad enzimática, sin embargo, los fitatos también han mostrado efectos positivos en la salud como actividad anticarcinogénica y antioxidante al inhibir la producción de radicales hidroxílicos. En el amaranto se han identificado 6 tipos de saponinas en baja concentración (0.9-4.91 mg/kg) y ácido fítico (2.9-7.9 g/kg) (Kumar y col 2010; Tang y col 2017).

6. Valor e importancia nutricional

Los granos de amaranto son una fuente importante de proteínas, sus contenidos de calcio y hierro son mayores que en la leche y trigo, respectivamente, y sus contenidos de potasio, fósforo, y vitaminas A, E, C y ácido fólico son más altos que en otros cereales. Uno de los productos obtenidos de su procesamiento es la harina de amaranto que se utiliza comúnmente en la elaboración de pan, galletas, cereales, pastas y botanas, además que su composición química permite fortificar productos

elaborados con otros cereales elaborando mezclas con ellos. Recientemente, se han evaluado las propiedades tecnológicas y nutricionales de productos elaborados o fortificados con amaranto y se ha encontrado que presentan actividad antioxidante, antihiperlipidémico, hipolipidémico y antiinflamatorio, además son aptos para el consumo por personas con enfermedad celiaca (intolerancia al gluten) y se han observado cambios muy pequeños en sus propiedades durante tiempos de almacenamiento largos (SADER 2019; Baraniak y Kania 2022).

7. Propiedades nutraceuticas

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante es una medida de la capacidad de un compuesto por contrarrestar el efecto oxidativo de las especies reactivas de oxígeno (ROS). En el amaranto se han encontrado diversos compuestos con actividad antioxidante como ácidos grasos, carotenoides, compuestos fenólicos y tocoferoles que reducen el estrés oxidativo en tejidos y órganos (Tang y col 2017).

Actividad antiinflamatoria

Estudios realizados en extractos de amaranto demostraron que los compuestos contenidos en los extractos permiten disminuir la producción de NO e incrementar los niveles de NO_3^- y NO_2^- , además de disminuir citoquinas proinflamatorias (IL-6) (Tyszka y col 2015; Subramanian y col 2016).

IV. JUSTIFICACIÓN

La obesidad en México es un problema de salud alarmante que prevalece con hasta 80 % de la población, es decir, 8 de cada 10 personas presentan obesidad y, además, se asocia con el incremento de riesgo a padecer enfermedades crónico-degenerativas u otras consecuencias como diabetes, dislipidemia, enfermedad coronaria, disfunción cognitiva, cáncer, entre otras. Uno de los factores a los que se atribuye la incidencia de estos problemas en la salud es la alimentación que se relaciona con: (1) el consumo excesivo de alimentos con altos contenidos calóricos y de grasas (frituras, galletas, golosinas, entre otros), y (2) la falta de conocimiento sobre productos alimenticios saludables. Las frituras son botanas crujientes y secas que se obtienen por freído en aceites o grasas; debido a su preparación y a los aditivos, estas botanas suelen ser de alto contenido calórico y su ingesta promueve el sobrepeso y la malnutrición, sin embargo, en la actualidad ya se producen botanas saludables por procesos alternativos y su preparación trata de no utilizar aceites o grasas e involucra materias primas con mejores características nutricionales y antioxidantes. Los granos de maíz son una rica fuente de compuestos fenólicos, fibra, minerales y vitaminas; por otro lado, los granos de amaranto son una rica fuente de proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos esenciales, compuestos fenólicos, vitaminas y minerales por lo que ambos granos representan aportes notables en la salud. Debido a la importancia de una buena salud derivada de la alimentación y lo que las botanas representan en el sector alimentario, el presente trabajo propone desarrollar una botana saludable que presente valores nutricionales y antioxidantes altos, y buena aceptabilidad sensorial a partir de una mezcla de maíz azul con amaranto por medio del proceso de extrusión.

V. HIPÓTESIS

La botana saludable elaborada a partir de maíz azul y amaranto con condiciones optimizadas de extrusión presenta alto valor nutricional y antioxidante, además de características físicas, fisicoquímicas, texturales y morfométricas y adecuadas para una botana de segunda generación.

VI. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una botana saludable de segunda generación con características texturales aceptables, y valor nutricional / antioxidante alto a partir de mezclas de maíz azul (*Zea mays* L.) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) aplicando la tecnología de extrusión.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener los modelos matemáticos por regresión de mínimos cuadrados para cada una de las variables de respuesta [Índice de Expansión Radial (**IER**), Densidad Aparente (**DA**), Dureza (**Du**), Actividad Antioxidante (**AAox**), Compuestos Fenólicos Totales (**CFT**), Flavonoides Totales (**FT**), Digestibilidad Proteínica in vitro (**DPiV**)] en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**), Proporción de Harina de Amaranto (**PHA**)] que se establecen en el diseño experimental.
2. Optimizar las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT**, **PHA**) para obtener una botana saludable (botana extrudida expandida optimizada, **BEEO**) con buenas características de textura (**IER**, **DA**, **Du**) y características nutricionales y antioxidantes altas (**AAox**, **CFT**, **FT**, **DPiV**).
3. Validar las condiciones óptimas de extrusión.
4. Caracterizar física, fisicoquímica, química, textural, morfométrica, nutricional, antioxidante y fitoquímicamente las **BEEO**.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES

Se utilizará maíz azul (*Zea mays* L.) obtenido del mercado en Celaya, Guanajuato, México, y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) adquirido del mercado en Temoac, Morelos, México.

B. MÉTODOS

1. Caracterización de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

a. Características físicas de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

1) Dimensiones

Las dimensiones longitud, anchura y grosor del grano de maíz azul se determinaron utilizando un vernier digital. Asimismo, las dimensiones longitud y anchura del grano de amaranto se determinaron utilizando un estereoscopio. Las mediciones se realizaron en 25 semillas de maíz azul y amaranto seleccionadas al azar y las determinaciones de las dimensiones se llevaron a cabo por triplicado (Milán y col 2002).

2) Peso de 1,000 semillas

Este atributo de las semillas se encuentra dado por su tamaño y densidad. 1000 semillas fueron seleccionadas aleatoriamente a partir de un lote de semillas limpias y se pesaron utilizando una balanza analítica. Las determinaciones se realizaron por triplicado utilizando distintos lotes.

3) Peso hectolítrico

Para cuantificar el peso hectolítrico se utilizó el procedimiento 55-10.01 de la AACC (2010) utilizando una microescala. Se utilizó un recipiente de volumen conocido (100 mL) y se llenó de semillas de maíz azul seleccionadas aleatoriamente para posteriormente pesar en una balanza analítica. El peso hectolítrico se obtuvo como un cálculo de densidad al dividir el peso de los granos entre el volumen del recipiente y, posteriormente, relacionándolo a un volumen de 100 L (kg / hL). La determinación del peso hectolítrico para el amaranto se realizó mediante el mismo procedimiento utilizando un recipiente de 50 mL, y se realizaron 10 réplicas para cada semilla.

b. Propiedades fisicoquímicas de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

1) Diferencia total de color (ΔE)

La diferencia total de color de las muestras de maíz azul y amaranto se calculó con un colorímetro empleando la metodología descrita por Reyes y col (2002). El sistema de color Hunter L, a, b es un espacio tridimensional rectangular, en el cual L (brillantez) indica el grado de luminosidad u oscuridad del material, variando desde 0 para tonos negros u opacos hasta 100 para tonos blancos o brillantes. Los parámetros de cromaticidad están representados por a y b, donde a corresponde al eje rojo-verde con valores positivos para los tonos rojos y negativos para los verdes, mientras que b corresponde al eje amarillo-azul con valores positivos para los tonos amarillos y negativos para los azules.

Se colocaron 100 g de muestra sobre una tapa de caja Petri de vidrio Kimax de 15

cm de diámetro y se registraron los parámetros L, a y b medidos por el colorímetro. Se utilizó un mosaico blanco como referencia (estándar) de valores L, a y b conocidos (L = 96.46, a = 0.09, b = 1.87) y la diferencia total de color (ΔE) de las muestras se calculó con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

Donde: ΔE es la diferencia total de color entre el estándar y la muestra, y ΔL , Δa y Δb son las diferencias absolutas de los valores de L, a y b del estándar y los valores de la muestra. Los valores L, a, b y ΔE se determinaron por triplicado.

2) Actividad acuosa (a_w)

Para evaluar la actividad de agua (a_w) se utilizó la metodología descrita por Milán y col (2002). Se tomaron 2 g de muestra que se dispusieron en una celda portamuestras dentro de un higrómetro marca Aqualab. El equipo se dejó estabilizar durante un período de 40 a 60 minutos y la calibración del instrumento se llevó a cabo utilizando una solución saturada de cloruro de potasio ($a_w = 0.876$). Las mediciones se realizaron por triplicado a una temperatura controlada de 25 ± 1 °C.

c. Composición química de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

1) Humedad

El contenido de humedad se determinó de acuerdo con el método 925.09B de la AOAC (1999). Se pesaron 2 g de muestra sobre una cápsula a peso constante, y las muestras se calentaron en dos periodos: (1) 80 °C durante 18 h y (2) 130 °C durante

1 h. El contenido de humedad se calculó por diferencia de peso después del secado de la muestra, y las determinaciones se realizaron por triplicado.

2) Proteína

El contenido de proteínas se determinó indirectamente con el contenido de nitrógeno a partir del método 960.52 de la AOAC (1999). Se tomaron 0.2 g de muestra y se mezclaron con 5 mL de H₂SO₄ y mezcla reactiva de selenio para digerir a una temperatura de 200 °C. La muestra digerida se diluyó en 15 mL de agua destilada y se destiló empleando disoluciones de NaOH al 40 % y H₃BO₃ al 4 % como indicador para recibir el destilado. La titulación se llevó a cabo con una disolución valorada de HCl 0.1 N, y la proteína cruda se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno total por un factor de conversión ($FC = 6.25$). La prueba se realizó por triplicado.

3) Lípidos

El contenido de lípidos se cuantificó de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Se realizó la extracción de lípidos en muestras de 3 - 4 g utilizando un extractor Soxhlet y empleando éter de petróleo como disolvente. Las determinaciones se realizarán por triplicado.

4) Cenizas

Para la determinación de cenizas se utilizó el método 934.01 de AOAC (1999). Una muestra de 3 - 5 g se colocó sobre un crisol de porcelana a peso constante, y se llevó a incinerar en mufla a 550 °C durante una noche hasta obtener una ceniza gris luminosa con peso constante. Las muestras incineradas se enfriaron en desecador

hasta alcanzar temperatura ambiente (25 °C), y posteriormente se pesaron. La prueba se realizó por triplicado.

5) Fibra cruda

Para la determinación de fibra cruda se utilizó el método 978.10 de AOAC (2012). Se pesaron 0.5 g de muestra desgrasada (W_1) y 0.5 g de celita en crisoles Gooch Pyrex de vidrio. Los crisoles se colocaron sobre un sistema para determinación de fibra cruda (FT 122 Fibertec™) y las muestras se hidrolizaron en dos pasos: (1) hidrólisis ácida con 150 mL de H_2SO_4 1.25 % (previamente calentado hasta ebullición), y (2) hidrólisis alcalina con 150 mL de KOH 1.25 % (previamente calentado hasta ebullición). Cada etapa hidrolítica se llevó a cabo durante 30 min después de ebullición y se realizaron dos filtrados con agua destilada hirviendo, y un tercer filtrado con acetona. Las muestras se secaron a 130 °C durante 1 h y se incineraron a 550 °C durante 3 h. Los pesos de los crisoles con las muestras secas y quemadas se registraron como W_2 y W_3 , respectivamente, y el contenido de fibra cruda se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{W_2 - (W_3 + C)}{W_1} * 100 \quad (2)$$

Donde: W_1 = peso de la muestra, W_2 = peso del crisol + muestra seca, W_3 = peso del crisol + muestra incinerada, y C = pérdida de celita calculada a partir de un control.

6) Carbohidratos

El contenido de carbohidratos se calculó por diferencia a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{Carbohidratos (bs)} = 100 - \text{Proteína} - \text{Lípidos} - \text{Cenizas} - \text{Fibra cruda} \quad (3)$$

d. Caracterización nutricional de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

1) Digestibilidad proteínica in vitro

La digestibilidad proteínica *in vitro* (*DPIV*) se determinó con el procedimiento descrito por Rathod y col (2016) con algunas modificaciones. Se incubó 1 g de muestra con 15 mg de pepsina en 20 mL de HCl 0.1 N a 37 °C durante 3 h en un baño maría con agitación moderada. Al terminar el periodo de incubación, se neutralizó la muestra añadiendo 10 mL de NaOH 0.2 N y el pH se ajustó a 8.0. Posteriormente, se agregaron 40 mg de pancreatina en 7.5 mL de una solución reguladora de fosfatos (PBS) pH = 8.0 y se dejó reposar a 37 °C durante 24 h con agitación moderada. Al terminar el periodo de incubación, se añadieron 700 µL de ácido tricloroacético. La muestra se lavó con agua destilada, se centrifugó a 5000 rpm durante 10 min, y el precipitado se secó a 45 °C y se utilizó para cuantificación de proteínas en MicroKjehldal bajo el método descrito en el apartado **VII.B.1.c.2)** Las determinaciones se realizaron por triplicado utilizando caseína como control y los valores de *DPIV* se calcularon como:

$$DPIV (\%) = \frac{\text{Proteína total} - \text{Residuo de proteína}}{\text{Proteína total}} * 100 \quad (4)$$

2) Contenido de triptófano

El contenido de triptófano se determinó siguiendo el método descrito por Nurit y col (2009) basado en el ácido glioxílico. Se pesaron 20 mg de muestra seca desgrasada y se hidrolizaron con 1 mL de una solución degradadora compuesta por papaína 0.1%

(p/v), bromelaína 0.02% (p/v), polivinilpolipirrolidona (PVPP) 0.5% (p/v), 50 mL de acetato de sodio 0.1 M y EDTA 0.5 M al 0.1% (v/v). La muestra se homogeneizó y se incubó a 65°C durante toda la noche y el sobrenadante se recuperó por centrifugación a 14,000 x g durante 5 min. En una microplaca de 96 pocillos se inyectaron 50 µL de cada muestra y de una curva estándar de triptófano en concentraciones conocidas (0, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mg / mL), posteriormente se hicieron reaccionar con 150 µL de reactivo colorimétrico [(ácido glioxílico 0.1 M, cloruro férrico 1.8 mM en 20 mL de ácido sulfúrico 7N) más 20 mL de ácido sulfúrico 30N] y la microplaca se incubó a 65 °C durante 1 h. Finalmente, la cuantificación de triptófano en las muestras se realizó la absorbancia a 560 nm utilizando un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur).

e. Caracterización antioxidante y fitoquímica de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

1) Actividad antioxidante

a) Obtención de los extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

La obtención de los compuestos fenólicos libres se realizó suspendiendo 0.5 g de muestra en 10 mL de una mezcla de etanol y agua 80:20, (v / v), según el método descrito por Dewanto y col (2002). La muestra suspendida se agitó en un homogeneizador rotatorio de tubos a 50 rpm durante 10 min, luego se centrifugó a 8000 rpm a 10 °C durante 10 min, y la pastilla remanente se sometió a una segunda extracción con etanol al 80 % bajo el mismo procedimiento descrito. Los sobrenadantes de ambas extracciones se combinaron, se evaporaron hasta sequedad y se almacenaron a -20 °C hasta su posterior uso. El sedimento obtenido después de

la extracción de compuestos fenólicos libres se desgrasó suspendiendo en 10 mL de hexano para posterior agitación y centrifugación, el hexano se recuperó y el sedimento se hidrolizó con NaOH 2 M en dos pasos: (1) a 95 °C durante 30 min con agitación moderada cada 5 min y (2) a 25 °C durante 60 minutos en agitación en un homogeneizador de tubos a 50 rpm. La muestra se neutralizó añadiendo 2 mL HCl 37.5 %, y los extractos fenólicos ligados se obtuvieron mediante cuatro extracciones con 10 mL de acetato de etilo, siguiendo el método de Adom y Liu (2002) y Adom y col (2003). Estos extractos se evaporaron hasta sequedad y se almacenaron a -20 °C hasta su uso. Todas las extracciones de compuestos fenólicos libres y ligados se llevaron a cabo por cuadruplicado.

b) Determinación de actividad antioxidante (AAox) en extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

La actividad antioxidante (AAox) fue evaluada utilizando el método de decoloración descrito por Re y col (1999). Se preparó una solución de ABTS suspendiendo 0.0192 g del radical en 5 mL de una solución de $K_2S_2O_8$ 2.45 mM, la cual se dejó reposar en oscuridad durante al menos 16 horas para el desarrollo del radical. Posteriormente, se diluyeron 500 μ L de esta solución en 45 mL de una solución reguladora de fosfatos (PBS) pH = 7.4, y se ajustó su absorbancia a 0.7 - 1.0 a 734 nm. Una vez ajustada la absorbancia del radical, se mezclaron 1980 μ L de esta solución con 20 μ L de extracto en tubos eppendorf de 2 mL y se registró su absorbancia a 734 nm en un lector de cubetas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur) después de 6 minutos de incubación. Las mediciones se realizaron por cuadruplicado y los resultados de

AAox se expresaron como μmol equivalentes de Trolox (ET) / 100 g de muestra en base seca (bs).

2) Contenido de compuestos fenólicos totales

Para cuantificar el contenido total de compuestos fenólicos (CFT), se siguió la metodología descrita por Singleton y col (1999). Se preparó una solución estándar de ácido gálico en etanol 96 %, y se introdujeron 20 μL de etanol 96 % (blanco de referencia) y solución estándar (25 - 600 ppm), así como extractos libres y ligados en una microplaca de 96 pocillos. Cada punto de la curva estándar y extracto se hizo reaccionar con 180 μL del reactivo Folin-Ciocalteu durante 3 min, y posteriormente se añadieron 50 μL de NaCO_3 7 %. La microplaca se dejó incubar a 25 °C durante 90 min y la absorbancia de las muestras se leyó a 750 nm utilizando un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur). Los resultados de CFT se calcularon sumando los compuestos fenólicos presentes en los extractos libres y ligados como miligramos equivalentes de ácido gálico (EAG) / 100 g de muestra en base seca (bs). La cuantificación de CFT en cada extracto, así como de cada punto de la curva estándar se realizó por cuadruplicado.

3) Contenido de flavonoides totales

Se llevó a cabo la determinación de flavonoides totales (TF) utilizando el ensayo colorimétrico descrito por Xu y Chang (2007). Se preparó una solución estándar de quercetina en etanol 96 %, y se inyectaron 20 μL etanol 96 % (blanco de referencia) y solución estándar (25 - 600 ppm), así como de extractos libres y ligados en una placa de 96 pocillos. Posteriormente, el blanco de referencia y cada punto de la curva estándar y extracto se diluyeron en 80 μL de agua destilada y se hicieron reaccionar

con 6 µL de NaNO₂ y 12 µL de AlCl₃, dejando reposar las mezclas durante 5 minutos después de cada adición. Finalmente, se agregaron 40 µL de NaOH 1 M con 20 µL de agua destilada y los extractos se dejaron reposar durante 30 minutos. La absorbancia se midió a 425 nm utilizando un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur) y los valores de FT se calcularon sumando los flavonoides presentes en los extractos libres y ligados. Todas las mediciones se realizaron por cuadruplicado y los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de quercetina (EQ) / 100 g de muestra en base seca (bs).

4) Contenido de antocianinas totales

El contenido de antocianinas (CAT) se evaluó de acuerdo con la metodología descrita por Abdel-Aal y Hucl (1999). La extracción de antocianinas se realizó suspendiendo 1 g de muestra en 10 mL de una solución de metanol acidificado [metanol al 95%: HCl (1 N), 85:15 (v/v)] en tubos nalgene para centrífuga. Las suspensiones se agitaron en un homogeneizador rotatorio de tubos a 50 rpm durante 30 min y se centrifugaron a 8000 rpm a 4 °C durante 10 min. El sobrenadante se recolectó y se almacenó a 4 °C hasta su uso. Para la determinación de CAT, se inyectaron 200 µL de extracto en una microplaca de 96 pocillos, y la absorbancia de los extractos se midió a 535 y 700 nm en un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur). Las determinaciones se realizaron por triplicado y el contenido de antocianinas se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{CAT} = \frac{(A_{535} - A_{700})(V)(PM)(L)}{(\epsilon)(m)} * 100 \quad (5)$$

Donde: **CAT** = Contenido de antocianinas totales [mg equivalentes de Cianidina-3-Glucósido (EC3G) / 100 g de muestra], **A** = absorbancia, **V** = volumen (L), **PM** = Peso molecular de la Cianidina-3-Glucósido (449200 mg / mol), **L** = distancia que recorre la luz (cm), **ε** = Absorción molar de la Cianidina-3-Glucósido (25,965 cm / M), **m** = peso de la muestra (g).

2. Proceso de optimización de extrusión para producir botanas extrudidas expandidas optimizadas a partir de maíz azul y amaranto

a. Diseño experimental

La obtención de distintas botanas extrudidas expandidas a partir de mezclas de maíz azul y amaranto se realizó siguiendo un diseño experimental central compuesto rotatable de 20 tratamientos (**Cuadro 11**) con tres variables de proceso (variables independientes): temperatura de extrusión (**TE**, 120 - 170 °C) tomando un gradiente de temperatura de 10 °C hacia abajo entre cada zona del extrusor, velocidad de tornillo (**VT**, 50 - 240 rpm) y nivel de inclusión de harina de amaranto (**HA**, 0 - 70 %). Asimismo, las variables de respuesta (variables dependientes) seleccionadas fueron: índice de expansión radial (**IER**), densidad aparente (**DA**, g/cm³) y dureza (**Du**, N) como pruebas de calidad sensorial en botanas, actividad antioxidante (**AAox**, μmol ET / 100 g, bs), contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**, mg EAG / 100 g, bs) y contenido de flavonoides totales como pruebas de calidad antioxidante y fitoquímica. (**FT**, mg EQ / 100 g, bs) y digestibilidad proteínica *in vitro* como prueba de calidad nutricional (**DPIV**, %). Todas las variables de respuesta, así como también las variables de proceso y sus diferentes niveles fueron seleccionados en base a revisión de literatura.

b. Preparación de las mezclas

Siguiendo la metodología planteada por Félix y col (2020), se emplearon lotes de 350 g de mezclas de semillas de maíz azul (**Ma**) y amaranto (**Am**). Los granos de **Ma**

Cuadro 11. Diseño experimental con las combinaciones de variables de proceso para la elaboración de botanas extrudidas expandidas (**BEE**) a partir de mezclas de maíz azul (**Ma**) y amaranto (**Am**).

Trat.	Variables de proceso			Variables de respuesta						
	TE ¹	VT ²	PHA ³	IER ⁴	DA ⁵	Du ⁶	AAox ⁷	CFT ⁸	FT ⁹	DPIV ¹⁰
1	130.1	88.5	14.2	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
2	159.9	88.5	14.2	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
3	130.1	201.5	14.2	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
4	159.9	201.5	14.2	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
5	130.1	88.5	55.8	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
6	159.9	88.5	55.8	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
7	130.1	201.5	55.8	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
8	159.9	201.5	55.8	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
9	120	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?

10	170	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
11	145	50	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
12	145	240	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
13	145	145	0	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
14	145	145	70	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
15	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
16	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
17	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
18	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
19	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?
20	145	145	35	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?	¿?

¹ **TE** = Temperatura de Extrusión (°C). ² **VT** = Velocidad de Tornillo (rpm). ³ **HA** = nivel de inclusión de Harina de Amaranto (%). ⁴ **IER** = Índice de Expansión Radial (adimensional). ⁵ **DA** = Densidad Aparente (g/cm³). ⁶ **Du** = Dureza (N). ⁷ **AAox** = Actividad Antioxidante (μmol ET / 100 g muestra, bs). ⁸ **CFT** = Contenido de Compuestos Fenólicos Totales (mg EAG / 100 g muestra, bs). ⁹ **FT** = Contenido de Flavonoides Totales (mg EQ / 100 g muestra, bs). ¹⁰ **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in vitro* (%).

y **Am** se fragmentaron en un molino de martillos hasta que estos pasaran a través de una malla #40 (0.425 mm), y las harinas crudas obtenidas se mezclaron (0 - 70 % **HA**) y se acondicionaron a un contenido de humedad de 18 % añadiendo agua purificada.

c. Proceso de extrusión

La extrusión se llevó a cabo con la misma metodología reportada por Félix y col (2020) en un extrusor de tornillo simple con diámetro de tornillo de 19 mm, relación de longitud a diámetro 3:1, razón de compresión nominal 1:1 y dado de salida con 5 mm de apertura. El barril está dividido en dos zonas (zona 1: alimentación y zona 2: central) calentadas eléctricamente y enfriadas por aire, y una tercera zona se encuentra acoplada en el dado o matriz, la cual también es calentada eléctricamente, pero no enfriada por aire. Las tres zonas de calentamiento fueron programadas con un gradiente de temperatura de $\Delta T = 10$ °C hacia abajo. Una tolva de alimentación accionada por tornillo alimentó al extrusor a 30 rpm con una velocidad de alimentación de 70 g / min. La temperatura de extrusión, definida como la temperatura a la salida del cilindro (zona 3), y la velocidad del tornillo fueron empleadas de acuerdo con el diseño experimental mostrado en el **Cuadro 11**. Los extrudidos o botanas extrudidas expandidas (**BEE**) se recolectaron para realizar las determinaciones en fresco de tres características de calidad en botanas (variables de respuesta): (1) **IER** = Índice de Expansión Radial, (2) **DA** = Densidad Aparente y (3) **Du** = Dureza y, posteriormente, se dejaron secar en charolas de aluminio perforadas en condiciones ambientales (25 °C, 65 % HR) durante 8 h con ayuda de un abanico doméstico. Las **BEE** se molieron en un molino de martillos para pasar a través de una malla #80 (0.180 mm) y obtener harinas de **BEE**, las cuales se empaquetaron en bolsas de plástico y se almacenaron

a 4 °C hasta realizar la determinación de cuatro propiedades restantes (variables de respuesta): (1) **AAox** = Actividad antioxidante, (2) **CFT** = Contenido de Compuestos Fenólicos Totales, (3) **FT** = Contenido de Flavonoides Totales y (4) **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in vitro*.

d. Medición de las variables de respuesta

1) Índice de expansión radial

A las botanas extrudidas expandidas (**BEE**) obtenidas de los diferentes tratamientos del diseño experimental se les evaluó el índice de expansión (**IE**) de acuerdo con la metodología propuesta por Gujska y Khan (1990). Las **BEE** se cortaron en pequeños cilindros de 50 mm y el diámetro se midió por triplicado en extremos y centro utilizando un vernier digital. Posteriormente, se calculó el valor de **IER** como una relación entre el diámetro promedio de la botana y el diámetro del orificio de la boquilla del extrusor (5 mm).

2) Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente (**DA**) de las **BEE** se realizó acorde al procedimiento descrito por Wang y col (1993). Las **BEE** fueron cortadas en pequeños cilindros de 50 mm de largo, y 10 muestras fueron seleccionadas aleatoriamente para la determinación de: (1) diámetro (**d**) por triplicado en extremos y centro, (2) longitud (**l**), y (3) peso de la muestra (**Pm**). Finalmente, el valor de **DA** se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$DA = \frac{Pm}{\pi(0.5d)^2(l)} \quad (6)$$

3) Dureza

Se determinó la dureza (**Du**) de las **BEE** siguiendo el método descrito por Park y col (1993). Se utilizó un texturómetro adaptado para realizar pruebas de punción, midiendo la fuerza necesaria para penetrar las **BEE** (Fuerza de punción = Dureza). Cada muestra de **BEE**, con una longitud de 5 cm, se posicionó horizontalmente sobre un plato de acero inoxidable y se colocó debajo de una probeta de 2 mm de diámetro. La probeta se programó para desplazarse hacia la **BEE** a una velocidad de 2 mm / s y una carga de 500 kgf hasta penetrar un 60 % de su diámetro. Se realizaron 90 repeticiones para cada muestra.

4) Actividad antioxidante

La actividad antioxidante (**AAox**) de las **BEE** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.1).b)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS.**

5) Contenido de compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) de las **BEE** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.2)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS.**

6) Contenido de flavonoides totales

El contenido de flavonoides totales (**FT**) de las **BEE** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.3)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS.**

7) Digestibilidad proteínica *in vitro*

La digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) de las **BEE** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.d.1)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

e. Análisis de varianza y regresión

Se empleó la metodología de superficie de respuesta (MSR) mediante regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados para analizar la relación entre las variables de proceso o variables independientes [**TE** (X_1), **VT** (X_2) y **HA** (X_3)] y las variables de respuesta o variables dependientes [**IER** (Y_1), **DA** (Y_2), **Du** (Y_3), **AAox** (Y_4), **CFT** (Y_5), **FT** (Y_6) y **DPIV** (Y_7)]. Se utilizó un modelo empírico representado por la "caja negra" en la **Figura 7** para describir esta relación. Dentro del modelo matemático de la "caja negra", se incluyen las variables de respuesta **IER**, **DA**, **Du**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV** ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ y 7 , respectivamente), donde β_{k0} , β_{ki} , β_{kii} y β_{kij} representan la constante, y los coeficientes lineales, cuadráticos y de interacción, respectivamente, los términos X_i , X_i^2 y X_iX_j indican los efectos lineales, cuadráticos y de interacción de las variables independientes, respectivamente, y ϵ denota el error asociado al modelo.

Para cada variable de respuesta, se ajustó una ecuación polinómica de segundo grado mediante regresión lineal múltiple utilizando los datos experimentales de **IER**, **DA**, **Du**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV** recopilados de 20 muestras de botanas extrudidas expandidas (**BEE**). En el análisis de regresión, se eliminaron los términos no significativos ($p > 0.1$) del polinomio de segundo grado exceptuando aquellos que permiten tener un mejor ajuste de los parámetros de regresión, se recalculó el modelo y se obtuvo un modelo de predicción para cada variable de respuesta (Myers 1977).

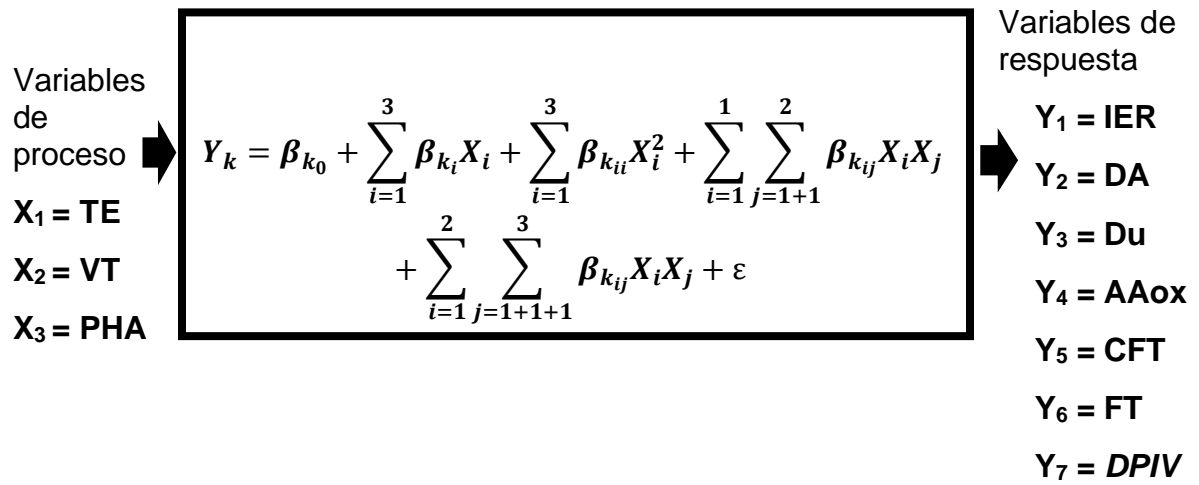


Figura 7. Modelo matemático de la "caja negra" que muestra la relación entre las variables de proceso y de respuesta del proceso de extrusión.

Los modelos de predicción resultantes se utilizaron para generar gráficos de superficie de respuesta que muestran cómo las variables de respuesta son influenciadas por las variables de proceso.

f. Optimización

Se utilizó el método numérico de deseabilidad propuesto por De la Vara y Domínguez (2002) para determinar la combinación óptima de las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT** y **HA**) con el fin de producir botanas saludables que maximicen los valores de **IER**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV**, y minimicen los valores de **DA** y **Du**. Se empleó la ecuación de transformación siguiente para calcular los valores de deseabilidad individual ($d_i(X)$) de cada variable de respuesta en un rango de 0 a 1:

$$d_i(X) = \begin{cases} 0 & \text{Si } \hat{Y}_i(X) \leq Y_{i*} \\ \frac{\hat{Y}_i(X) - Y_{i*}}{Y_i^* - Y_{i*}} & \text{Si } Y_{i*} \leq \hat{Y}_i(X) \leq Y_i^* \\ 1 & \text{Si } \hat{Y}_i(X) \geq Y_i^* \end{cases} \quad (7)$$

Donde: $d_i(X)$ = Valor de la deseabilidad de la i -ésima variable de respuesta, $\hat{Y}_i(X)$ = Variable de respuesta estimada, Y_i^* = Máximo valor aceptable de la i -ésima variable de respuesta, Y_{i*} = Mínimo valor aceptable de la i -ésima variable de respuesta.

Una vez obtenidas las deseabilidades individuales para cada variable de respuesta, se calculó la deseabilidad global mediante la siguiente ecuación:

$$D = (d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6 d_7)^{1/7} \quad (8)$$

Se considera que valores de deseabilidad global entre 0.6 y 0.8 son adecuados para sistemas alimenticios, siendo $D = 1$ el valor óptimo ideal. Todos los cálculos de

deseabilidades individuales (d_i) y deseabilidad global (D) se realizaron utilizando el software Design Expert versión 11.1.2.0.

3. Caracterización de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO) a partir de diferentes mezclas de maíz azul y amaranto

a. Obtención de las BEEO

Una vez que se encontraron las condiciones óptimas para el proceso de extrusión, se produjeron botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**) a partir de mezclas de maíz azul (**Ma**) y amaranto (**Am**), siguiendo el procedimiento descrito en la sección **B.6.c.** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**. Posteriormente, se evaluaron diversas propiedades de estas **BEEO**, entre las que se incluyen aspectos físicos, fisicoquímicos, texturales, morfométricos, nutrimentales, nutricionales, antioxidantes y fitoquímicos. La obtención de dichas **BEEO** se llevó a cabo en cinco réplicas independientes.

b. Características físicas, texturales y morfométricas de las BEEO

1) Índice de expansión

El Índice de Expansión radial (**IER**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.2.d.1)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

2) Densidad aparente

La Densidad Aparente (**DA**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.2.d.2)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

3) Dureza

La Dureza (**Du**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.2.d.3)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

4) Crispness / crunchiness

El Crispness y Crunchiness suelen estar relacionadas con la fuerza mecánica necesaria para comprimir los alimentos hasta que se fracturen en fragmentos pequeños, reflejando la facilidad de fractura o la fragilidad de la estructura. Para evaluar estas características de textura, las BEEO se cortaron en pequeñas muestras de 5.0 ± 0.1 cm de longitud, y aleatoriamente se seleccionaron 60 para realizar la prueba. Se utilizó un analizador de textura (AMETEK, LS, USA) con el software NEXIGEN PLUS 4.0 para obtener los datos de crispness y crunchiness. Los aditamentos y condiciones de prueba fueron: una punta (probeta) de 50 mm de diámetro, velocidad de compresión de 10 mm/min, distancia de compresión 90 % del diámetro de la muestra. El valor de crispness se determinó como la suma de las fuerzas a lo largo de la curva fuerza-deformación, mientras que el crunchiness se calculó como el trabajo realizado durante la prueba, y el trabajo crispness (W_c) se determinará como el cociente de crunchiness multiplicado por el número total de picos (Valenzuela y col 2018)

A partir de la curva de fuerza-deformación, se obtuvieron el número de picos **n**, la integral de la curva **S** (o área debajo de la curva del 100 % de la tensión) y la distancia de compresión **d**. Los parámetros se calcularon a partir de n, S y d (Van y col 1998).

$$W_c = F_{cr}N_{sr} = Sdnd(N)(mm) \quad (9)$$

Donde: N_{sr} es el número de rupturas espaciales (# picos), F_{cr} es la fuerza de trituración media (área bajo la curva) y W_c es el trabajo crípsness.

5) Propiedades morfométricas

a) Adquisición de imágenes con Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Se analizó la morfología de las muestras utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) modelo EVO LS 10 (Carl Zeiss, Alemania). Las muestras estaban secas y no habían recibido ningún tratamiento previo, y se montaron en portaobjetos utilizando cinta doble adhesiva de carbono. Se realizaron cortes transversales y longitudinales, centrándonos en el análisis de la morfología interna. La observación se llevó a cabo bajo condiciones de presión reducida mediante la introducción de vapor de agua en la cámara del microscopio, ajustada a una presión de 10 Pa. Se empleó un detector de electrones secundarios con un voltaje de aceleración de 8 kV (Espinosa et al., 2016).

b) Análisis Digital de Imágenes (ADI)

Las imágenes capturadas con MEB se procesaron en el software ImageJ v.1.50d (National Institutes of Health, USA), realizando el análisis fractal por el método de conteo de cajas a través del plugin FracLac Box-Counting para la cuantificación de los parámetros dimensión fractal de textura (D_{ft}) y lagunaridad (Λ_t).

Las imágenes originales capturadas por MEB (1024 x 692 px) fueron cortadas en cuatro imágenes de menor tamaño (512 x 346 px) para facilitar un análisis estadístico más detallado de los parámetros medidos. Se procedió a ajustar automáticamente el brillo y el contraste de las imágenes utilizando una escala de grises, y los parámetros

D_{ft} y Λ_t se calcularon con base en los valores de intensidad de gris de los píxeles de cada imagen (Espinosa y col 2016).

c) Dimensión Fractal de textura (D_{ft}) y lagunaridad (Λ_t)

La dimensión fractal de la textura se determinó siguiendo la metodología descrita por Valenzuela y col (2018), que emplea el método de conteo de cajas. Este método estima la pendiente log-log de la relación entre el tamaño de la caja (r) y la diferencia en intensidad de nivel de gris (I), utilizando la siguiente ecuación:

$$D_{ft} = \frac{\log I(r)}{\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (10)$$

Además, la lagunaridad de las imágenes se determinó calculando la desviación estándar (σ) y el promedio (η) de la intensidad de nivel de gris por píxel en cada caja de un tamaño específico, considerando todas las orientaciones (g) (Valenzuela y col 2018).

$$\Lambda_t = \left(\frac{\sigma}{\eta}\right)_{r,g}^2 \quad (11)$$

c. Características fisicoquímicas de las BEEO

1) Diferencia total de color

La diferencia total de color (ΔE) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.b.1)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

2) Actividad acuosa

La actividad acuosa (a_w) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.b.2)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

d. Composición química de las BEEO

1) Humedad

El contenido de humedad de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.1)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

2) Proteína

El contenido de proteína de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.2)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

3) Lípidos

El contenido de lípidos de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.3)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

4) Cenizas

El contenido de cenizas de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.4)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

5) Fibra cruda

El contenido de fibra cruda de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.5)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

6) Carbohidratos

El contenido de carbohidratos de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.c.6)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

e. Características nutricionales de las BEEO

1) Digestibilidad proteínica *in vitro*

La digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.d.1)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

2) Triptófano

El contenido de triptófano (**Trp**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.d.2)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

f. Propiedades antioxidantes y fitoquímicas de las BEEO

1) Obtención de extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

Los compuestos fenólicos libres y ligados de las **BEEO** se obtuvieron utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.1).a)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

2) Actividad antioxidante

a) Determinación de actividad antioxidante por el método ABTS

La actividad antioxidante (**AAox**) por ABTS de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.1).b)** del capítulo **VII. MATERIALES Y**

MÉTODOS.

b) Determinación de actividad antioxidante por el método DPPH

Para cuantificar la actividad antioxidante (**AAox**) por el método DPPH, se siguió la metodología descrita por Shimamura y col (2014). Este método se utilizó para determinar la capacidad de los antioxidantes presentes en las **BEEO** para donar hidrógenos y/o electrones para eliminar los radicales DPPH (2,2-dienil-1-picrahidrazil) al crear la forma no radical DPPH-H. Cuando el radical libre es capturado, el color de la solución de DPPH cambia de un color morado oscuro a un amarillo brillante y la absorbancia a 520 nm disminuye (Brand y col 1995). Se preparó una solución estándar de trolox en etanol 96 %, y se introdujeron 20 μ L de etanol 96 % (blanco de referencia) y solución estándar (25 - 600 ppm), así como extractos libres y ligados en una microplaca de 96 pocillos. Posteriormente, se añadieron 200 μ L de una solución DPPH (0.2 μ M) previamente ajustada a una absorbancia entre 0.7 - 1.0 a 520 nm, y la microplaca se dejó incubar a 25 °C durante 30 min. La absorbancia de las muestras se leyó a 520 nm utilizando un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (Thermo Scientific, Singapur) y los resultados de **AAox** se calcularon sumando el valor de actividad antioxidante en los extractos libres y ligados como μ mol equivalentes de trolox (ET) / 100 g de muestra en base seca (bs). La cuantificación de **AAox** en cada extracto, así como de cada punto de la curva estándar se realizó por cuadruplicado.

3) Contenido de compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.2)** del capítulo **VII.**

MATERIALES Y MÉTODOS.

4) Contenido de flavonoides totales

El contenido de flavonoides totales (**FT**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.3)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

5) Contenido de antocianinas totales

El contenido de flavonoides totales (**FT**) de las **BEEO** se determinó utilizando la metodología descrita en el apartado **B.1.e.4)** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

g. Evaluación sensorial de las **BEEO**

Se realizó la evaluación sensorial de las **BEEO** con un panel de jueces no entrenados. Las muestras de **BEEO**, de 5.0 ± 0.1 cm de longitud, se sirvieron aleatoriamente en recipientes etiquetados con códigos de identificación únicos. El panel estuvo compuesto por 50 jueces de ambos géneros, sin entrenamiento previo, seleccionados entre estudiantes, profesores y personal (de 18 a 44 años) de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Los jueces fueron seleccionados considerando su interés, agudeza en la detección de sabores y olores, y su comprensión de los procedimientos del ensayo. La evaluación se llevó a cabo en condiciones controladas de temperatura (25 °C) y humedad relativa (60 - 80 %). Para evaluar sensorialmente las **BEEO**, se utilizó una escala hedónica de 9 puntos para los atributos de textura y aceptabilidad global (Jaimez y col 2016), y los resultados obtenidos de aceptabilidad sensorial se analizaron como puntaje entre 1 - 9.

h. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos durante las evaluaciones físicas, texturales, morfométricas, fisicoquímicas, químicas, nutricionales, antioxidantes y fitoquímicas se analizaron por un análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) unifactorial, además se validaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Barlett, respectivamente, y la comparación de medias se realizó mediante una prueba Tukey ($p \leq 0.5$) para las **BEEO**, y una prueba Dunnet ($p \leq 0.5$) para comparar cada una de las **BEEO** contra una botana **Control** elaborada a partir de fracciones ricas en almidón. Por otra parte, los resultados obtenidos para el análisis sensorial se analizaron mediante las pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn para comparación de medianas entre las **BEEO**, y la prueba Mann-Whitney para comparación de medianas entre cada una de las **BEEO** y la botana **Control**.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *ZEA MAYS* Y *AMARANTHUS HYPOCHONDRIACUS*

1. Características físicas de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

En el **Cuadro 12** se muestran las características físicas de las semillas de maíz azul y amaranto. El tamaño o dimensiones físicas de la semilla son indicadores de calidad, manejo y almacenamiento de estos, además el peso de 1000 granos y el peso hectolítrico son medidas indirectas del tamaño y la densidad de la semilla. Altos pesos de 1000 granos corresponden a maíces duros y compactos y, a su vez, la dureza de los granos se relaciona con su composición y propiedades tecnofuncionales.

El grano de maíz azul (**Figura 8a**) presentó dimensiones físicas de 12.35 ± 0.80 mm de largo, 9.31 ± 0.72 mm de ancho y 4.17 ± 0.40 mm de grosor, peso de 1000 granos de 340.91 ± 6.16 g y peso hectolítrico de 78.17 ± 0.37 kg / hL. Los resultados obtenidos para las dimensiones físicas son similares a lo reportado por Navarro y col (2016), mientras los valores de peso de 1000 granos y peso hectolítrico coinciden con lo reportado por Agama y col (2011). Por otro lado, el grano de amaranto (**Figura 8b**) presentó dimensiones físicas de 1.37 ± 0.09 mm de largo y 1.20 ± 0.08 mm de ancho, peso de 1000 granos de 0.82 ± 0.03 g y peso hectolítrico de 83.14 ± 0.81 kg / hL. Abalone y col (2004) reportaron valores similares para las dimensiones físicas de granos de amaranto, mientras que los resultados obtenidos para peso de 1000 granos y peso hectolítrico coinciden con lo reportado por Rangel y col (2021).

Cuadro 12. Características físicas de semillas de maíz azul y amaranto.

Característica¹	Maíz azul	Amaranto
Dimensiones físicas (mm)		
Longitud	12.35 ± 0.80	1.37 ± 0.09
Ancho	9.31 ± 0.72	1.20 ± 0.08
Grosor	4.17 ± 0.40	
Peso de 1000 granos (g)	340.91 ± 6.16	0.82 ± 0.03
Peso hectolítrico (kg / hL)	78.17 ± 0.37	83.14 ± 0.81

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar.



Figura 8. Granos de a) maíz azul y b) amaranto empleados en el presente estudio.

2. Propiedades fisicoquímicas, composición química y características nutricionales de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

En el **Cuadro 13** se muestran las propiedades fisicoquímicas [Luminosidad o Valor Hunter “**L**”, Diferencia Total de Color (**ΔE**), Actividad Acuosa (**a_w**)], químicas (**proteínas, lípidos, cenizas, fibra cruda y carbohidratos**) y nutricionales [Digestibilidad Proteínica *in Vitro* (***DPIV***), Triptófano (**Trp**)] de harinas de maíz azul y amaranto sin procesar.

a. Propiedades fisicoquímicas

Los valores de valor luminosidad (**L**) para los granos de maíz azul y amaranto fueron 61.91 ± 1.72 y 81.69 ± 0.42 , mientras que los valores de diferencia total de color (**ΔE**) fueron de 35.16 ± 1.67 y 17.86 ± 0.40 , respectivamente (**Cuadro 13**). Los valores de **ΔE** indican la diferencia general de color que hay entre la muestra y un mosaico color blanco de referencia ($L = 96.46$, $a = 0.09$, $b = 1.87$); por otro lado, **L** indica la brillantez o claridad que presenta una muestra, por lo que valores altos de **L** indican colores brillantes, mientras que valores bajos de **L** indican colores oscuros u opacos. El maíz azul presenta una **L** más baja que el blanco y un **ΔE** alto debido a su color azul oscuro, mientras que el amaranto presenta una **L** alta y un **ΔE** bajo debido a su color amarillo brillante ligeramente cercano al blanco de referencia. Por otro lado, la actividad acuosa (**a_w**) de los granos de maíz azul y amaranto se encontró en 0.50 ± 0.02 y 0.31 ± 0.01 , respectivamente (**Cuadro 13**). Estos valores bajos de **a_w** indican que el crecimiento de microorganismos, las reacciones químicas y la actividad enzimática que se llevan a cabo dentro de los granos se está desarrollando muy lentamente, por lo que pueden almacenarse por largos periodos de tiempo sin llegar a perder su calidad.

Cuadro 13. Composición química y propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz azul y amaranto.

Propiedad ¹	Maíz azul	Amaranto
Fisicoquímicas		
L ²	61.91 ± 1.72	81.69 ± 0.42
ΔE ³	35.16 ± 1.67	17.86 ± 0.40
a _w ⁴	0.50 ± 0.02	0.31 ± 0.01
Composición química (% bs)		
Proteínas	8.45 ± 0.24	13.92 ± 0.18
Lípidos	5.95 ± 0.13	7.27 ± 0.09
Cenizas	1.35 ± 0.01	2.33 ± 0.03
Fibra cruda	1.74 ± 0.09	6.11 ± 0.06
Carbohidratos	82.60 ± 0.29	70.20 ± 0.07
Nutricionales		
DPIV ⁵	75.32 ± 2.13	66.46 ± 5.29
Trp ⁶	0.120 ± 0.017	1.631 ± 0.286

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar. ² L = Luminosidad. ³ ΔE = Diferencia total de color. ⁴ a_w = Actividad acuosa. ⁵ DPIV = Digestibilidad Proteínica *in Vitro* (%). ⁶ Trp = Triptófano (g Trp / 100 g proteína).

b. Composición química

El contenido de proteínas en la harina de maíz azul fue de 8.45 ± 0.24 % en base seca (**Cuadro 13**); este resultado coincide con lo reportado por otros investigadores, quienes han reportado valores en contenido de proteínas en rango de 7.8 - 9.1 % (Montoya y col 2020; Sánchez y col 2024). Por otro lado, el contenido de proteínas en la harina de amaranto fue de 13.92 ± 0.18 % en base seca; este resultado concuerda con lo reportado por Zhang y col (2023), quienes mencionan que el grano de amaranto contiene alrededor de 14 % de proteína cruda.

El contenido de lípidos en la harina de maíz azul crudo fue de 5.95 ± 0.13 % en base seca (**Cuadro 13**). Este valor es ligeramente superior al rango reportado por otros autores (Montoya y col 2020; Sánchez y col 2024), quienes reportan un contenido de lípidos entre 0.5 - 5.5 %, y se encuentra dentro del rango de 4.41 - 6.55 % reportado por Uriarte y col (2015) para 15 genotipos distintos de maíz azul identificados en Sinaloa, México. Por otra parte, el contenido de lípidos en la harina de amaranto crudo fue de 7.27 ± 0.09 . Este valor es ligeramente superior a lo reportado por otros autores (Singh y Punia 2020; Sidorova y col 2023), quienes reportan valores en un rango de 5.5 - 5.91 %.

La harina de maíz azul crudo presentó un contenido de cenizas o minerales de 1.35 ± 0.01 % en base seca (**Cuadro 13**). Anteriormente Sánchez y col (2024) reportaron un rango de valores para cenizas de 0.3 - 2.3 %, dentro del cual se encuentra el valor obtenido. A la vez, la harina de amaranto crudo presentó un contenido de cenizas de 2.33 ± 0.03 % en base seca. Este valor es ligeramente inferior

a lo reportado por Singh y Punia (2020), quienes reportan un contenido de 2.84 ± 0.02 %, y es similar al valor de 2.25 % reportado por Abolaji y col (2017).

El contenido de fibra cruda en la harina de maíz azul cruda se encontró en 1.74 ± 0.09 % en base seca (**Cuadro 13**). Este valor es ligeramente menor a lo reportado por diversos investigadores (Navarro y col 2016; Neder y col 2021), quienes han encontrado un rango de valores en contenido de fibra cruda de 1.84 - 2.84 %. En contraste, el contenido de fibra cruda en la harina de amaranto crudo se encontró en 6.11 ± 0.06 % en base seca. Este resultado obtenido es similar a lo reportado por Pedersen y col (1990), quienes encontraron un contenido de fibra cruda de 3 - 8 %, y es ligeramente mayor al valor de 5.47 % reportado por Oteri y col (2021).

El contenido de carbohidratos en la harina de maíz azul crudo fue de 82.60 ± 0.29 % en base seca (**Cuadro 13**). Este resultado obtenido es similar a lo reportado por otros autores (Montoya y col 2020; Sánchez y col 2024), quienes reportaron un rango de valores para carbohidratos de 67.3 - 84.9 %. Por otra parte, el contenido de carbohidratos en la harina de amaranto crudo fue de 70.20 ± 0.07 % en base seca. Este valor se encuentra dentro del rango 65 - 75 % reportado por Venskutonis y Kraujalis (2013) y es similar a lo reportado por Singh y Punia (2020), quienes obtuvieron hasta 72.15 % en contenido de carbohidratos en granos de amaranto.

c. Características nutricionales

La **DPIV** de los granos sin procesar mostró valores de 75.32 y 66.46 % para maíz azul y amaranto, respectivamente (**Cuadro 13**). Anteriormente Milán y col (2016) reportaron que el maíz azul crudo presenta una **DPIV** de 82 %, siendo este ligeramente superior al valor obtenido en el presente estudio. Por otro lado, Písaříková y col (2005)

reportaron una **DPIV** de 68.1 % para el amaranto crudo, siendo este similar al valor obtenido en el presente estudio.

En cuanto al contenido de **Trp**, se obtuvieron valores de 0.120 y 1.631 g **Trp** / 100 g de proteína para el maíz azul y amaranto, respectivamente (**Cuadro 13**). Broa y col (2020) reportaron un contenido de **Trp** de hasta 0.090 g **Trp** / 100 g de proteína, siendo este valor menor a lo obtenido en el presente estudio. Por otro lado, el valor obtenido para contenido de **Trp** en amaranto se encuentra entre el rango de 2.7 ± 1.7 g **Trp** / 100 g de proteína reportado por Juan y col (2007).

3. Actividad antioxidante y caracterización fitoquímica de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*.

a. Actividad antioxidante

Los granos de maíz azul y amaranto crudos exhibieron una **AAox** total de 3962.2 y 1162.0 $\mu\text{mol ET}$ / 100 g de muestra (bs), de los cuales aproximadamente el 55 - 81 % corresponde a la fracción ligada de los extractos fenólicos (**Cuadro 14**). García y col (2023) reportaron un valor de **AAox** de 1500 $\mu\text{mol ET}$ / 100 g de muestra (bs), mientras que Félix y col (2020) reportaron un valor de 6977 $\mu\text{mol ET}$ / 100 g de muestra (bs) para maíz azul sin procesar, por lo que el valor obtenido se encuentra dentro de un rango de valores reportado por diferentes investigadores. Por otra parte, la **AAox** obtenida para el grano de amaranto coincide con lo reportado por Paško y col (2009), quienes reportaron valores entre 1142 - 1271 $\mu\text{mol ET}$ / 100 g de muestra (bs) para granos de amaranto sin procesar.

Cuadro 14. Actividad antioxidante y caracterización fitoquímica de las semillas de *Zea mays* y *Amaranthus hypochondriacus*

Característica¹	Maíz azul	Amaranto
AAox²		
Libres	724.7 ± 72.0	532.3 ± 47.2
Ligados	3237.5 ± 165.2	629.7 ± 29.8
Total	3962.2 ± 162.6	1162.0 ± 58.4
CFT³		
Libres	38.8 ± 2.3	14.8 ± 1.0
Ligados	196.4 ± 19.4	44.3 ± 4.3
Total	235.1 ± 17.4	59.2 ± 4.4
FT⁴		
Libres	18.7 ± 1.0	48.5 ± 6.1
Ligados	124.4 ± 4.9	80.8 ± 7.5
Total	143.1 ± 5.4	129.3 ± 11.9
CAT⁵		
Total	17.8 ± 0.1	0.3 ± 0.0

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar. ² **AAox** = Actividad Antioxidante [µmol equivalentes de trolox (ET) / 100 g, bs]. ³ **CFT** = Compuestos Fenólicos Totales [mg equivalentes de ácido gálico (EAG) / 100 g, bs]. ⁴

FT = Flavonoides Totales [mg equivalentes de quercetina (EQ) / 100 g, bs]. ⁵ **CAT** = Contenido de Antocianinas Totales [mg equivalentes de cianidina-3-glucósido (C3G) / 100 g, bs].

b. Compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) en los granos de maíz azul y amaranto sin procesar fue de 235.1 y 59.2 mg EAG / 100 g muestra (bs) (**Cuadro 14**). El resultado obtenido para el grano de maíz azul es similar a lo reportado por García y col (2022), quienes obtuvieron un valor de **CFT** de 239 mg EAG / 100 g muestra (bs). Por otra parte, el resultado obtenido para el grano de amaranto es superior a lo señalado por otros autores (Perales y col 2014; Oteri y col 2021), quienes reportan un contenido de **CFT** entre 24 - 40 mg EAG / 100 g muestra (bs).

c. Flavonoides totales

El contenido de flavonoides totales (**FT**) en los granos de maíz azul y amaranto sin procesar fue de 143.1 y 129.3 mg EQ / 100 g muestra (bs) (**Cuadro 14**). El resultado obtenido para el grano de maíz azul coincide con lo reportado por García y col (2022), quienes reportaron valores de 6.6 - 2641.5 mg EQ / 100 g muestra (bs). Por otro lado, el resultado obtenido para el grano de amaranto es superior a lo reportado por Perales y col (2014), quienes obtuvieron un valor de 26.01 mg EQ / 100 g muestra (bs).

d. Antocianinas totales

El contenido de antocianinas totales (**CAT**) en los granos de maíz azul y amaranto sin procesar fue de 17.8 y 0.3 mg EC3G / 100 g muestra (bs) (**Cuadro 14**). El resultado obtenido para el grano de maíz azul coincide con lo señalado por García y col (2022), quienes reportan 3.29 - 31.56 mg EC3G / 100 g muestra (bs). Por otro lado, el resultado obtenido para el grano de amaranto es inferior a lo reportado por Lucero y col (2011), quienes obtuvieron un valor de 35.33 mg EC3G / 100 g muestra (bs).

B. ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (MSR) PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BOTANA EXTRUDIDA EXPANDIDA OPTIMIZADA A PARTIR DE MEZCLAS DE *ZEA MAYS* Y *AMARANTHUS HYPOCHONDRIACUS*

1. Modelos de predicción de las variables de respuesta

A partir de los resultados experimentales de **IER**, **DA**, **Du**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV** de las botanas expandidas extrudidas (**BEE**) evaluadas (**Cuadro 15**), se generaron modelos predictivos mediante la aplicación de un polinomio que relaciona dichas variables de respuesta con los parámetros del proceso de extrusión (**HA**, **TE**, **VT**). Posteriormente, se realizaron pruebas de idoneidad y ajuste mediante análisis de regresión y de varianza sobre los modelos de predicción obtenidos (**Cuadro 16**). Para considerar que estos modelos de predicción son adecuados y reproducibles, se establecieron los siguientes criterios propuestos por Myers y Montgomery (2002): un coeficiente de determinación (R^2_{ajustado}) mayor o igual a 0.80, un nivel de significancia estadística de $p \leq 0.05$, un coeficiente de variación (CV) menor o igual al 10%, y una prueba de falta de ajuste con un valor mayor o igual a 0.05.

a. Índice de expansión radial

Las **BEE** elaboradas con maíz azul y amaranto presentaron valores mínimos y máximos para **IER** de 1.857 y 2.327, respectivamente, según se resalta en el **Cuadro 15**. El análisis de varianza indica el ajuste significativo de un modelo cuadrático para la variable **IER** ($p < 0.0001$). Además, se observó que el **IER** de las **BEE** es influenciado por los términos lineales de temperatura de extrusión (**TE**) y velocidad de tornillo (**VT**), así como por el término cuadrático de velocidad de tornillo (**VT**²) y las interacciones (**TE**)(**VT**) y (**TE**)(**HA**), como se muestra en el **Cuadro 16**. El modelo de predicción con

Cuadro 15. Resultados experimentales obtenidos para las variables de respuesta evaluadas en botanas extrudidas expandidas (**BEE**) en función de las diferentes combinaciones de variables de proceso.

Trat. ¹	Variables de proceso ²				Variables de respuesta ³					
	TE	VT	HA	IER	DA	Du	AAox	CFT	FT	DPIV
1	130.135	88.5127	14.1889	2.227	0.339	30.38	3396.8	200.0	227.3	27.3
2	159.865	88.5127	14.1889	1.857	0.197	8.24	3400.1	350.5	166.2	55.0
3	130.135	201.487	14.1889	2.327	0.364	32.78	2264.7	318.1	238.9	25.9
4	159.865	201.487	14.1889	2.077	0.178	10.33	4048.7	383.5	305.6	66.4
5	130.135	88.5127	55.8111	2.173	0.455	33.29	2392.0	200.6	93.3	38.7
6	159.865	88.5127	55.8111	1.920	0.324	22.63	1525.3	241.5	249.8	35.5
7	130.135	201.487	55.8111	2.273	0.422	34.03	1806.6	277.6	21.4	35.3
8	159.865	201.487	55.8111	2.080	0.352	24.26	1756.3	103.3	270.7	47.7
9	120	145	35	2.303	0.470	38.14	2727.1	267.0	202.3	27.0
10	170	145	35	1.930	0.238	8.16	2868.3	301.8	404.8	63.8

11	145	50	35	1.931	0.398	24.32	3091.2	320.8	193.7	40.6
12	145	240	35	2.213	0.295	22.52	2868.8	240.2	138.1	54.8
13	145	145	0	2.126	0.204	12.52	3575.0	285.0	76.9	30.6
14	145	145	70	2.100	0.473	36.88	1147.3	105.6	152.8	36.9
15	145	145	35	2.080	0.378	27.87	2339.6	266.8	172.0	42.3
16	145	145	35	2.173	0.385	26.76	2373.6	277.7	195.3	39.9
17	145	145	35	2.153	0.295	20.47	2803.2	275.5	164.6	52.9
18	145	145	35	2.111	0.339	21.51	2834.8	304.6	179.2	49.5
19	145	145	35	2.150	0.291	26.52	2864.9	289.6	137.5	45.7
20	145	145	35	2.160	0.360	25.47	2686.1	288.1	141.0	38.8

¹ No corresponde al orden de procesamiento. ² **TE** = Temperatura de Extrusión (°C), **VT** = Velocidad de Tornillo (rpm), **HA** = Harina de Amaranto (%). ³ **IER** = Índice de Expansión Radial, **DA** = Densidad Aparente (g / cm³), **Du** = Dureza (N), **AAox** = Actividad Antioxidante (μmol ET / 100 g, bs), **CFT** = Compuestos Fenólicos Totales (mg EAG / 100 g, bs), **FT** = Flavonoides Totales (mg EQ / 100 g, bs), **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in vitro* (%).

Cuadro 16. Coeficientes de regresión y análisis de varianza para los modelos de predicción de las variables de respuesta estudiadas en función de las variables de proceso.

Parámetros	Coeficientes de regresión lineal						
	Variables de respuesta ¹						
	IER	DA	Du	AAox	CFT	FT	DPIV
Intercepto							
β_0	2.13	0.3378	24.35	2672.93	285.26	165.23	45.56
Lineales							
β_1	-0.1240***	-0.0675***	-8.45***	81.12 ^{NS}	10.32***	55.05***	10.20***
β_2	0.0772***	NS	0.2812 ^{NS}	-88.74 ^{NS}	-23.98***	-16.54*	3.12**
β_3	NS	0.0678***	7.24***	-711.21***	-53.50***	22.55**	NS
Cuadráticos							
β_{11}	NS	NS	NS	NS	NS	48.98***	NS
β_{22}	-0.0186**	NS	NS	84.20 ^{NS}	NS	NS	NS
β_{33}	NS	NS	NS	-134.58**	-29.83***	-17.73***	-4.16***
Interacciones							

β_{12}	0.0225**	NS	NS	324.61***	-37.53***	27.59***	3.54**
β_{13}	0.0216**	0.0157 ^{NS}	3.02***	-338.02***	-43.65***	50.03***	-7.36***
β_{23}	NS	NS	NS	NS	-26.53***	-25.27***	NS
β_{123}	NS	NS	NS	-120.53*	-16.26***	NS	NS
β_{112}	NS	NS	NS	NS	35.22***	29.04**	NS
β_{113}	NS	NS	-3.18**	NS	NS	-60.41***	NS
β_{122}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Valor p modelo	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
R²	0.9642	0.8762	0.9600	0.9618	0.9879	0.9784	0.9061
R²_{ajust.}	0.9514	0.8530	0.9457	0.9339	0.9770	0.9544	0.8726
R²_{pred}	0.9353	0.8367	0.9445	0.9139	0.9364	0.9352	0.8350
Valor p falta de ajuste	0.8577	0.8261	0.9859	0.9208	0.9028	0.9252	0.9384
CV (%)	1.34	9.91	8.61	6.98	4.01	9.64	9.75

¹ **IER** = Índice de Expansión Radial, **DA** = Densidad Aparente, **Du** = Dureza, **AAox** = Actividad Antioxidante, **CFT** = Compuestos Fenólicos Totales, **FT** = Flavonoides Totales, **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in vitro*. NS = No significativo (p > 0.10), * Significativo a p ≤ 0.10, ** Significativo a p ≤ 0.05, *** Significativo a p ≤ 0.01.

variables codificadas obtenido para **IER** fue:

$$\mathbf{IER} = 2.13 - 0.1240 \mathbf{TE} + 0.0772 \mathbf{VT} - 0.0186 \mathbf{VT}^2 + 0.0225 (\mathbf{TE})(\mathbf{VT}) + 0.0216(\mathbf{TE})(\mathbf{HA})$$

Este modelo de predicción logró explicar el 96.42 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **IER** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.9515, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.8577$), y la dispersión relativa de los puntos experimentales en comparación con los valores predichos por el modelo (CV) fue del 1.34 %. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para el **IER** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 9**) que muestran cómo el **IER** de las **BEE** es afectado por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor predicho más bajo de **IER** se localiza a valores de **TE** altos, y **VT** y **HA** bajos, mientras que el valor máximo posible (resultado deseable) se obtiene cuando los valores de **TE** y **HA** son bajos, y **VT** altos. Diversos autores han reportado que el **IER** de botanas extrudidas se ve maximizado a altas **TE** y **VT** debido a una mayor gelatinización del almidón, sin embargo, en el presente estudio se observó un comportamiento diferente (**TE** baja y **VT** alta); por otro lado, valores altos de **HA** afectan la expansión debido a que la adición de fibras (polisacáridos) y algunos tipos de proteínas (globulinas) compiten con el almidón por el agua y afectan su gelatinización durante el proceso de extrusión (Félix y col, 2020).

b. Densidad Aparente

Las **BEE** elaboradas con una mezcla de maíz azul y amaranto mostraron valores

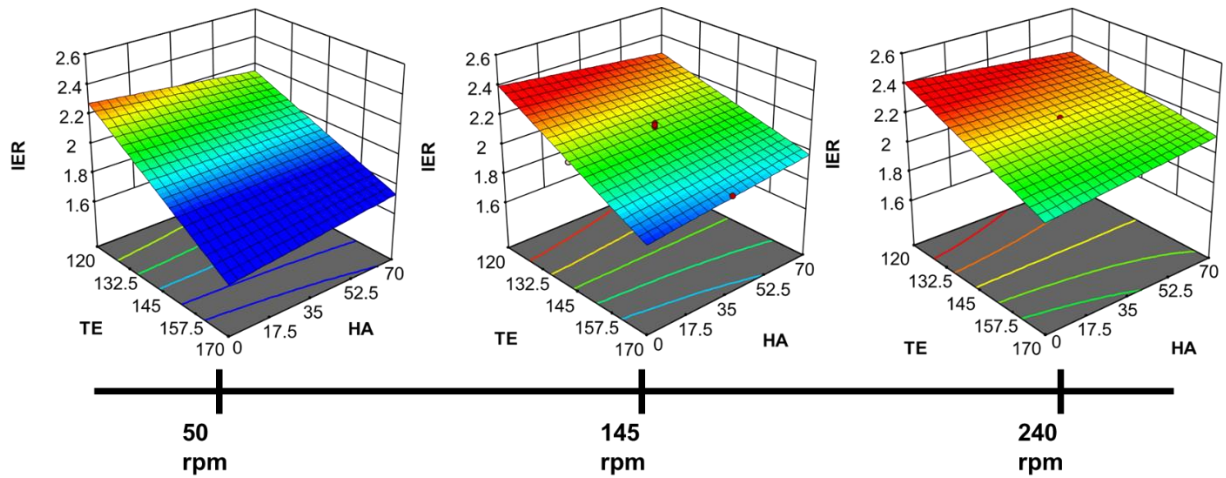


Figura 9. Gráficos de superficie de respuesta para Índice de Expansión Radial (IER) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)].

de **DA** en un rango 0.178 - 0.473 g / cm³ (**Cuadro 15**). El análisis de varianza reveló un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para la variable **DA**. Además, se encontró que la **DA** de estas **BEE** es influenciada por los términos lineales de temperatura de extrusión (**TE**) y harina de amaranto (**VT**), así como por la interacción (**TE**)(**HA**) (**Cuadro 16**). El modelo de predicción utilizando variables codificadas obtenido para **DA** fue:

$$\mathbf{DA} = 0.3378 - 0.0675 \mathbf{TE} + 0.0678 \mathbf{HA} + 0.0157 (\mathbf{TE})(\mathbf{HA})$$

Este modelo de predicción logró explicar el 87.62 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **DA** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.8530, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.8261$), y el coeficiente de variación fue de $CV = 1.34 \%$. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para la **DA** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 10**) que muestran cómo la **DA** de las **BEE** es afectada por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor mínimo predicho de **DA** (resultado deseable) se localiza a valores de **TE** altos y **HA** bajos, mientras que el valor más alto de **DA** se obtiene a valores de **TE** bajos y **HA** altos. Por otro lado, la **VT** no tuvo ningún efecto significativo sobre la **DA** de las **BEE**. Diversos autores han reportado que durante la extrusión la **DA** se ve minimizada a altas **TE** debido a una mayor gelatinización del almidón que se traduce en un aumento de volumen en el producto (expansión) y, por lo tanto, una disminución de la **DA**; además, el incremento de **TE** permite disminuir la viscosidad del material fundido causando una baja densidad en el producto (Félix y col, 2020; Gómez y col, 2021). Nikinmaa y col (2023) reportaron que durante la

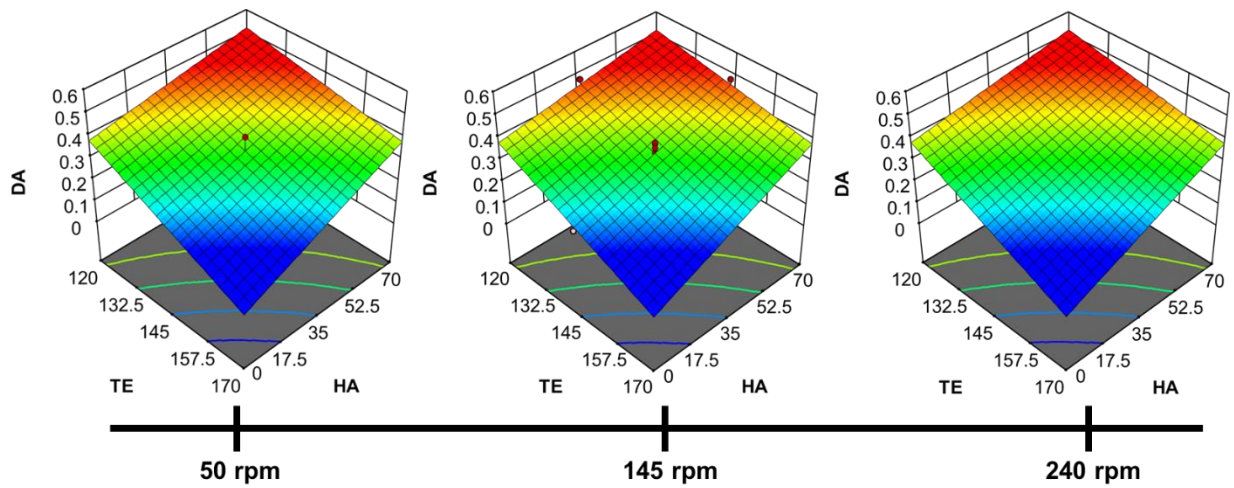


Figura 10. Gráficos de superficie de respuesta para Densidad Aparente (**DA**) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**) y Harina de Amaranto (**HA**)].

extrusión pueden ocurrir tanto expansión radial como longitudinal, por lo que en este caso la botana se puede estar expandiendo longitudinalmente al incrementar la **TE**. Por otro lado, aumentos en **HA** resultan en una reducción de la **DA** debido a las alteraciones que se presentan en la expansión.

c. Dureza

Las **BEE** elaboradas con una combinación de maíz azul y amaranto presentaron valores de **Du** en un rango de 8.16 a 38.14 N (**Cuadro 15**). El análisis de varianza muestra que el ajuste de un modelo cuadrático es significativo ($p < 0.0001$) para la **Du**. Asimismo, se observa que la **Du** de estas botanas se ve afectada por los términos lineales de **TE** y **HA**, además de las interacciones $(\mathbf{TE})(\mathbf{HA})$ y $(\mathbf{TE}^2)(\mathbf{HA})$ (**Cuadro 16**). Por otro lado, el término lineal de **VT** no es significativo, sin embargo, este se incluye en el modelo de predicción para obtener un mejor ajuste de los parámetros de regresión. El modelo de predicción empleando variables codificadas para la **Du** se define como:

$$\mathbf{Du} = 24.35 - 8.45 \mathbf{TE} + 0.2812 \mathbf{VT} + 7.24 \mathbf{HA} + 3.02 (\mathbf{TE})(\mathbf{HA}) - 3.18 (\mathbf{TE}^2)(\mathbf{HA})$$

Este modelo de predicción logró explicar el 96.00 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **Du** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.9457, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.9859$), y el coeficiente de variación fue de $CV = 8.61$ %. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para la **Du** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 11**) que muestran cómo la **Du** de las **BEE** es afectada por los valores de **TE**,

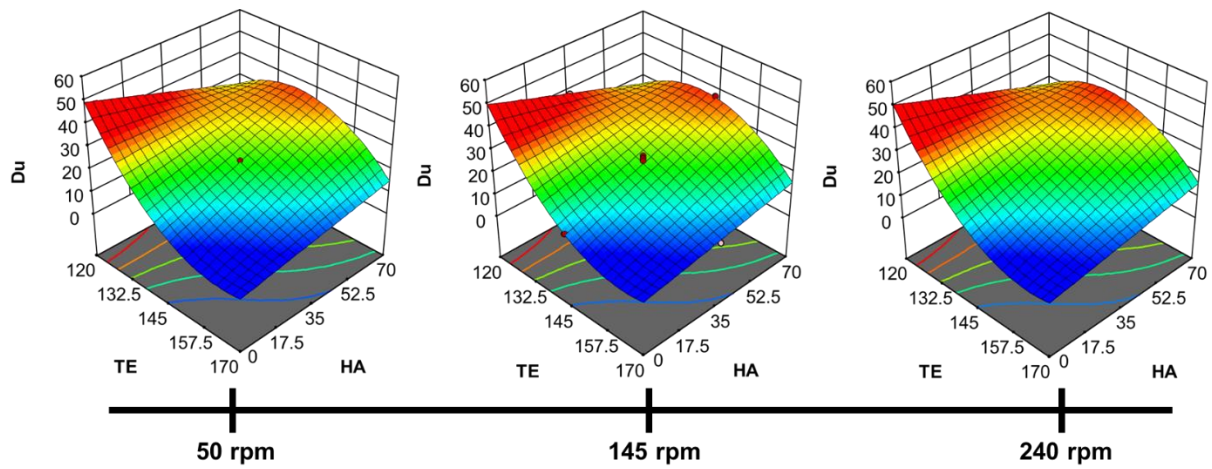


Figura 11. Gráficos de superficie de respuesta para Dureza (**Du**) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**) y Harina de Amaranto (**HA**)].

VT y **HA**. Se observó que el valor mínimo predicho de **Du** (resultado deseable) se localiza a valores de **TE** altos y **HA** bajos, mientras que el valor más alto de **Du** se obtiene a valores de **TE** bajos y **HA** altos. Por otro lado, la **VT** no tuvo ningún efecto significativo sobre la **Du** de las **BEE**. Este tipo de comportamiento coincide con lo reportado por otros autores, quienes describen que la **Du** se encuentra correlacionada con la **Da** debido a que productos de baja densidad presentan también mayor porosidad y, por lo tanto, baja **Du** (Félix y col, 2020; Gómez y col, 2021).

d. Actividad antioxidante

Los valores de **AAox** de las **BEE** elaboradas con mezclas de maíz azul y amaranto se situaron en un rango de 1147.4 - 4048.7 $\mu\text{mol ET} / 100 \text{ g (bs)}$ (**Cuadro 15**). Por otro lado, el análisis de varianza revela un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para la **AAox**. Asimismo, se observa que la **AAox** de estas botanas depende del término lineal de **HA**, además de los términos cuadráticos **VT**² y **HA**² y de las interacciones (**TE**)(**VT**), (**TE**)(**HA**) y (**TE**)(**VT**)(**HA**) (**Cuadro 16**). Por otro lado, los términos lineales de **TE** y **VT** no son significativos, sin embargo, estos términos se incluyen en el modelo de predicción para obtener un mejor ajuste de los parámetros de regresión. El modelo de predicción aplicando las variables codificadas para la **AAox** se define como:

$$\text{AAox} = 2672.93 + 81.12 \text{ TE} - 88.74 \text{ VT} - 711.21 \text{ HA} + 324.61 (\text{TE})(\text{VT}) - 338.02 (\text{TE})(\text{HA}) + 84.20 \text{ VT}^2 - 134.58 \text{ HA}^2 - 120.53 (\text{TE})(\text{VT})(\text{HA})$$

Este modelo de predicción logró explicar el 96.18 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **AAox** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.9339, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.9208$), y el coeficiente de variación fue de $\text{CV} = 6.98 \%$. Estos datos señalan que

el modelo de predicción obtenido para la **AAox** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 12**) que muestran cómo la **AAox** de las **BEE** es afectada por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor más bajo de **AAox** se localiza a valores altos de **TE** y **HA**, y valores bajos de **VT**, mientras que el valor más alto de **AAox** (resultado deseable) se obtiene a valores de altos de **TE** y **VT**, y valores bajos de **HA**. Este tipo de comportamiento es debido a que la **VT** permite una mayor liberación de compuestos con actividad antioxidante ligados a la pared celular. En cuanto a la **TE**, se ha observado que esta activa mecanismos de destrucción o generación de compuestos antioxidantes, por ejemplo: (1) destruye compuestos termolábiles, (2) activa mecanismos de generación (reacciones de Maillard), y (3) evita la oxidación de algunos compuestos por inactivación enzimática (Espinoza y col, 2016; Li y col, 2022). Por otro lado, el decremento de **AAox** al aumentar el nivel de inclusión del amaranto (**HA**) en las **BEE** se debe a que el amaranto presenta menor **AAox** en comparación al maíz azul.

e. Compuestos Fenólicos totales

Los valores de **CFT** de las **BEE** elaboradas con mezclas de maíz azul y amaranto se situaron en un rango de 103.3 - 383.5 mg EAG / 100 g (bs) (**Cuadro 15**). Por otro lado, el análisis de varianza revela un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para **CFT**. Asimismo, se observa que los **CFT** de estas botanas son afectados por los términos lineales de **TE**, **VT** y **HA**, además del término cuadrático HA^2 y de las interacciones $(TE)(VT)$, $(TE)(HA)$, $(VT)(HA)$, $(TE)(VT)(HA)$ y $(TE^2)(VT)$ (**Cuadro 16**).

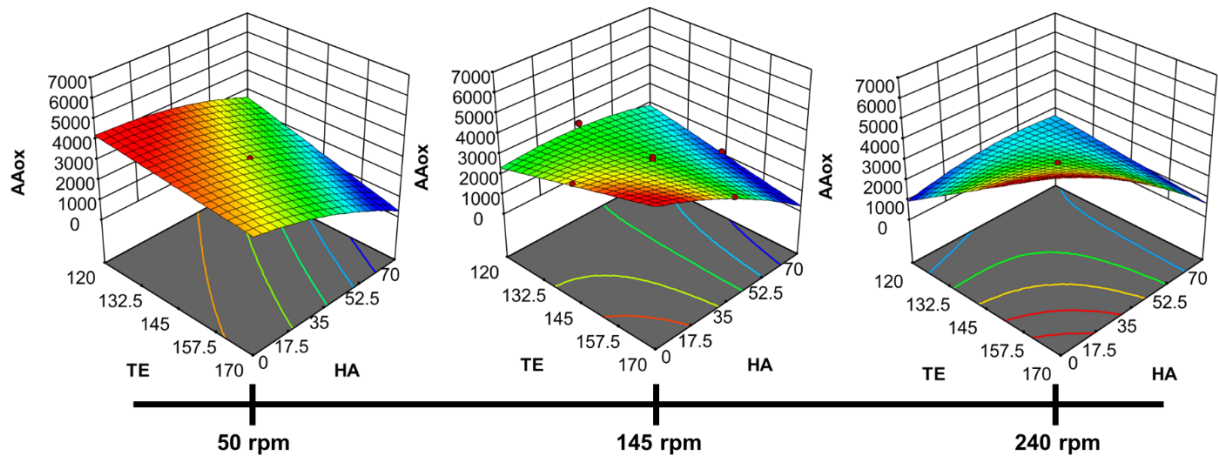


Figura 12. Gráficos de superficie de respuesta para Actividad Antioxidante (**AAox**) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**) y Harina de Amaranto (**HA**)].

El modelo de predicción aplicando las variables codificadas para los **CFT** se define como:

$$\begin{aligned} \mathbf{CFT} = & 285.26 + 10.32 \mathbf{TE} - 23.98 \mathbf{VT} - 53.50 \mathbf{HA} - 37.53 (\mathbf{TE})(\mathbf{VT}) - \\ & 43.65 (\mathbf{TE})(\mathbf{HA}) - 26.53 (\mathbf{VT})(\mathbf{HA}) - 29.83 \mathbf{HA}^2 - 16.26 (\mathbf{TE})(\mathbf{VT})(\mathbf{HA}) + \\ & 35.22 (\mathbf{TE}^2) (\mathbf{VT}) \end{aligned}$$

Este modelo de predicción logró explicar el 98.79 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **CFT** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.9770, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.9028$), y el coeficiente de variación fue de $CV = 4.01$ %. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para los **CFT** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 13**) que muestran cómo los **CFT** de las **BEE** son afectados por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor más bajo de **CFT** se localiza a valores bajos de **TE**, **VT** y **HA**, mientras que el valor más alto de **CFT** (resultado deseable) se obtiene a valores de altos de **TE** y **VT**, y valores bajos de **HA**. De acuerdo con lo reportado por diversos autores, la variación de **CFT** durante la extrusión depende significativamente de **TE** y **VT** debido a: (1) liberación de compuestos fenólicos que se encuentran ligados a la pared celular, (2) destrucción de compuestos termolábiles, y (3) formación de productos de la reacción de Maillard que se leen a la misma longitud de onda que los **CFT** (Espinoza y col, 2016; Félix y col, 2020; Li y col, 2022). Por otro lado, el decremento de **CFT** al aumentar **HA** en las **BEE** se debe a que el amaranto presenta menor contenido de **CFT** en comparación al maíz azul.

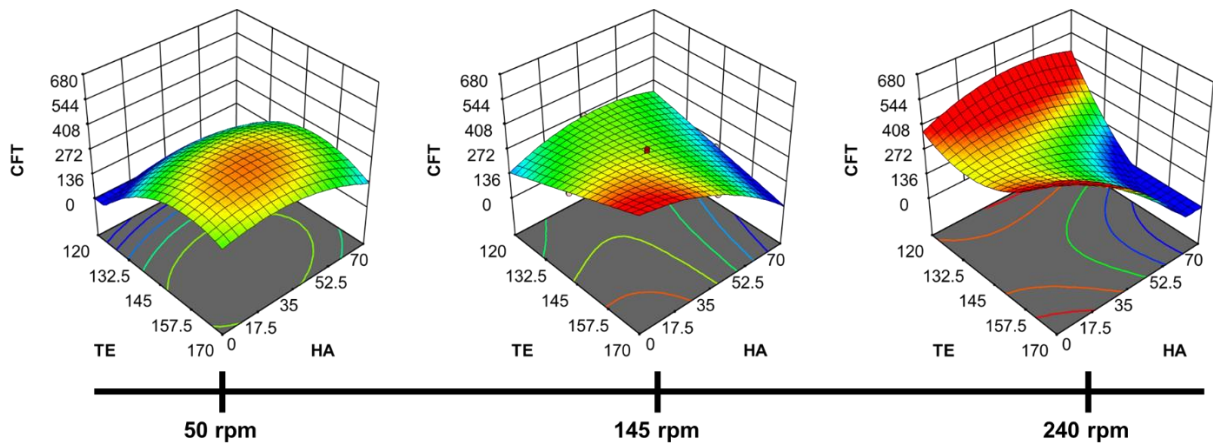


Figura 13. Gráficos de superficie de respuesta para Compuestos Fenólicos Totales (CFT) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (TE), Velocidad de Tornillo (VT) y Harina de Amaranto (HA)].

f. Flavonoides totales

Los valores de **FT** de las **BEE** elaboradas con mezclas de maíz azul y amaranto se situaron entre 21.4 - 404.8 mg EQ / 100 g (bs) (**Cuadro 15**). Por otro lado, el análisis de varianza revela un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para **FT**. Asimismo, se observa que los **FT** de estas botanas son afectados por los términos lineales de **TE**, **VT** y **HA**, además de los términos cuadráticos TE^2 y HA^2 y de las interacciones $(TE)(VT)$, $(TE)(HA)$, $(VT)(HA)$, $(TE^2)(VT)$ y $(TE^2)(HA)$ (**Cuadro 16**). El modelo de predicción empleando las variables codificadas para los **FT** se define como:

$$\begin{aligned} FT = & 165.23 + 55.05 TE - 16.54 VT + 22.55 HA + 27.59 (TE)(VT) + \\ & 50.03 (TE)(HA) - 25.27 (VT)(HA) + 48.98 TE^2 - 17.73 HA^2 + 29.04 (TE^2)(VT) - \\ & 60.41 (TE^2)(HA) \end{aligned}$$

Este modelo de predicción logró explicar el 97.84 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **FT** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.9544, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.9252$), y el coeficiente de variación fue de $CV = 9.64$ %. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para los **FT** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 14**) que muestran cómo los **FT** de las **BEE** son afectados por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor más bajo de **FT** se localiza a valores bajos de **TE** y **VT**, y valores altos de **HA**, mientras que el valor más alto de **FT** (resultado deseable) se obtiene a valores de altos de **TE** y **VT**, y valores bajos de **HA**. Este comportamiento en relación con **TE** y **VT** es causado por los mismos mecanismos de destrucción y generación que se mencionan para **CFT**, mientras que el aumento de

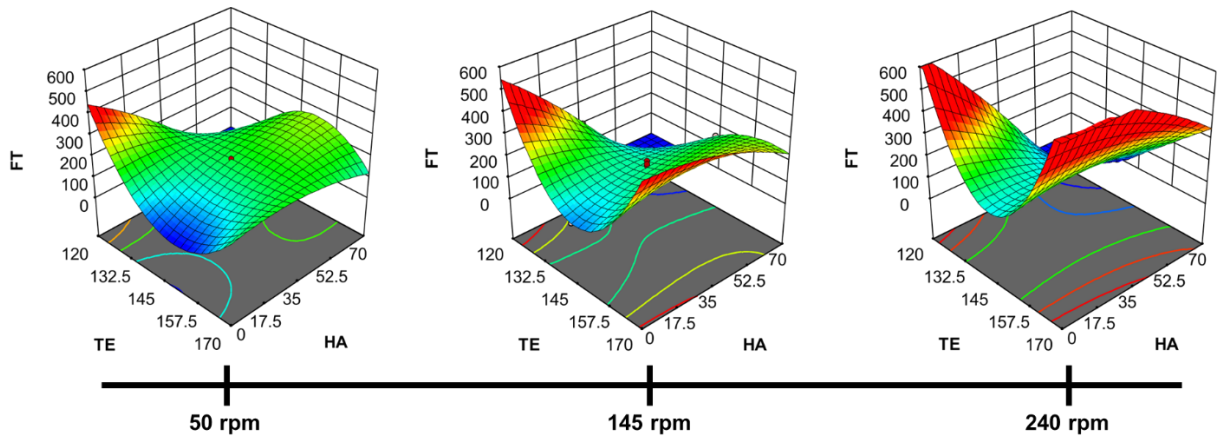


Figura 14. Gráficos de superficie de respuesta para Flavonoides Totales (**FT**) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**) y Harina de Amaranto (**HA**)].

HA muestra mantener valores máximos de **FT** hasta un nivel de inclusión de alrededor de 30 % **HA**.

g. Digestibilidad proteínica in vitro

Los valores mínimo y máximo obtenidos para **DPIV** de las **BEE** elaboradas con mezclas de maíz azul y amaranto fueron de 25.9 y 66.4 %, respectivamente (**Cuadro 15**). Por otro lado, el análisis de varianza revela un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para **DPIV**. Asimismo, se observa que la **DPIV** de estas botanas es afectada por los términos lineales de **TE** y **VT**, además del término cuadrático **HA**² y de las interacciones (**TE**)(**VT**) y (**TE**)(**HA**) (**Cuadro 16**). El modelo de predicción empleando las variables codificadas para los **DPIV** se define como:

$$DPIV = 45.56 + 10.2 TE + 3.12 VT + 3.54 (TE)(VT) - 7.36 (TE)(HA) - 4.16 HA^2$$

Este modelo de predicción logró explicar el 90.61 % de la variabilidad total en los valores obtenidos en **DPIV** de las **BEE**. Además, el coeficiente de determinación ajustado del modelo llegó a 0.8726, no se observó significancia en la falta de ajuste ($p = 0.9384$), y el coeficiente de variación fue de $CV = 9.75$ %. Estos datos señalan que el modelo de predicción obtenido para la **DPIV** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción, se generaron gráficos de superficie de respuesta (**Figura 15**) que muestran cómo la **DPIV** de las **BEE** es afectada por los valores de **TE**, **VT** y **HA**. Se observó que el valor más bajo de **DPIV** se localiza a valores bajos de **TE**, **VT** y **HA**, mientras que el valor máximo de **DPIV** (resultado deseable) se obtiene a valores de altos de **TE** y **VT**, y valores bajos de **HA**. Este tipo de comportamiento se

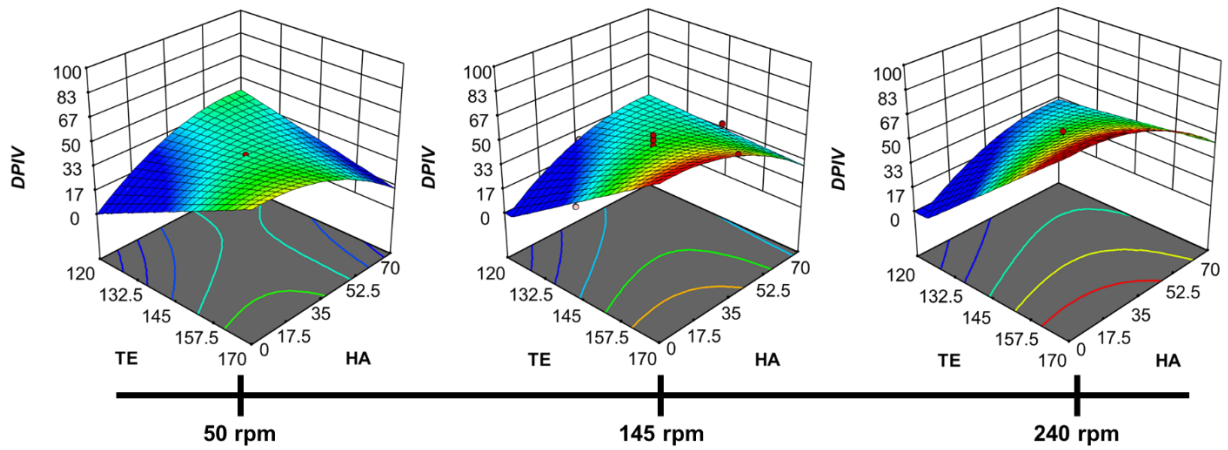


Figura 15. Gráficos de superficie de respuesta para Digestibilidad Proteínica in vitro (**DPIV**) en función de las variables de proceso [Temperatura de Extrusión (**TE**), Velocidad de Tornillo (**VT**) y Harina de Amaranto (**HA**)].

debe a que las condiciones de calor y presión causadas por el aumento de las variables **TE** y **VT** promueven: (1) la desnaturalización de proteínas haciendo que estas estén más expuestas a ataques enzimáticos, y (2) la reducción de factores antinutricionales, mejorando así la **DPIV** (Huanatico y col, 2021). Por otro lado, el incremento de **HA** causa un decremento de la **DPIV** debido a que el amaranto presenta una **DPIV** muy baja en comparación al maíz azul.

2. Condiciones óptimas de extrusión

a. Optimización

La logró optimizar el proceso de extrusión a través de la búsqueda de los valores máximos de **IER**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV**, y mínimos de **DA** y **Du**, aplicando dos criterios específicos para las variables de proceso: (1) “valores en rango” (cualquier valor dentro del rango de operación utilizado en el diseño experimental) para **TE**, **VT** y **HA**, y (2) “valores en rango” para **TE** y **VT**, y “valor máximo” para **HA** con el objetivo de estudiar la máxima inclusión posible de amaranto con el fin de mejorar la calidad nutricional sin comprometer significativamente las características sensoriales. Las **Figuras 16 a)** y **16 b)** muestran las deseabilidades individuales (d_i) y la deseabilidad global (D) utilizadas para determinar las condiciones óptimas de extrusión dentro de los rangos de proceso. Esta optimización resultó en deseabilidades individuales altas ($d_i = 1$) para todas las variables de respuesta excepto **IER** y una deseabilidad global de $D = 0.90$, por lo tanto, es una optimización satisfactoria. Las condiciones de extrusión obtenidas para esta primera optimización son: **TE** = 162 °C, **VT** = 240 rpm, **HA** = 12.67 %. En las **Figuras 17 a)** y **17 b)** se muestran las deseabilidades individuales (d_i) y la deseabilidad global (D) utilizadas para encontrar las condiciones

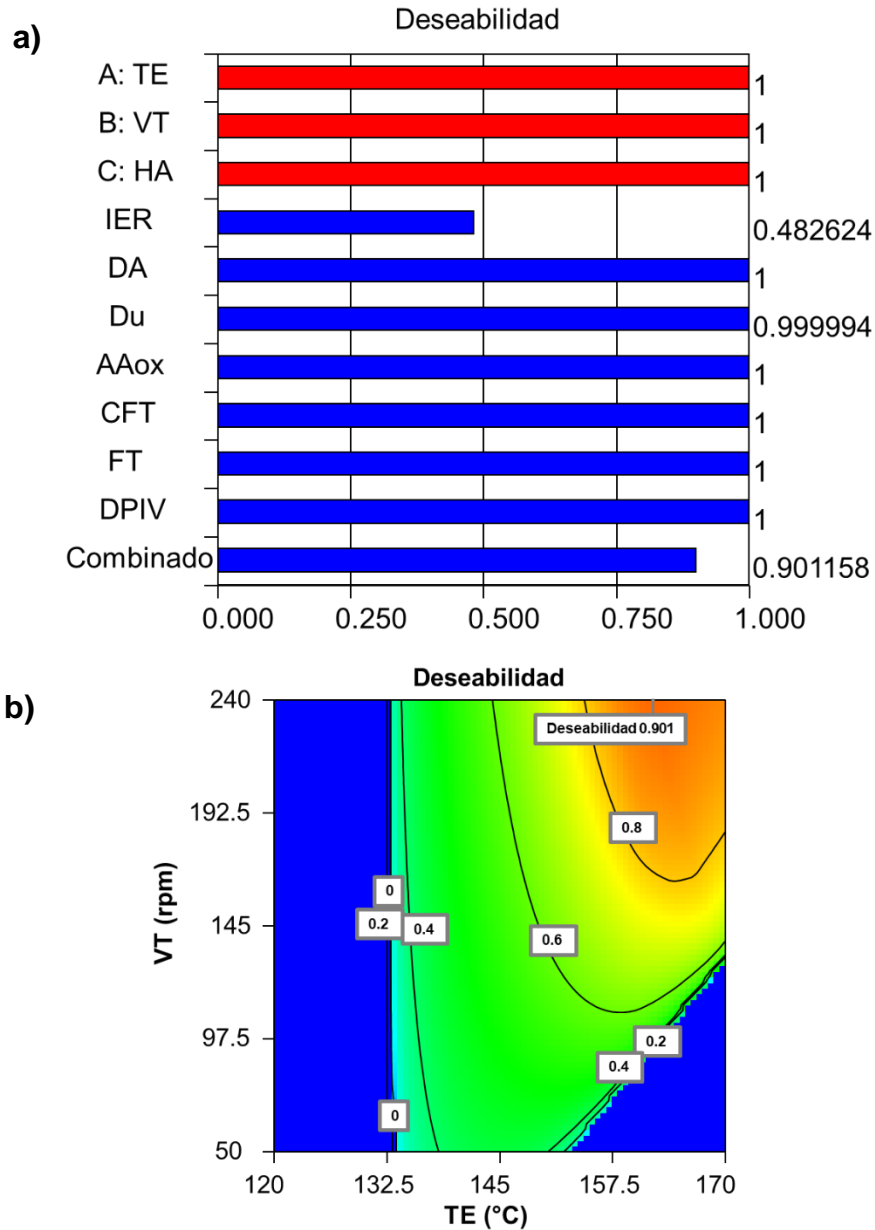


Figura 16. Gráficos de deseabilidades individuales y global para las variables de respuesta [Índice de Expansión Radial (**IER**), Densidad Aparente (**DA**), Dureza (**Du**), Actividad Antioxidante (**AAox**), Compuestos Fenólicos Totales (**CFT**), Flavonoides Totales (**FT**) y Digestibilidad Proteínica *in vitro* (**DPIV**)] para determinar las condiciones óptimas de extrusión con los rangos de proceso completos.

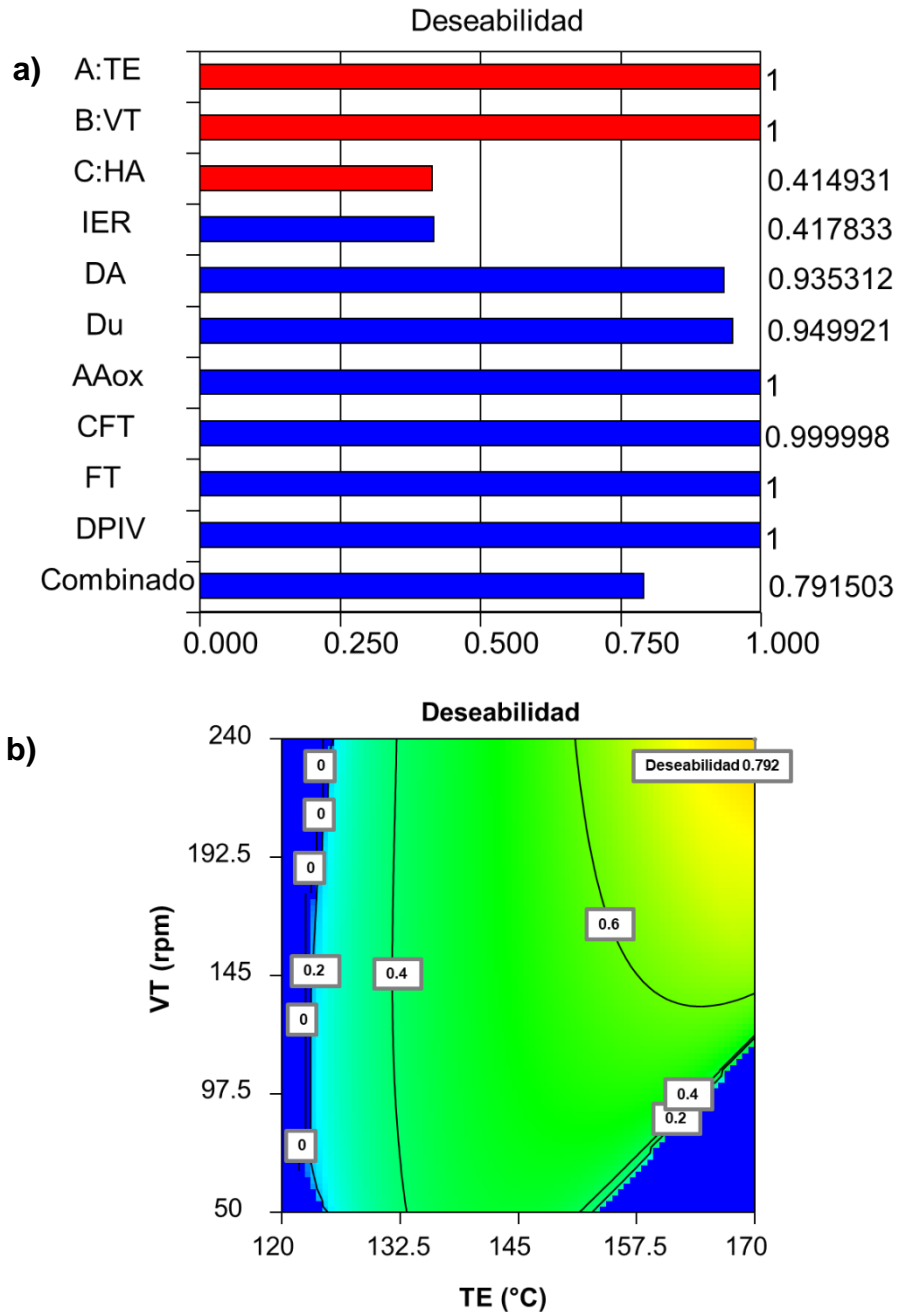


Figura 17. Gráficos de deseabilidades individuales y global para las variables de respuesta [Índice de Expansión Radial (**IER**), Densidad Aparente (**DA**), Dureza (**Du**), Actividad Antioxidante (**AAox**), Compuestos Fenólicos Totales (**CFT**), Flavonoides Totales (**FT**) y Digestibilidad Proteínica in vitro (**DPIV**)] para determinar las condiciones óptimas de extrusión con máxima **HA**.

óptimas de extrusión con la máxima inclusión posible de amaranto (**HA** máximo), dando como resultado deseabilidades individuales altas ($d_i \geq 0.94$) para todas las variables de respuesta excepto **IER** y una deseabilidad global de $D = 0.79$, por lo tanto, es una optimización altamente aceptable. Las condiciones de extrusión para esta segunda optimización son: **TE** = 170 °C, **VT** = 240 rpm, **HA** = 29.05 %.

b. Validación

Los valores teóricos predichos por los modelos de predicción y los valores experimentales obtenidos para las **BEEO** se muestran en el **Cuadro 17**. Los resultados fueron satisfactorios y se encuentran dentro de los intervalos de confianza teóricos, por lo tanto, los valores óptimos obtenidos son adecuados y reproducibles.

C. CARACTERIZACIÓN DE BOTANAS EXTRUDIDAS EXPANDIDAS OBTENIDAS CON CONDICIONES OPTIMIZADAS DE EXTRUSIÓN

1. Caracterización física, textural y morfométrica

En el **Cuadro 18** se muestran los resultados obtenidos para la caracterización física [Índice de Expansión Radial (**IER**), Densidad Aparente (**DA**)], textural [Dureza (**Du**), **Crispness**, **Crunchiness**] y morfométrica [Dimensión Fractal de Textura (**Dft**) y Lagunaridad (**Λt**) en dirección longitudinal y transversal] de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**).

a. Índice de Expansión Radial

El **IER** presentó valores de 2.03 - 2.15 para las **BEEO** y 2.00 para la botana **Control**. Sin embargo, no se observa una diferencia significativa entre los valores de **IER** de las diferentes botanas obtenidas. Este fenómeno de expansión se encuentra

Cuadro 17. Valores teóricos vs valores experimentales de las variables de respuesta evaluadas en las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**).

Respuesta	BEEO 12 % (162 °C, 240 rpm, 12.67 % amaranto) ¹			BEEO 29 % (170 °C, 240 rpm, 29.05 % amaranto) ²		
	Valor teórico	Intervalo de confianza teórico	Valor experimental ³	Valor teórico	Intervalo de confianza teórico	Valor experimental ³
IER⁴	2.08	2.01 - 2.16	2.08	2.05	1.97 - 2.14	1.97
DA⁵	0.17	0.11 - 0.23	0.20	0.20	0.15 - 0.25	0.21
Du⁶	8.16	3.66 - 12.67	12.08	9.66	5.58 - 13.74	13.23
AAox⁷	4747.6	4152.1 - 5343.0	4259.9	4269.1	3680.9 - 4857.3	4466.1
CFT⁸	419.7	381.0 - 458.4	415.5	383.5	324.9 - 442.0	394.5
FT⁹	404.8	342.4 - 467.1	402.1	613.8	510.3 - 717.2	606.7
DPIV¹⁰	73.5	63.6 - 83.3	75.1	81.2	69.5 - 92.9	79.2

¹ **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto. ² **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto. ³ Los resultados se expresan como promedio de cinco réplicas extrudidas individualmente. ⁴ **IER** = Índice de Expansión Radial. ⁵ **DA** = Densidad Aparente (g / cm³). ⁶ **Du** = Dureza (N). ⁷ **AAox** = Actividad Antioxidante (μmol ET / 100 g, bs). ⁸ **CFT** = Compuestos Fenólicos Totales (mg EAG / 100 g, bs). ⁹ **FT** = Flavonoides Totales (mg EQ / 100 g, bs). ¹⁰ **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in vitro* (%).

Cuadro 18. Características físicas, texturales y morfométricas de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO).

Característica ¹	BEEO 0 % ²	BEEO 12 % ²	BEEO 29 % ²	Control ²	p _N ³	p _{vc} ⁴
Físicas						
IER ³	2.15 ± 0.08 ^a	2.11 ± 0.24 ^a	2.03 ± 0.14 ^a	2.00 ± 0.23	> 0.150	0.428
DA ⁶	0.24 ± 0.06 ^{a*}	0.19 ± 0.03 ^a	0.22 ± 0.03 ^{a*}	0.14 ± 0.03	> 0.150	0.686
Texturales						
Du ⁷	12.17 ± 0.60 ^a	10.46 ± 2.26 ^a	12.90 ± 1.36 ^a	10.81 ± 0.94	> 0.150	0.303
Crispness ⁸	103.49 ± 10.81 ^{a*}	91.26 ± 11.92 ^{a*}	84.84 ± 2.29 ^{a*}	66.08 ± 5.09	> 0.150	0.186
Crunchiness ⁹	108.54 ± 8.07 ^{a*}	89.35 ± 11.73 ^{a*}	92.85 ± 3.26 ^{a*}	69.93 ± 1.79	> 0.150	0.337
Morfométricas						
D _{ft} ¹⁰ longitudinal	1.452 ± 0.025 ^a	1.386 ± 0.026 ^b	1.396 ± 0.020 ^{ab}	1.416 ± 0.019	> 0.150	0.951
Λ _t ¹¹ longitudinal	0.146 ± 0.020 ^a	0.173 ± 0.010 ^a	0.151 ± 0.016 ^a	0.150 ± 0.017	> 0.150	0.875

D_{ft}^{10} transversal	$1.424 \pm 0.021^{a*}$	1.355 ± 0.028^b	1.393 ± 0.019^{ab}	1.372 ± 0.014	> 0.150	0.656
Λ_t^{11} transversal	$0.136 \pm 0.007^{b*}$	$0.132 \pm 0.003^{b*}$	0.204 ± 0.008^a	0.186 ± 0.010	> 0.150	0.401

¹ Los resultados se expresan como promedio \pm desviación estándar de tres réplicas extrudidas individualmente. ^{a-c} Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). * Medias con * en superíndice son significativamente diferentes al **Control** (Dunnet, $p \leq 0.05$). ² **BEE0 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEE0 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEE0 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón. ³ $p_N > 0.05$ indica que los datos son normales (Prueba de Kolmogorov-Smirnov). ⁴ $p_{vc} > 0.05$ indica que los datos presentan varianza constante (Prueba de Barlett). ⁵ **IER** = Índice de Expansión Radial. ⁶ **DA** = Densidad Aparente (g / cm^3). ⁷ **Du** = Dureza (N). ⁸ (N). ⁹ (N.mm). ¹⁰ **D_{ft}** = Dimensión Fractal de Textura. ¹¹ **Λ_t** = Lagunaridad.

relacionado con el comportamiento del almidón y las altas presiones ejercidas durante la extrusión. El almidón, que es abundante en los granos, tiene la capacidad de absorber y retener agua, y se gelatiniza bajo condiciones de calor y humedad aplicadas. Al mismo tiempo, las altas presiones (TE y VT altas) presentes durante la extrusión mantienen el agua retenida en el producto. Al salir del extrusor, la disminución de la presión permite que el agua se evapore y escape rápidamente del alimento, lo que resulta en la formación de poros y la expansión del producto final. Por otro lado, la inclusión de amaranto al maíz azul adiciona fibra y proteínas que compiten con el almidón por el agua, afectando la gelatinización de este y, a su vez, la expansión del producto. Sin embargo, en los resultados obtenidos se observa que la inclusión de amaranto hasta un nivel de 29 % no afecta significativamente esta característica de calidad. En la **Figura 18** se muestran las botanas expandidas.

b. Densidad Aparente

La **DA** presentó valores entre 0.19 - 0.24 g / cm³ para las **BEE0**, mientras que el valor obtenido para la botana **Control** fue de 0.14 g / cm³. En el **Cuadro 18** se muestran los resultados obtenidos para cada botana y se observa que la **DA** no es significativamente diferente entre las diferentes **BEE0**, sin embargo, existe una diferencia significativa entre las **BEE0 0 %** y **BEE0 29 %** respecto a la botana **Control**. La **DA** se determina como una relación entre la masa y el volumen de la botana y, a su vez, el volumen se relaciona directamente al índice de expansión, por lo que incrementos en la densidad aparente indican disminuciones en el índice de expansión. Anteriormente se encontró que la inclusión de amaranto no tuvo un efecto significativo sobre el **IER** hasta un nivel de inclusión de 29 %, sin embargo, sí afecta



BEEO 0 %

BEEO 12 %

BEEO 29 %

Control

Figura 18. Botanas expandidas obtenidas por condiciones optimizadas de extrusión. **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón.

significativamente a la variable **DA** al nivel de 0 y 29 % amaranto respecto a la botana **Control**; este comportamiento podría deberse a un impacto negativo sobre la expansión longitudinal de la botana y no radial como se evaluó en el presente estudio.

Martin y col (2021) adicionaron tarta residual obtenida durante la producción de aceite de canola a almidón de maíz, y evaluaron el efecto de dicha adición a diferentes niveles y de la temperatura de extrusión sobre propiedades reológicas y de expansión. Los autores reportaron que al aumentar la temperatura de extrusión se obtienen valores más altos tanto en índice de expansión radial como en índice de expansión longitudinal.

c. Dureza

Los valores obtenidos de **Du** se encuentran entre 10.46 y 12.17 N para las **BEE0** y 10.81 N para la botana **Control**. En el **Cuadro 18** se muestran los resultados obtenidos y se observa que no hay diferencia estadística significativa entre las diferentes **BEE0** y la botana **Control**. La **Du** es directamente proporcional a la expansión del producto debido a que una mayor cantidad de poros permiten que se requiera un menor esfuerzo para penetrar la botana. De acuerdo con lo reportado por diversos autores (Félix y col 2020; Gómez y col 2021), la adición de algunas fibras y proteínas afecta la gelatinización del almidón debido a que unen al agua más fuertemente que el almidón, por lo tanto, la botana resulta más compacta y su estructura es más resistente ante la penetración. Sin embargo, anteriormente se observó que la inclusión de amaranto hasta un nivel de 29 % no afecta significativamente el **IER** (o creación de poros) en las **BEE0** y, por lo tanto, tampoco tiene un efecto significativo sobre la **Du**.

d. Crispness y Crunchiness

De acuerdo con Chauvin y col (2008), **Crispness** se define como la emisión de un sonido agudo, fuerte, rápido y limpio que ocurre cuando se mastica con los incisivos (dientes frontales), siendo estos los primeros dientes que participan en la masticación, y labios abiertos; mientras que **Crunchiness** se define como una serie de múltiples sonidos bajos que ocurren cuando se mastica con los molares (dientes posteriores), siendo estos los últimos dientes que participan en la masticación, y labios cerrados.

Las variables **Crispness** y **Crunchiness** se evaluaron mediante un analizador de textura. En el **Cuadro 18** se muestran los resultados obtenidos y se observa que no hubo diferencia estadística significativa entre las diferentes **BEEO**, las cuales variaron entre 84.84 - 103.49 N y 89.35 - 108.54 N.mm para **Crispness** y **Crunchiness**, respectivamente; sin embargo, sí hubo diferencia entre cada una de las **BEEO** respecto a la botana **Control**, la cual presentó valores de 66.08 N y 69.93 N.mm para **Crispness** y **Crunchiness**, respectivamente. Estas diferencias pueden atribuirse a que la botana **Control** está elaborada únicamente de fracciones ricas en almidón, mientras que las **BEEO** están elaboradas a partir de granos integrales, los cuales adicionan fibra, proteínas y aceite, afectando la formación de los poros y, por lo tanto, la textura de cada botana. Anteriormente, Valenzuela y col (2018) evaluaron las variables **Crispness** y **Crunchiness** en botanas extrudidas a partir de mezclas de papa y maíz adicionadas con distintos niveles de manta de calamar, y encontraron resultados similares donde una mayor inclusión de manta de calamar provoca incrementos estadísticamente significativos en **Crispness** y **Crunchiness** debido a

que la adición de proteínas forma estructuras internas más rígidas que evitan la formación de poros cuando el agua se evapora.

e. Propiedades morfométricas

La Dimensión Fractal de Textura (D_{ft}) es una medida que describe la repetitividad y distribución de patrones a distintas escalas sobre una imagen, por lo que se asocia con la rugosidad e irregularidad en la superficie de objetos. Valores bajos de D_{ft} representan estructuras lisas o simples con patrones más regulares y menos detalles complejos sobre la textura analizada, mientras que valores altos de D_{ft} indican estructuras rugosas y complejas con numerosos patrones irregulares y variables a distintas escalas (García y col 2022). Por otro lado, la lagunaridad (Λ_t) describe las “lagunas” o espacios vacíos que se encuentran en un objeto, por lo que esta medida del espaciamiento entre patrones se complementa con la D_{ft} que cuantifica la rugosidad externa. Valores bajos de Λ_t corresponden a agujeros o espaciamentos pequeños, mientras que espaciamentos grandes presentan altos valores de Λ_t (Vargas y col 2006; García y col 2022).

En el **Cuadro 18** se muestran los resultados obtenidos de D_{ft} y Λ_t tanto en dirección longitudinal como transversal para las **BEE0** y la botana **Control**. Se obtuvieron valores de D_{ft} (corte longitudinal) de 1.386 - 1.452 para las **BEE0** y 1.416 para la botana **Control**, y se encontró que hubo diferencia estadísticamente significativa entre la **BEE0 0%** y la **BEE0 12%**, mientras que no hubo diferencias entre las **BEE0** y la botana **Control**. Por otra parte, los valores de Λ_t (corte longitudinal) fueron de 0.146 - 0.171 para las **BEE0** y 0.150 para la botana **Control**; no se encontró diferencia estadística significativa entre las **BEE0** y la botana **Control**. Estos resultados indican

que, en una vista longitudinal, la **BEE0 0 %** presenta una estructura interna más rugosa o irregular en comparación a la **BEE0 12 %**, mientras que el resto de las **BEE0** presentan una estructura interna similar, y el tamaño de lagunas o espacios vacíos no difiere al comparar entre las distintas botanas. Este comportamiento podría deberse a que la adición de fibra y proteínas provenientes del amaranto afectan la gelatinización del almidón y, a su vez, forman estructuras más rígidas y compactas disminuyendo así la expansión o formación de poros, los cuales son responsables de la formación de paredes o superficies más rugosas e irregulares; sin embargo, al adicionar más amaranto (29 %) se obtiene un valor de D_{ft} ligeramente superior respecto a la **BEE0 12 %** y sin diferencia estadística significativa respecto a las **BEE0 0 %** y **BEE0 12 %**. Un comportamiento similar fue reportado por Valenzuela y col (2018), quienes observaron que la adición de hasta 60 % de manta de calamar a mezclas de papa y maíz disminuyen significativamente el valor de D_{ft} , sin embargo, al adicionar más de 60 % se observó un incremento de D_{ft} hasta un valor que no presenta diferencia estadística significativa respecto a una botana elaborada con pura harina de maíz o papa.

Asimismo, en la **Figura 19** se muestran las imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) obtenidas por corte longitudinal para las distintas botanas evaluadas. Los espacios grises representan la superficie de la botana, mientras que los espacios negros representan lagunas o espacios vacíos (poros). En estas imágenes se observó que la **BEE0 0 %** presenta una estructura interna más irregular y con mayor número de cavidades y capas expuestas, mientras que la **BEE0 12 %** presentó una estructura más lisa y menos detallada en comparación al resto de las botanas; además, se

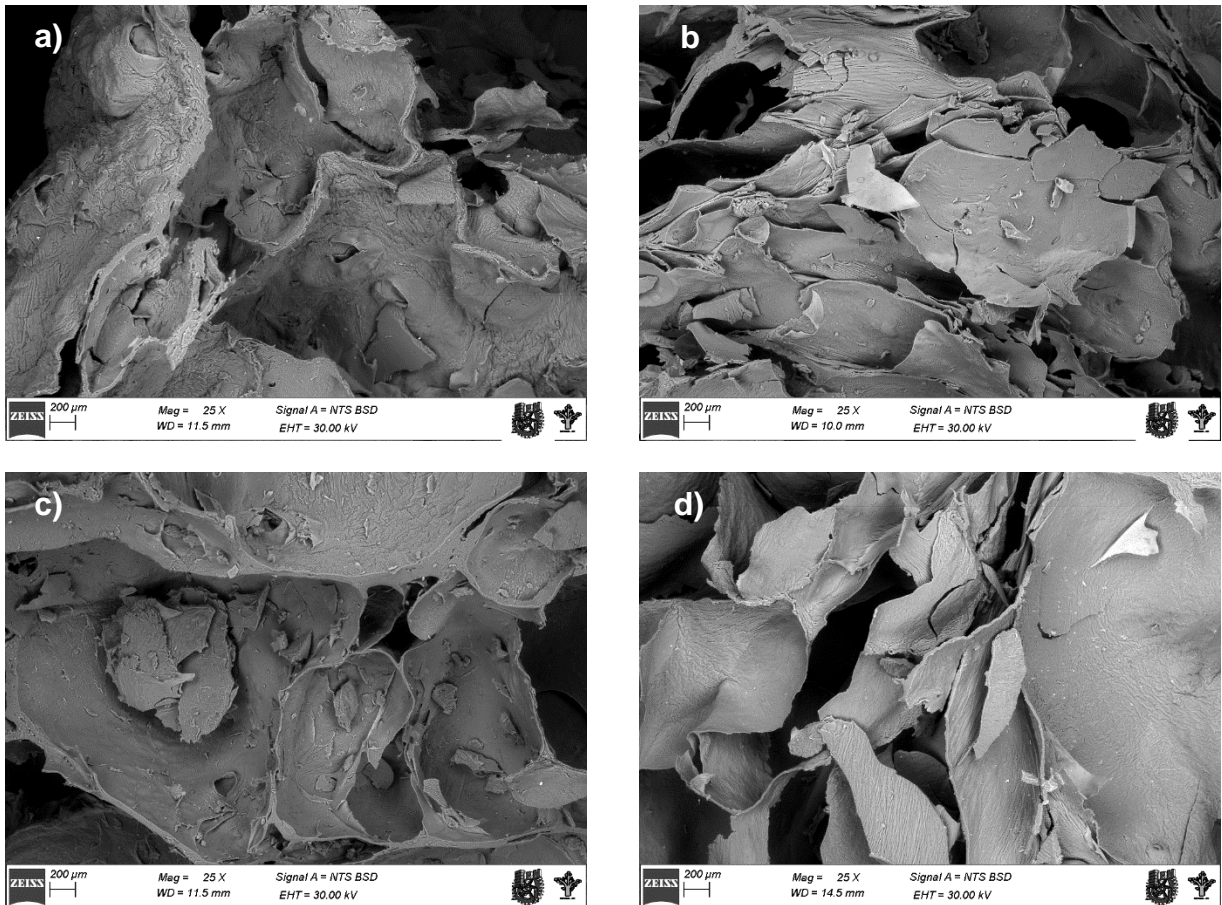


Figura 19. Imágenes obtenidas por MEB de la estructura interna de las diferentes botanas mediante corte longitudinal. a) **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, b) **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12 % harina de amaranto, c) **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29 % harina de amaranto y d) **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón.

observó que los espacios vacíos se encuentran proporcionales y similarmente distribuidos entre las distintas botanas. Por otra parte, se obtuvieron valores de D_{ft} (corte transversal) de 1.355 - 1.424 para las **BEE0** y de 1.372 para la botana **Control** (**Cuadro 18**). En este caso se observó un comportamiento similar al mostrado en el corte longitudinal, siendo **BEE0** y **BEE12** estadísticamente diferentes una de otra, sin embargo, se encontró también diferencia significativa entre **BEE0** y la botana **Control**. Estos resultados indican que la **BEE0** presentó una estructura interna significativamente más rugosa, compleja y detallada que la **BEE12** y la botana **Control**. Además, se adquirieron valores de Λ_t de 0.132 - 0.204 para las **BEE0** y 0.186 para la botana **Control** y, asimismo, se observó que los valores de Λ_t en **BEE0** y **BEE12** fueron significativamente menores en comparación a **BEE29** y la botana **Control**. Estos resultados revelan que las botanas **BEE29** y **Control** presentan espacios vacíos más grandes. En la **Figura 20** se muestran las imágenes de MEB obtenidas para las diferentes botanas por corte transversal, y se observó que la **BEE12** presenta una estructura más simple y lisa, mientras que la **BEE29** presentó estructuras ligeramente más complejas y rugosas y, a su vez, con espacios vacíos más grandes.

2. Caracterización fisicoquímica, química y nutricional

En el **Cuadro 19** se muestran los resultados obtenidos para la caracterización fisicoquímica [Luminosidad o Valor Hunter “L”, Diferencia Total de Color (ΔE), Actividad Acuosa (a_w)], química (**proteína, lípidos, cenizas, fibra cruda y carbohidratos**) y nutricional [Digestibilidad Proteínica *in Vitro* (**DPIV**) y Triptófano (**Trp**)].

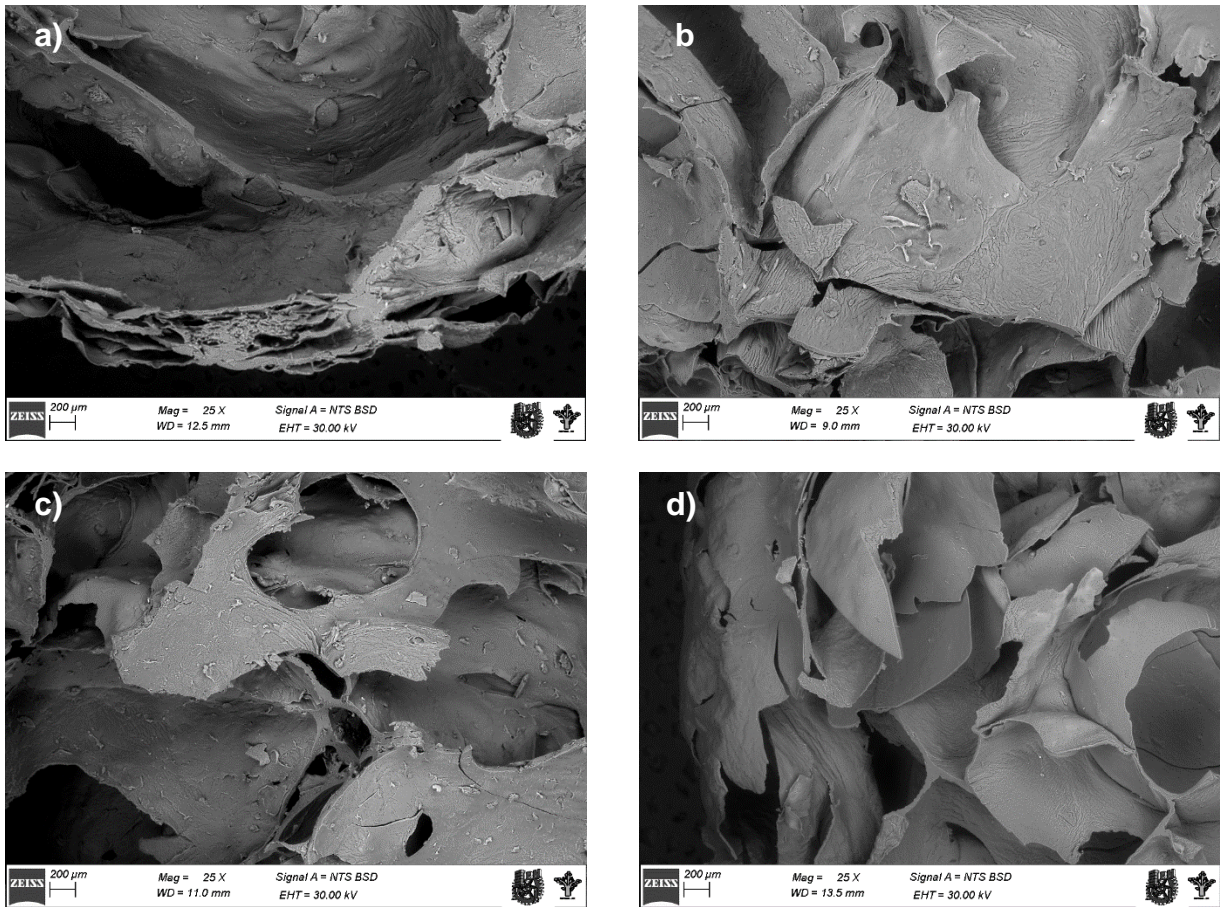


Figura 20. Imágenes obtenidas por MEB de la estructura interna de las diferentes botanas mediante corte transversal. a) **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, b) **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12 % harina de amaranto, c) **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29 % harina de amaranto y d) **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón.

Cuadro 19. Características fisicoquímicas, químicas y nutricionales de las Botanas Extrudidas Expandidas Optimizadas (BEEO).

Característica ¹	BEEO 0 % ²	BEEO 12 % ²	BEEO 29 % ²	Control ²	p _N ³	p _{vc} ⁴
Fisicoquímicas						
L ⁵	63.26 ± 0.81 ^{b*}	66.37 ± 0.94 ^{a*}	66.05 ± 1.24 ^{a*}	81.31 ± 1.13	> 0.150	0.857
ΔE ⁶	34.60 ± 0.83 ^{a*}	31.96 ± 1.09 ^{b*}	31.33 ± 1.12 ^{b*}	18.88 ± 1.44	> 0.150	0.923
a _w ⁷	0.35 ± 0.02 ^{a*}	0.39 ± 0.02 ^a	0.35 ± 0.01 ^{a*}	0.39 ± 0.01	> 0.150	0.612
Composición química (% , bs)						
Proteína	8.09 ± 0.21 ^c	10.60 ± 0.23 ^{b*}	12.36 ± 0.92 ^{a*}	8.29 ± 1.25	> 0.150	0.106
Lípidos	1.38 ± 0.35 ^{a*}	1.62 ± 0.48 ^{a*}	1.47 ± 0.05 ^{a*}	0.65 ± 0.14	> 0.150	0.086
Cenizas	1.34 ± 0.06 ^{b*}	1.38 ± 0.11 ^{b*}	1.60 ± 0.05 ^{a*}	0.75 ± 0.07	> 0.150	0.566
Fibra cruda	1.62 ± 0.05 ^{c*}	2.34 ± 0.11 ^{b*}	4.31 ± 0.11 ^{a*}	ND	> 0.150	0.563

Carbohidratos	87.56 ± 0.19 ^{a*}	83.99 ± 0.78 ^{b*}	80.25 ± 0.81 ^{c*}	90.31 ± 1.04	> 0.150	0.243
Nutricionales						
<i>DPIV</i> ⁸	71.45 ± 3.48 ^a	77.35 ± 3.53 ^a	80.36 ± 7.53 ^a	77.21 ± 6.72	> 0.150	0.502
Trp ⁹	0.151 ± 0.031 ^b	0.084 ± 0.026 ^b	0.525 ± 0.095 ^{a*}	0.095 ± 0.019	> 0.150	0.192

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar de tres réplicas extrudidas por individualmente. ^{a-c} Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). * Medias con * en superíndice son significativamente diferentes al **Control** (Dunnet, $p \leq 0.05$). ² **BEE0 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEE0 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEE0 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón. ³ $p_N > 0.05$ indica que los datos son normales (Prueba de Kolmogorov-Smirnov). ⁴ $p_{vc} > 0.05$ indica que los datos presentan varianza constante (Prueba de Barlett). ⁵ **L** = Luminosidad. ⁶ **ΔE** = Diferencia total de color. ⁷ a_w = Actividad acuosa. ⁸ **DPIV** = Digestibilidad Proteínica *in Vitro* (%). ⁹ **Trp** = Triptófano (g Trp / 100 g proteína).

a. Propiedades fisicoquímicas de las BEEO

Las distintas **BEEO** presentaron valores de **L** y **ΔE** entre 63.26 - 66.37 y 31.33 - 34.60, respectivamente, además la botana **Control** presentó 81.31 y 18.88 en **L** y **ΔE**, respectivamente. Estos resultados se muestran en el **Cuadro 19** e indican que la adición de amaranto a harina de maíz azul incrementa el valor de **L** y disminuye significativamente el valor de **ΔE** debido a que la harina de amaranto presenta un color más brillante y cercano al blanco en comparación al maíz azul. Asimismo, se observa que todas las **BEEO** presentaron diferencia significativa tanto en **L** como en **ΔE** respecto al **Control**; esto se debe a que el **Control** fue elaborado con fracciones ricas en almidón, las cuales tienen un color brillante cercano al blanco de referencia.

Por otro lado, se obtuvieron valores en a_w de 0.35 - 0.39 para las **BEEO** y 0.39 para la botana **Control** (**Cuadro 19**). Estos valores indican que las botanas pueden almacenarse sin riesgo de que exista desarrollo enzimático o crecimiento de microorganismos (Tapia y col 2020).

b. Composición química de las BEEO

Las **BEEO** exhibieron valores entre 8.09 - 12.36 % para proteína, 1.38 - 1.47 % para lípidos, 1.34 - 1.60 % para cenizas, 1.62 - 4.31 % para fibra cruda y 80.25 - 87.56 % para carbohidratos, mientras que en la botana **Control** se obtuvieron valores de 8.29, 0.65, 0.75 y 90.31 % para proteína, lípidos, cenizas y carbohidratos, respectivamente, y no se detectó contenido de fibra cruda (**Cuadro 19**). En estos resultados se observa que el contenido de proteína incrementó en las **BEEO** al adicionar amaranto en los diferentes niveles, siendo la **BEEO 29 %** la botana con

mayor contenido de proteína debido a que el amaranto tiene un mayor contenido de proteína en comparación al maíz, asimismo, se observa que el contenido de proteína en **BEE0 0 %** es similar al valor reportado para la harina de maíz azul crudo.

En cuanto al contenido de lípidos se encontró que no hay diferencia significativa entre las distintas **BEE0**, sin embargo, la botana **Control** presentó un contenido lipídico significativamente menor en comparación a las muestras elaboradas con maíz azul y amaranto. Esto se debe a que la botana **Control** está elaborada con fracciones ricas en almidón, por lo que se trata de un material pobre en otros nutrimentos como proteínas, lípidos, cenizas y fibra. Por otro lado, se encontró que el contenido de lípidos en las muestras extrudidas es menor que en las harinas crudas de maíz azul y amaranto. Esta disminución aparente del contenido lipídico durante el proceso de extrusión se debe a diversas reacciones y transformaciones que ocurren en los componentes del alimento, tales como: (1) acomplejamiento entre lípidos y amilosa, (2) oxidación de lípidos, y (3) uniones o interacción de lípidos con almidón y proteínas, siendo estos algunos ejemplos donde los lípidos se ven involucrados (Ilo y col 2000).

El contenido de cenizas en las **BEE0** no mostró un cambio significativo al aumentar el nivel de inclusión de amaranto de 0 a 12 %, sin embargo, se observa un incremento significativo cuando el nivel de inclusión de amaranto es de 29 %, lo cual se debe a que el amaranto presenta en su composición química un contenido de cenizas más alto que el maíz azul. Por otro lado, todas las **BEE0** mostraron un contenido de cenizas mayor que la botana **Control** debido a que esta fue elaborada con un material pobre en minerales.

Los valores obtenidos de fibra cruda fueron significativamente diferentes entre las **BEEO**. En el **Cuadro 19** se observa que el incremento en el nivel de inclusión de amaranto causa un aumento en el contenido de fibra cruda debido a que el amaranto presenta en su composición química un contenido mayor de fibra cruda en comparación al maíz azul. Por otro lado, no se detectó fibra cruda en la botana **Control**.

En cuanto al contenido de carbohidratos, se observa que el incremento en el contenido de amaranto provoca disminución en el contenido de carbohidratos en las **BEEO**. Este comportamiento se debe a que la inclusión de un mayor contenido de amaranto adiciona proteína, cenizas y fibra a la composición final de la **BEEO**, e incrementos en estos componentes químicos causa cambios en la proporción en que se encuentran los carbohidratos. Por otro lado, el contenido de carbohidratos en la botana **Control** fue significativamente mayor que en las **BEEO**, debido a que el material utilizado es principalmente almidón.

c. Características nutricionales de las BEEO

En el **Cuadro 19** se muestran los resultados obtenidos para **DPIV** en las diferentes **BEEO** y la botana **Control**. Los valores de **DPIV** fueron de 71.45 - 80.36 % para las **BEEO** y 77.21 % para la botana **Control**. Estos resultados muestran que no hubo diferencia estadística significativa entre las **BEEO** y la botana **Control**, lo cual indica que la muestra de maíz azul presenta una **DPIV** similar a la elaborada con fracciones ricas en almidón, y que la adición de amaranto hasta un nivel de inclusión de 29 % no afecta significativamente esta variable. Además, los valores obtenidos son mayores que los del amaranto sin procesar y similares a los del maíz azul sin procesar. Por otra parte, el valor obtenido para **DPIV** del maíz azul extrudido es ligeramente menor que

lo reportado por León y col (2021), quienes caracterizaron harina de maíz azul extrudido y obtuvieron una **DPIV** de 77.32 %.

Anteriormente, Alegbejo (2013) reportó que en el amaranto se han identificado diversos factores antinutricionales como saponinas, taninos, ácido fítico, oxalatos, inhibidores de proteasas, nitritos, entre otros y, de acuerdo con Santos y col (2024), algunos de estos factores antinutricionales inhiben la accesibilidad de las enzimas digestivas hacia las proteínas o disminuyen la actividad enzimática mediante diversos mecanismos, afectando así a la **DPIV**. Una manera viable de disminuir los efectos adversos de estos compuestos es mediante procesamiento térmico del grano antes de su consumo y, de acuerdo con lo reportado por Félix y col (2021), el proceso de extrusión permite inactivar parcial o completamente a los factores antinutricionales, además de promover la desnaturalización de proteínas. Esto permite explicar el comportamiento exhibido por las **BEEO** y la botana **Control**, ya que es esperable que el proceso de extrusión bajo condiciones drásticas de **TE** y **VT** elimine los factores antinutricionales que pueden encontrarse en el grano de amaranto y, a su vez, maximice la desnaturalización de proteínas, resultando así en valores de **DPIV** altos y similares entre las diferentes botanas.

Por otra parte, se obtuvieron valores de 0.084 - 0.525 g de triptófano (**Trp**) / 100 g de muestra en base seca (bs) para las **BEEO** y 0.095 g **Trp** / 100 g de muestra (bs) para la botana **Control** (**Cuadro 19**). En estos resultados se observa que la **BEEO 0 %** y la **BEEO 12 %** no presentaron diferencia estadística entre sí ni contra la botana **Control**, sin embargo, la **BEEO 29 %** presentó un valor significativamente más alto que las demás botanas. Este comportamiento se debe a que tanto el maíz azul como

las fracciones ricas en almidón utilizadas para la botana **Control** son deficientes en **Trp**, mientras que el amaranto presenta un contenido de **Trp** significativamente más alto que el maíz; por ello, la botana con mayor nivel de inclusión de amaranto mostró tener más **Trp** que las demás botanas.

3. Caracterización antioxidante y fitoquímica

En el **Cuadro 20** se muestran los resultados obtenidos para la caracterización antioxidante [Actividad Antioxidante (**AAox**) por ABTS y DPPH] y fitoquímica [Compuestos Fenólicos Totales (**CFT**), Flavonoides Totales (**FT**) y Contenido de Antocianinas Totales (**CAT**)] para las diferentes fracciones de compuestos extraídos (libres y ligados).

a. Actividad antioxidante

La actividad antioxidante (**AAox**) se determinó por los métodos ABTS y DPPH, y se obtuvieron valores de 3916.6 - 4413.9 y 345.4 - 364.8 $\mu\text{mol ET} / 100 \text{ g muestra (bs)}$ para las **BEEO** por ABTS y DPPH, respectivamente, mientras que la botana **Control** exhibió valores de 2168.2 y 195.3 $\mu\text{mol ET} / 100 \text{ g muestra (bs)}$, siendo la fracción de compuestos ligados los que aportan una mayor actividad antioxidante en las diferentes muestras evaluadas (**Cuadro 20**). Estos resultados mostraron un comportamiento similar por ambos métodos, donde se observa que las **BEEO** no presentan diferencia estadística significativa entre sí, pero sus valores de **AAox** son significativamente mayores en comparación a la botana **Control**. Este comportamiento indica que la adición de amaranto hasta un nivel de inclusión de 29 % no afecta significativamente el valor de actividad antioxidante; asimismo, la botana **Control** presenta una menor **AAox** debido a que materiales refinados como las fracciones ricas en almidón

Cuadro 20. Actividad antioxidante y contenido de fitoquímicos en las Botanas Extrudidas Expandidas Optimizadas (BEEO).

Característica ¹	BEEO 0 % ²	BEEO 12 % ²	BEEO 29 % ²	Control ²	p _N ³	p _{vc} ⁴
AAox⁵						
ABTS						
Libres	756.8 ± 36.9 ^{a*}	685.5 ± 75.3 ^a	827.5 ± 74.7 ^{a*}	626.3 ± 17.2	> 0.150	0.641
Ligados	3267.6 ± 165.2 ^{a*}	3728.4 ± 483.5 ^{a*}	3089.2 ± 544.4 ^{a*}	1541.9 ± 87.2	> 0.150	0.368
Total	4066.6 ± 60.8 ^{a*}	4413.9 ± 408.7 ^{a*}	3916.6 ± 469.8 ^{a*}	2168.2 ± 70.0	> 0.150	0.102
DPPH						
Libres	115.3 ± 6.0 ^{a*}	102.4 ± 6.9 ^{ab*}	90.3 ± 5.0 ^{b*}	64.6 ± 3.4	> 0.150	0.918
Ligados	246.9 ± 16.4 ^{a*}	262.4 ± 19.5 ^{a*}	255.1 ± 21.1 ^{a*}	130.7 ± 11.4	> 0.150	0.950
Total	362.2 ± 10.5 ^{a*}	364.8 ± 26.4 ^{a*}	345.4 ± 16.1 ^{a*}	195.3 ± 8.1	> 0.150	0.511
CFT⁶						

Libres	106.9 ± 13.5 ^{a*}	119.2 ± 26.2 ^{a*}	99.1 ± 8.3 ^{a*}	68.3 ± 2.8	> 0.150	0.356
Ligados	323.4 ± 11.6 ^{a*}	337.3 ± 13.0 ^{a*}	315.3 ± 34.9 ^{a*}	188.7 ± 22.2	0.145	0.281
Total	430.3 ± 6.3 ^{a*}	456.5 ± 22.9 ^{a*}	414.4 ± 28.0 ^{a*}	257.0 ± 25.0	> 0.150	0.246
FT⁷						
Libres	41.16 ± 5.6 ^b	58.65 ± 5.0 ^{b*}	89.26 ± 14.6 ^{a*}	29.36 ± 4.6	> 0.150	0.301
Ligados	395.9 ± 18.0 ^b	340.2 ± 12.5 ^{b*}	489.9 ± 40.7 ^{a*}	391.1 ± 19.8	> 0.150	0.303
Total	437.1 ± 23.6 ^b	398.9 ± 17.5 ^b	579.2 ± 30.1 ^{a*}	420.5 ± 24.3	> 0.150	0.793
CAT⁸						
Total	6.5 ± 0.2 ^a	6.9 ± 0.2 ^{a*}	5.5 ± 0.4 ^{b*}	0.2 ± 0.0	> 0.150	0.583

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar de tres réplicas extrudidas individualmente. ^{a-c} Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). * Medias con * en superíndice son significativamente diferentes al **Control** (Dunnet, $p \leq 0.05$). ² **BEE0 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEE0 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEE0 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto,

Control = botana elaborada con fracciones ricas en almidón. ³ **p_N** > 0.05 indica que los datos son normales (Prueba de Kolmogorov-Smirnov). ⁴ **p_{vc}** > 0.05 indica que los datos presentan varianza constante (Prueba de Barlett). ⁵ **AAox** = Actividad Antioxidante [μ mol equivalentes de trolox (ET) / 100 g, bs]. ⁶ **CFT** = Compuestos Fenólicos Totales [mg equivalentes de ácido gálico (EAG) / 100 g, bs]. ⁷ **FT** = Flavonoides Totales [mg equivalentes de quercetina (EQ) / 100 g, bs]. ⁸ **CAT** = Contenido de Antocianinas Totales [mg equivalentes de cianidina-3-glucósido (C3G) / 100 g, bs].

presentan menor contenido de compuestos antioxidantes en comparación a los granos enteros (Gómez y col 2021). Por otra parte, se observa que los valores de **AAox** para los productos extrudidos son mayores en comparación a los valores de las harinas crudas mostrados en el **Cuadro 14**, esta diferencia se debe a que durante el proceso de extrusión ocurren diferentes mecanismos que favorecen el incremento de compuestos con actividad antioxidante, tales como (1) liberación de compuestos unidos a la pared celular, (2) inhibición de enzimas oxidativas, y (3) producción de compuestos antioxidantes como resultado de las reacciones de Maillard (Félix y col 2020).

b. Contenido de compuestos fenólicos totales

El contenido de **CFT** mostró valores de 414.4 - 456.5 mg EAG / 100 g muestra (bs) para las **BEE0** y 257 mg EAG / 100 g muestra (bs) para la botana **Control** (**Cuadro 20**). Estos valores exhiben un comportamiento similar tanto en la fracción libre como ligada, donde se observa que no existe diferencia significativa entre las **BEE0** y, a su vez, estas presentan un contenido significativamente mayor que la botana **Control**. Asimismo, las muestras extrudidas presentan valores más altos de **CFT** en comparación a los granos crudos. Estos resultados se deben a que (1) la adición de amaranto hasta un nivel de inclusión de 29 % no afecta significativamente el contenido de **CFT**, (2) el uso de granos integrales permite enriquecer a las botanas con un mayor contenido de compuestos fenólicos en comparación a la botana **Control** donde se utilizó una fuente con mayor contenido de almidón, y (3) durante el proceso de extrusión existe la creación y acumulación de productos provenientes de la reacción de Maillard que se leen a la misma longitud de onda que los compuestos fenólicos.

c. Contenido de flavonoides totales

El contenido de **FT** presentó valores de 398.8 - 655.4 para las **BEE0** y 586.4 para la botana **Control** (**Cuadro 20**). Estos resultados muestran que la **BEE29** % presenta un valor de **FT** significativamente más alto que las **BEE0** % y **BEE12** %, asimismo, estas últimas no presentan diferencia significativa con respecto a la botana **Control**. Este comportamiento se debe a que (1) incrementos de **HA** hasta un nivel de alrededor de 30 % permite incrementar ligeramente el contenido de **FT**, de acuerdo con lo observado en los gráficos de superficie de respuesta para la variable **FT** (**Figura 14**) y en la validación de resultados (**Cuadro 17**), y (2) altos valores de **TE** y **VT** promueven las reacciones de Maillard, las cuales producen compuestos que se leen a la misma longitud de onda que los flavonoides y, por lo tanto, permiten incrementar el valor de **FT** en las distintas muestras, incluyendo la botana **Control**.

d. Contenido de antocianinas totales

El contenido de antocianinas totales (**CAT**) presentó valores de 5.5 - 6.5 mg EC3G / 100 g de muestra (bs) para las **BEE0** y 0.2 mg EC3G / 100 g de muestra (bs) (**Cuadro 20**). Los resultados obtenidos muestran que no existe diferencia significativa al incrementar **HA** de 0 a 12 %, sin embargo, un nivel de inclusión de 29 % sí representa una disminución significativa de **CAT**. Asimismo, se observa que todas las **BEE0** presentaron valores de **CAT** significativamente más altos en comparación a la botana **Control**. Este comportamiento se debe a que las antocianinas son el principal pigmento que se encuentra en el maíz azul, por lo que disminuciones en el contenido de maíz azul en las mezclas representan también una disminución de **CAT**. Por otra parte, se observa que todas las botanas presentaron valores de **CAT**

significativamente menores en comparación el maíz azul sin procesar debido a que las antocianinas son compuestos termosensibles que se degradan bajo **TE** altas. Anteriormente, Menchaca y col (2020) evaluaron el efecto de las condiciones de extrusión sobre el valor de **CAT** al nixtamalizar maíz azul por medio de extrusión, y reportaron un comportamiento similar donde altas **TE** provocaron una disminución en **CAT**.

4. Evaluación sensorial de textura

La evaluación sensorial se realizó a partir de un panel de 50 jueces no entrenados seleccionados aleatoriamente entre la comunidad de estudiantes y profesores (ambos sexos, 18-44 años de edad) de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México, y se utilizó una escala hedónica de 9 puntos (**Figura 21**) para la evaluación de los atributos de textura y aceptabilidad global. Los resultados obtenidos no presentaron una distribución normal, por lo que fue necesario analizarlos mediante las pruebas Kruskal-Wallis y Dunn para comparación de medianas entre las **BEE0**, y la prueba Mann-Whitney para comparación de medianas entre cada una de las **BEE0** y la botana **Control**.

Los resultados de aceptabilidad textural y global se muestran en los gráficos de la **Figura 22**, donde se observa que la **BEE0 0 %** fue la botana de menor aceptabilidad en ambos atributos (“Me disgusta ligeramente” para aceptabilidad textural y “No me gusta ni me disgusta” para aceptabilidad global), mientras que las **BEE0 12 %** y **BEE0 29 %** obtuvieron una aceptabilidad más alta y no presentaron diferencia estadística entre sí (“Me gusta ligeramente” para aceptabilidad textural y aceptabilidad global). Los



Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Ciencias Químico Biológicas
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos



Fecha: _____ Edad: _____ Género: **Masculino** **Femenino**

Muestra: _____

Prueba la botana que se te presenta y responde las siguientes preguntas (marca con una X tu respuesta).

1. ¿Qué tanto te gusta o disgusta la apariencia o el color de esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

2. ¿Qué tanto te gusta o disgusta la expansión de esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

3. ¿Qué tanto te gusta o disgusta el sabor de esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

4. ¿Qué tanto te gusta o disgusta la textura de esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

5. ¿Qué tanto te gusta o disgusta la densidad de esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

6. Considerando lo anterior. ¿Qué tanto te gusta o disgusta en general esta botana?

Me disgusta extremadamente	No disgusta mucho	Me disgusta	No disgusta ligamente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta ligamente	Me gusta	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
-------------------------------	----------------------	-------------	--------------------------	-------------------------------	-----------------------	----------	-------------------	----------------------------

7. ¿Comprarias esta botana?

Definitivamente sí la compraría	No la compraría	Quizás no la compraría	Quizás sí o quizás no la compraría	Quizás sí la compraría	Sí la compraría	Definitivamente sí la compraría
------------------------------------	--------------------	---------------------------	--	---------------------------	--------------------	------------------------------------

Comentarios:

Figura 21. Escala hedónica de 9 puntos empleada para evaluar sensorialmente las botanas para sus atributos de textura y aceptabilidad global.

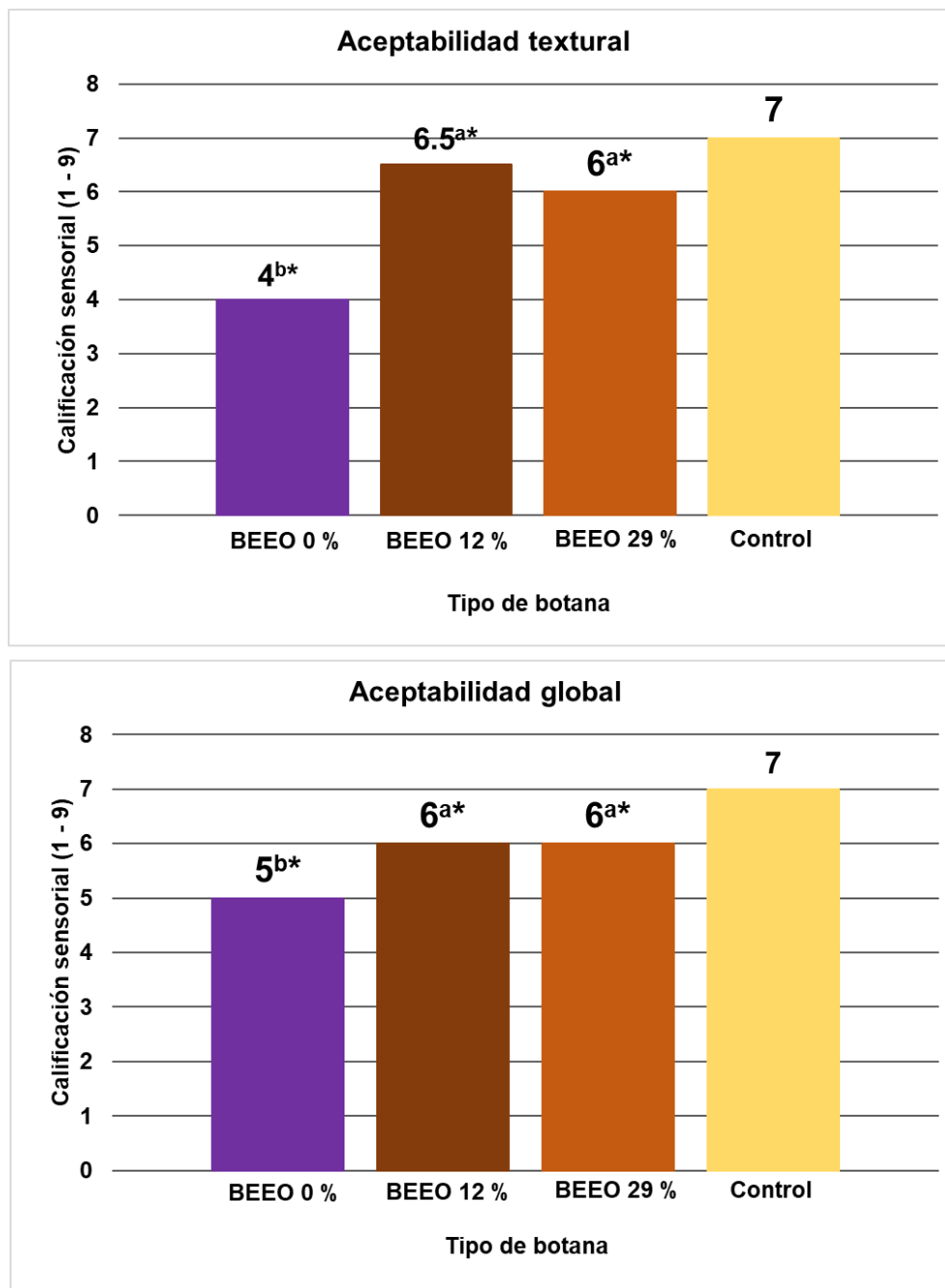


Figura 22. Calificación sensorial para textura y aceptabilidad global de las **BEEO**. **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón.

valores de aceptabilidad textural de las **BEE0 12 %** y **BEE0 29 %** se encontraron 0.5 y 1.0 puntos por debajo de la botana **Control**, respectivamente, mientras que los valores de aceptabilidad global para las **BEE0 12 %** y **BEE0 29 %** se encontraron 1 punto por debajo de la botana **Control**. Por otro lado, en la **Figura 23** y en la **Figura 24** se muestran los gráficos de frecuencia para los puntos dados a aceptabilidad textural y global de cada botana, respectivamente, de acuerdo con el número de jueces que participaron en la evaluación.

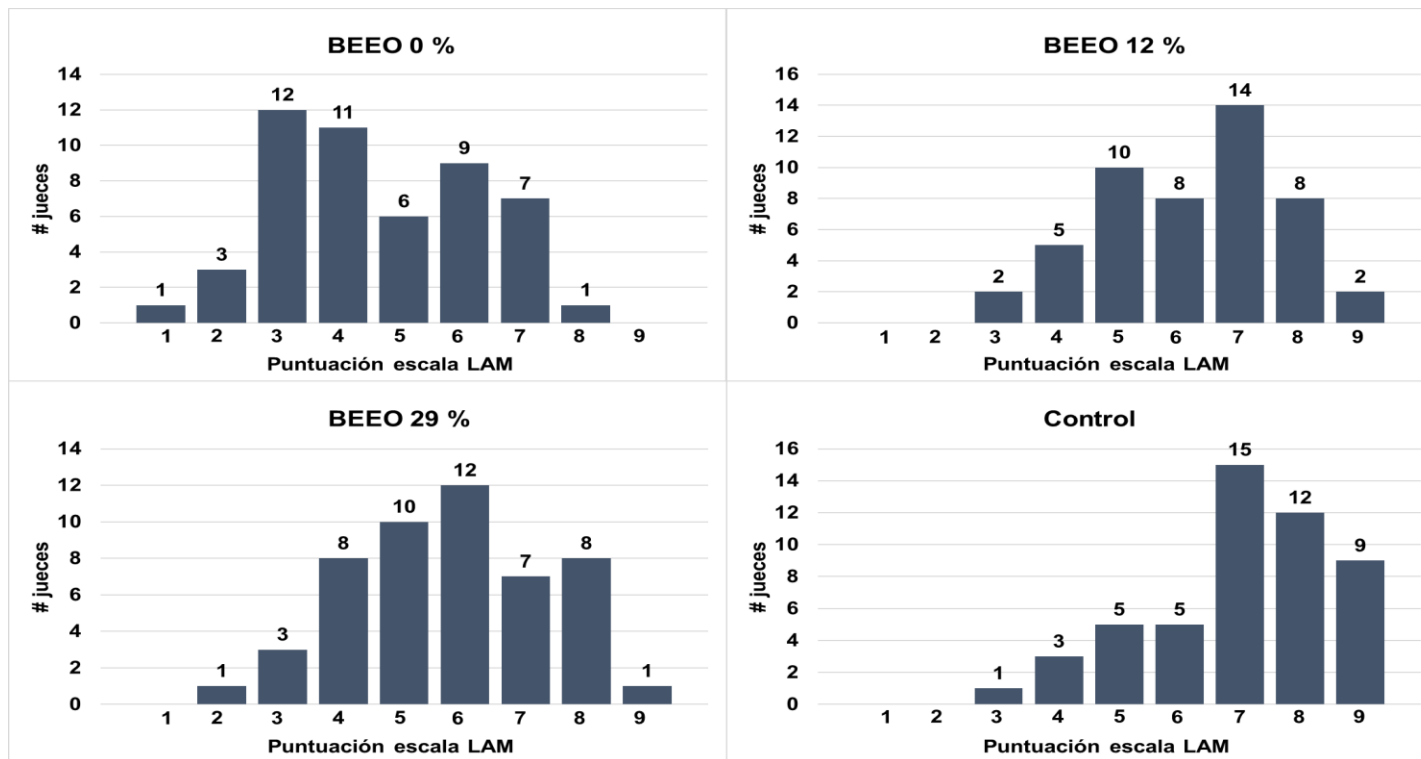


Figura 23. Gráficos de puntuaciones asignadas al atributo de textura en relación con el número de evaluadores. **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón. **1** = Me disgusta extremadamente, **2** = me disgusta mucho, **3** = me disgusta, **4** = me disgusta ligeramente, **5** = no me gusta ni me disgusta, **6** = me gusta ligeramente, **7** = me gusta, **8** = me gusta mucho, **9** = me gusta extremadamente.

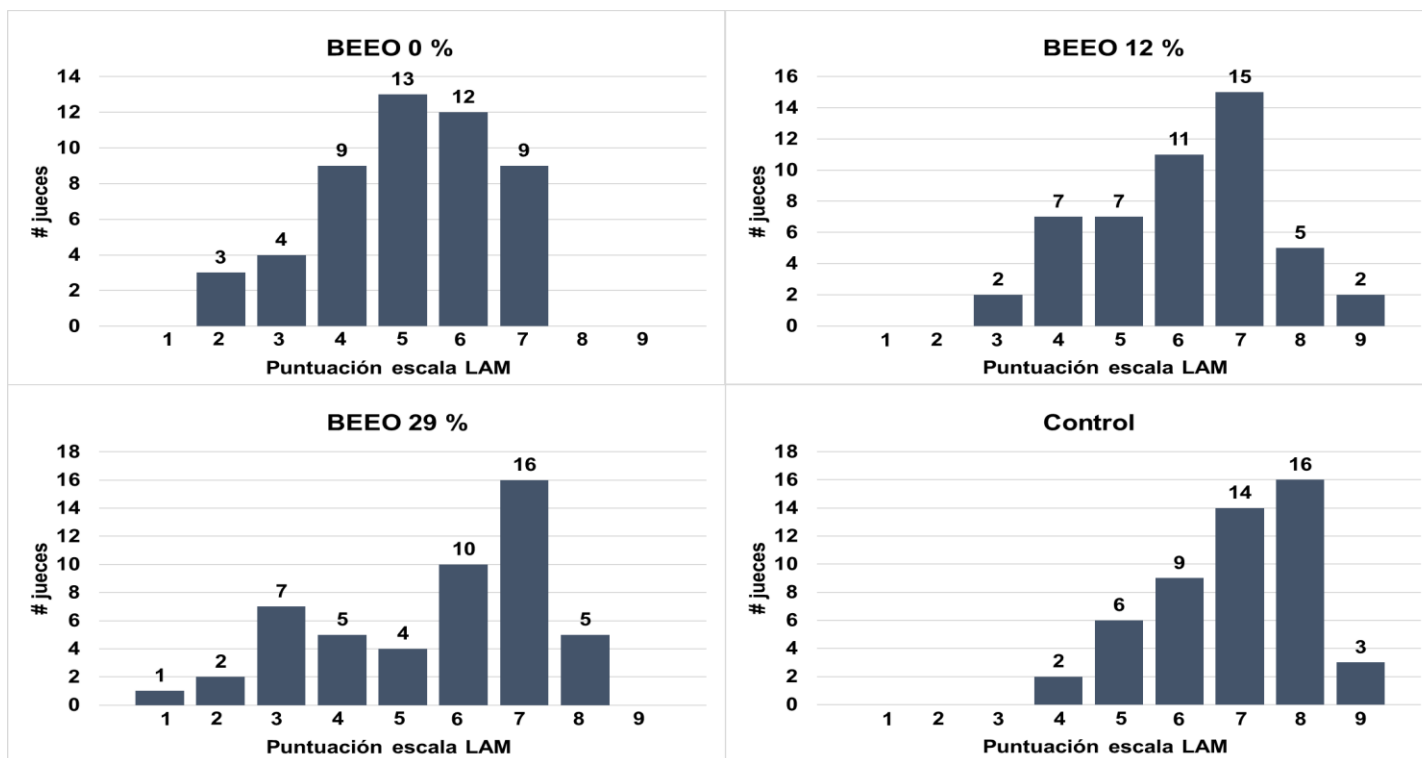


Figura 24. Gráficos de puntuaciones asignadas al atributo de aceptabilidad global en relación con el número de evaluadores. **BEEO 0 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 0 % harina de amaranto, **BEEO 12 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 12.67 % harina de amaranto, **BEEO 29 %** = Botana Extrudida Expandida Optimizada con 29.05 % harina de amaranto, **Control** = botana elaborada con fracciones ricas en almidón. **1** = Me disgusta extremadamente, **2** = me disgusta mucho, **3** = me disgusta, **4** = me disgusta ligeramente, **5** = no me gusta ni me disgusta, **6** = me gusta ligeramente, **7** = me gusta, **8** = me gusta mucho, **9** = me gusta extremadamente.

IX. CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron modelos matemáticos de predicción adecuados y reproducibles ($p < 0.05$, $R^2_{ajustada} > 0.80$, p falta de ajuste > 0.05 , $CV < 10 \%$) para cada una de las variables de respuesta (**IER**, **DA**, **Du**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV**) en función de las variables de proceso (**TE**, **VT** y **HA**).
2. Las combinaciones de variables de proceso óptimas (**TE** = 162 °C, **VT** = 240 rpm, **HA** = 12.67 %; **TE** = 170 °C, **VT** = 240 rpm, **HA** = 29.05 %) permiten obtener botanas con valores mínimos de **DA** y **Du**, y valores máximos de **IER**, **AAox**, **CFT**, **FT** y **DPIV**.
3. Las **BEEO** y la botana **Control** mostraron características físicas (**IER**, **DA** y **Du**) similares, por lo que es posible añadir hasta un 29 % de harina de amaranto sin afectar significativamente las características de calidad sensorial. Asimismo, todas las **BEEO** presentaron valores de crispness y crunchiness más altos que la botana **Control**, lo cual indica que son más crujientes y quebradizas.
4. Las **BEEO** adicionadas con amaranto mostraron propiedades microestructurales similares a las obtenidas por la botana **Control**, por lo que es posible incrementar el contenido de proteína, fibra, minerales y lípidos a través de la inclusión de amaranto mientras se mantienen propiedades morfométricas aceptables.
5. Todas las **BEEO** presentaron mayor **AAox**, **CFT** y **CAT** en comparación a la botana **Control**, mientras que la adición de amaranto permitió incrementar el contenido de **proteínas**, **FT** y **Trp**.
6. La evaluación sensorial mostró que las **BEEO** presentan calificaciones sensoriales aceptables respecto a aceptabilidad textural y global, además que el incremento de

amaranto de 12 a 29 % no afectó significativamente la aceptación sensorial, por lo que es posible elaborar un producto con alto valor nutrimental y antioxidante que pueda competir en el mercado.

X. BIBLIOGRAFÍA

[AACC] American Association of Cereal Chemists. 2010. Approved methods of Analysis, 11th edition: 55 Physical Tests Methods - 55-10.01. St. Paul, Minnesota: Cereals and Grains Association. Disponible de: cerealsgrains.org/resources/Methods. Consultado el 17 de abril de 2023.

[DOF] Diario Oficial de la Federación. 1979. NORMA Oficial Mexicana NOM-F-90-S-1978 Determinación de Fibra Cruda en Alimentos. México, D.F. Disponible de: dof.gob.mx. Consultado el 30 de abril de 2024.

[FAO] Food and Agriculture Organization. FAO y Gobierno Mexicano: Alianza para el fortalecimiento a la Cadena de Valor del Amaranto con 'Un país, un producto prioritario'. Ciudad de México, México. Food and Agriculture Organization. Disponible de: fao.org. Consultado el 23 de julio de 2024.

[ICAMEX] Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal. 2024. *AMARANTO (Amaranthus hypochondriacus L)*. San Lorenzo Coacalco, México. Disponible de icamex.edomex.gob.mx. Consultado el 23 de julio de 2024.

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2023. Banco de Información Económica. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible de: inegi.org.mx. Consultado el 24 de abril de 2023.

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2024. ESTADÍSTICAS DE DEFUNCIONES REGISTRADAS (EDR). Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible de: inegi.org.mx. Consultado el 22 de abril de 2024.

[INIFAP] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pesqueras. 2020.

Maíz azul: coloreando nuestras tradiciones. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pesqueras. Disponible de: gob.mx/inifap. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[INIFAP] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pesqueras. 2017.

Producción Artesanal de Semilla de Maíz Azul en el Estado de México. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pesqueras. Disponible de: gob.mx/inifap. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[ITIS] Integrated Taxonomic Information System - Report. 2011a. *Zea mays* L. Washington

D.C.: U.S. Integrated Taxonomic Information System. Disponible de: itis.gov. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[ITIS] Integrated Taxonomic Information System - Report. 2011b. *Amaranthus* L.

Washington D.C.: U.S. Integrated Taxonomic Information System. Disponible de: itis.gov. Consultado el 30 de marzo de 2023.

[LABDO] Laboratorio de Datos Contra la Obesidad. 2023. Alto consumo de papitas

ultraprocesadas... sin conocer las consecuencias. México: Laboratorio de Datos Contra la Obesidad. Disponible de: labdo.org. Consultado el 23 de julio de 2024.

[PROFECO] Procuraduría Federal del Consumidor. 2013. Las botanas dicen presente en

los eventos deportivos. Ciudad de México: Procuraduría Federal del Consumidor. Disponible de: gob.mx/Profeco. Consultado el 24 de abril de 2023.

[SADER] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2022. El Cultivo del Amaranto en la ciudad de México. Ciudad de México: Representación AGRICULTURA Ciudad de México. Disponible de: gob.mx/agricultura/cdmx. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[SADER] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2023. Razas de maíz, riqueza del campo mexicano. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible de: gob.mx/agricultura. Consultado el 08 de abril de 2023.

[SADER] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2023a. Maíz, cultivo de México. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible de: gob.mx/agricultura. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[SADER] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2023b. Garantizado abasto de amaranto, calabaza y tejocote, ingredientes tradicionales para el Día de Muertos: Agricultura. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible de: gob.mx. Consultado el 23 de julio de 2023.

[SIAP] Servicio de Alimentación Agroalimentaria y Pesquera. 2018. Con los colores del maíz, México se pinta solo. Ciudad de México: Servicio de Alimentación Agroalimentaria y Pesquera. Disponible de: gob.mx/siap. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[USDA] U.S. Department of Agriculture. 2018. Amaranth grain, uncooked. Washington D.C.: U.S. Department of Agriculture. Disponible de: fdc.nal.usda.gov. Consultado el 31 de marzo de 2023.

[USDA] U.S. Department of Agriculture. 2024. Corn Explorer. Washington D.C.: Foreign Agricultural Service U.S. Department of Agriculture. Disponible de: fas.usda.gov. Consultado el 03 de julio de 2024.

[USDA] U.S. Department of Agriculture. 2024. World Agricultural Production. Washington D.C.: Foreign Agricultural Service U.S. Department of Agriculture. Disponible de: fas.usda.gov. Consultado el 23 de julio de 2024.

[WHO] World Health Organization. 2019. Global health estimates: Leading causes of death. Geneva: World Health Organization. Disponible de: who.int. Consultado el 08 de mayo de 2023.

[WSU] Washington State University. 2017. Food Extrusion Processing: An Overview. Washington, Pullman: Washington State University Extension. Disponible de: extension.wsu.edu. Consultado el 20 de marzo de 2023.

Abalone R, Cassinera A, Gastón A, Lara M. 2004. Some Physical Properties of Amaranth Seeds. Biosystems Engineering 89: 109-117.

Abdel E, Hucl P. 1999. A Rapid Method for Quantifying Total Anthocyanins in Blue Aleurone and Purple Pericarp Wheats. Cereal Chemistry 76: 350-354.

Abolaji G, Olooto F, Ogundele D, Williams F. 2017. Nutritional Characterization of Grain Amaranth Grown in Nigeria for Food Security and Healthy Living. Agrosearch 17: 1-10

Abolaji G, Olooto F, Ogundele D, Williams F. 2017. NUTRITIONAL CHARACTERIZATION OF GRAIN AMARANTH GROWN IN NIGERIA FOR FOOD SECURITY AND HEALTHY LIVING. Agrosearch 17: 1-10.

Adom K, Liu R. 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 6182-6187.

Adom K, Sorrells M, Liu R. 2003. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 7825-7834.

Agama E, Salinas Y, Pacheco G, Bello L. 2011. Características Físicas y Químicas de Dos Razas de Maíz Azul: Morfología del Almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 317-329.

Alegbejo J. 2013. NUTRITIONAL VALUE AND UTILIZATION OF AMARANTHUS (AMARANTHUS SPP.) – A REVIEW. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences* 6: 136-143.

AOAC (Association of Analytical Chemists). 1999. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 16^a ed. Gaithersburg: AOAC International. 1904 p.

AOAC (Association of Analytical Chemists). 2005. *Official methods of analysis*. En: Horowitz W (ed). *Official methods of analysis*. 18^a ed. Gaithersburg: AOAC International.

Aune D, Keum N, Giovannucci E, Fadnes L, Bofetta P, Greenwood D, Norat T. 2016. Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *The British Medical Journal* 353: i2716.

Baraniak J, Kania M. 2022. The Dual Nature of Amaranth – Functional Food and Potential Medicine. *Foods* 11: 618.

- Bathla S, Jaidka M, Kaur R. 2019. Nutritive Value. En: Hossain A, editor. Maize. 1^a ed. Herbivores. London: IntechOpen. p 17-40.
- Begum R, Singh A, Mohan S. 2023. Impact of junk food on obesity and polycystic ovarian síndrome: Mechanisms and management strategies. *Obesity Medicine* 40: 100495.
- Biziuk M, Kuczyńska J. 2006. Analytical Implications. En: Szefer P, Nriagu J, editores. Mineral Componentes in Foods. 1^a ed. Boca Ratón: CRC Press. p 1-31.
- Brand W, Cuvelier M, Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology* 28: 25-30.
- Broa E, Vázquez M, Estrella N, Hernández J, Ramírez B, Bahena G. 2019. Physicochemical characteristics and quality of the protein of pigmented native maize from Morelos in two years of cultivation. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 683-697.
- Bunzel M, Ralph J, Steinhart H. Association of non-starch polysaccharides and ferulic acid in grain amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) dietary fiber. *Molecular Nutrition and Food Research* 49: 551-559.
- Cai Y, Sun M, Corke H. 2003. Antioxidant activity of betalains from plants of the amaranthaceae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 2288-2294.
- Campos I, Galván O, Hernández L, Oviedo C, Barquera S. 2023, Prevalencia de obesidad y factores de riesgo asociados en adultos mexicanos: resultados de la Ensanut 2022. *Salud Pública de México* 65: 238-247.
- Cardello A, Schutz H, Leshner L, Merrill E. 2005. Development and testing of a labeled magnitude scale of perceived satiety. *Appetite* 44: 1-13.

- Casey C, Huang Q, Talegawkar S, Sylvetsky A, Satchek J, DiPietro L, Lora K. 2021. Added sugars, saturated fat, and sodium intake from snacks among U.S. adolescents by eating location. *Preventive Medicine Reports* 24: 101630.
- Chauvin M, Younce F, Ross C, Swanson B. 2008. STANDARD SCALES FOR CRISPNESS, CRACKLINESS AND CRUNCHINESS IN DRY AND WET FOODS: RELATIONSHIP WITH ACOUSTICAL DETERMINATIONS. *Journal of Texture Studies* 39: 345-368.
- Choton S, Gupta N, Bandral JD, Anjum N, Choudary A. 2020. Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal* 9: 162-168.
- De Barros C, Leonel M, Mischán M. 2013. Effects of processing on physical properties of extruded snacks with blends of sour cassava starch and flaxseed flour. *Food and Science Technology* 33: 404-410.
- De la Parra C, Saldivar S, Liu R. 2007. Effect of Processing on the Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Corn for Production of Masa, Tortillas, and Tortilla Chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55: 4177-4183.
- De la Vara S, Domínguez D. 2002. Métodos de superficie de respuesta; un estudio comparativo. *Revista de Matemáticas, Teoría y Aplicación* 1: 47-65.
- Del Pozo D, Brenes C, Serna S, Talcott S. 2006. Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products. *Food Research International* 39: 696-703.
- Dewanto V, Wu X, Liu R. 2002. Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 4959-4964.

Ek P, Ganjyal GM. 2020. Basics of extrusion processing. En: Ganjyal GM, editor. Extrusion Cooking: Cereal Grains Processing. 2a ed. Massachusetts: Woodhead Publishing. p 1-28.

Escalante A, Ramírez B, Torres P, López J, Figueroa J, Barrón J, Morales I, Ponce N, Gutiérrez R. 2014. Obtaining Ready-to-Eat Blue Corn Expanded Snacks With Anthocyanins Using Extrusion Process and Response Surface Methodology. *Molecules* 19: 21066-21084.

Espinosa R, Dorantes L, Gutiérrez R, García E, Sánchez L, Perea M, Ceballos G, Ortiz A. 2016. Morpho-structural description of unripe and ripe avocado pericarp (*Persea americana* Mill var. *drymifolia*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15: 469-480.

Espinoza R, Reyes C, Milán J, López J, Paredes O, Gutiérrez R. 2016. Healthy Ready-to-Eat Expanded Snack with High Nutritional and Antioxidant Value Produced from Whole Amarantin Transgenic Maize and Black Common Bean. *Plant Foods for Human Nutrition* 71: 218-224.

Félix J, Gutiérrez R, López J, López G, Quintero M, Perales J, Montes J. 2021. Nutritional, antioxidant and phytochemical characterization of healthy ready-to-eat expanded snack produced from maize/common bean mixture by extrusion. *LWT - Food Science and Technology* 142: 111053.

Félix J, Montes J, Reyes C, Perales J, Gómez M, Aguilar E, Gutiérrez R. 2020. Second-generation snacks with high nutritional and antioxidant value produced by an optimized extrusion process from corn/common bean flours mixtures. *LWT - Food Science and Technology* 124: 109172.

- Gajewska R, Lebedzińska A, Malinowska E, Szefer P. 2002. Evaluation of qualitative properties of amaranth (*Amaranthus*). *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny* 53: 141-147.
- Gandhi N, Kaur K, Kaur A, Singh B, Singh P. 2016. Technological Innovations in Third Generation Snack Foods. *Progressive Research – An International Journal* 11: 4948-4959.
- García E, Gutiérrez G. 2022. Fractal Microstructure of Foods. *Food Engineering Reviews* 14: 1 - 19.
- García J, García E, Ramírez S, Álvarez P, Flores A, Camposeco N. 2023. Nutritional and nutraceutical changes in blue corn (*Zea mays*) stored at different temperatures. *Cogent Food and Agriculture* 9: 2218630.
- García J, Ruiz N, Flores A, Camposeco N, Ramirez S. 2022. Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de genotipos de maíz pigmentado (azul/morado). *Temas de Ciencia y Tecnología* 26: 13-19.
- García S, Chuck C, Serna S. 2019. Development and Structure of the Corn Kernel. En: Serna S, editor. *Corn: Chemistry and Technology*. 3ª ed. Duxford: Woodhead Publishing and AACC International Press. p 147-163.
- Gogoi P, Sharma P, Mahajan A, Goudar G, Kumar A, Sreedhar M, Singh M, Longvah T. 2022. Exploring the nutritional potential, anti-nutritional components and carbohydrate fractions of Indian pigmented maize. *Food Chemistry Advances* 2: 100176.
- Gómez M, Reyes C, Milán J, Partida R, Espinoza R, Preciado R, Gutiérrez R. 2021. Gluten-free healthy snack with high nutritional and nutraceutical value elaborated from a

mixture of extruded underutilized grains (quality protein maize/tepyary bean). *Acta Universitaria* 31: e3024.

Gujska E, Khan K. 1990. Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science* 55: 466-469.

Guzmán R, Alarcón E, García O, Chávez J, Alarcón T. 2017. Chemical, Antioxidant, and Cytotoxic Properties of Native Blue Corn Extract. En: Badria F, editor. *Natural Products and Cancer Drug Discovery*. 1ª ed. Herbivores. London: IntechOpen. p 67-77.

Herrera M, Cruz C, Trujillo C, Rodríguez M, García H, Chávez J, Oliart R, Guzmán R. 2017. Antioxidant and antiproliferative activity of blue corn and tortilla from native maize. *Chemistry Central Journal* 11: 110.

Hess J, Jonnalagadda S, Slavin J. 2016. What Is a Snack, Why Do We Snack, and How Can We Choose Better Snacks? A Review of the Definitions of Snacking, Motivations to Snack, Contributions to Dietary Intake, and Recommendations for Improvement. *Advances in Nutrition* 7: 466-475.

Huanatico E, Calla M, Arisaca A, Zavaleta Percy, Quispe A, Quispe E. 2021. Propiedades físico-químicas y digestibilidad in vitro de mezclas alimenticias de cultivos andinos y cereales extruidos. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria* 51: 199-210.

Ilo S, Schoenlechner R, Berghofe E. 2000. Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites* 51: 97-110.

Jaimez J, Ramírez J, Añorve J, Castañeda A, González L, Contreras E. 2016.

EVALUACIÓN SENSORIAL DE BOTANAS SABOR NARANJA Y ZANAHORIA

EXTRUDIDAS Y EXPANDIDAS CON AIRE CALIENTE. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos 1: 480-485.

Juan R, Pastor J, Alaiz M, Megías C, Vloque J. 2007. Caracterización proteica de las semillas de once especies de amaranto. Grasas y Aceites 58: 49-55.

Karamac M, Gai F, Longato E, Meineri G, Janiak M, Amarowicz R, Peiretti P. 2019. Antioxidant Activity and Phenolic Composition of Amaranth (*Amaranthus caudatus*) during Plant Growth. Antioxidants 8: 173.

Keramat S, Alam K, Rana R, Chowdhury R, Farjana F, Hashmi R, Gow K, Biddle S. 2021. Obesity and the risk of developing chronic diseases in middle-aged and older adults: Findings from an Australian longitudinal population survey. PLOS ONE 16: e0260158.

Khan P, Wang H, Gao W, Huang F, Khan N, Shakoor N. Effects of micro-nano bubble with CO₂ treated water on the growth of Amaranth green (*Amaranthus viridis*). Environmental Science and Pollution Research 29: 72033-72044.

Khanam U, Oba S. 2013. Bioactive substances in leaves of two amaranth species, *Amaranthus tricolor* and *A. hypochondriacus*. Canadian Journal of Plant Science 93: 47-58.

Kumar V, Sinha A, Makkar H, Becker K. 2010. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review. Food Chemistry 120: 945-959.

León J, Gutiérrez R, Reynoso R, Milán J, Perales J, Cuevas E, Reyes C. 2021. TORTILLAS MADE WITH EXTRUDED FLOURS OF BLUE MAIZE AND CHÍA SEEDS AS AN NUTRITIOUS AND NUTRACEUTICAL FOOD OPTION. Agrociencia 55: 487-506.

- Leonard W, Zhang P, Ying D, Fang Z. 2019. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 19: 218-246.
- Li Z, Zhao X, Zhang X, Liu H. 2022. The Effects of Processing on Bioactive Compounds and Biological Activities of Sorghum Grains. *Molecules* 27: 3246.
- Liu R. 2007. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science* 46: 207-219.
- Liu R. 2013. Dietary bioactive compounds and their health implications. *Journal of Food Science* 78: A18-A25.
- Luna D, Li Q, West L, West M, de Mejia E. 2017. Anthocyanin condensed forms do not affect color or chemical stability of purple corn pericarp extracts stored under different pHs. *Food Chemistry* 232: 639-647.
- Martin A, Osen R, Karbstein H, Emin M. 2021. Impact of Rapeseed Press Cake on the Rheological Properties and Expansion Dynamics of Extruded Maize Starch. *Foods* 10: 316.
- Matlu C, Arslan S, Candal C, Kilic O, Erbas M. 2018. Physicochemical, Thermal, and Sensory Properties of Blue Corn (*Zea Mays* L.). *Journal of Food Science* 83: 53-59.
- Milán J, Gutiérrez R, Cuevas E, Sánchez L, Rochín J, Reyes C. 2017. Functional beverage produced with bioprocessed blue corn and black beans with antihypertensive and antidiabetic potential. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40: 451-459.

- Milán J, Reyes C, Camacho I, Rouzaud O. 2002. Optimization of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L.) into a useful product. *Journal of Science of Food and Agriculture* 82: 1718-1728.
- Montoya A, Osuna E, Cabrera F, Milán J, Reyes C, Milán E, Cuevas E, Mora S. 2020. Evaluation of the in vitro and in vivo antihypertensive effect and antioxidant activity of blue corn hydrolysates derived from wet-milling. *Biotecnia* 22: 155-162.
- Moreno Y, Sánchez G, Hernández D, Lobato N. Characterization of anthocyanin extracts from maize kernels. *Journal of Chromatographic Science* 43: 483-487.
- Myers S. 1977. Determinants of corporate borrowing. *Journal of Financial Economics* 5: 147-175.
- Nankar A, Grant L, Scoot P, Pratt R. 2016. Agronomic and Kernel Compositional Traits of Blue Maize Landraces from the Southwestern United States. *Crop Science* 56: 2663-2674.
- Navarro R, Gómez C, Aguilar E, Delgado E, Castro J, Hernández J, Solís A, Ochoa L, Medrano H. 2016. Blue corn (*Zea mays* L.) with added orange (*Citrus sinensis*) fruit bagasse: novel ingredients for extruded snacks. *CYTA - Journal of Food* 14: 349-258.
- Neder D, Quintero A, Meléndez C, Zazueta J, Paraguay F, Ruiz M. 2021. Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *LWT - Food Science and Technology* 146: 111414.

- Nikinmaa M, Zehnder O, Nystrom L, Sozer N. 2023. Effect of extrusion processing parameters on structure, texture and dietary fibre composition of directly expanded wholegrain oat-based matrices. *LWT - Food Science and Technology* 184: 114972.
- Ostermier R, Hill K, Topfl S, Jager H. 2020. Pulsed electric field as a sustainable tool for the production of healthy snacks. En: Barba F, Parniakov O, Wiktor A. Editores. *Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food For Tomorrow*. London: Elsevier. p 103-128.
- Oteri M, Gresta F, Costale A, Lo Presti V, Meineri G, Chiofalo B. 2021. *Amaranthus hypochondriacus* L. as a Sustainable Source of Nutrients and Bioactive Compounds for Animal Feeding. *Antioxidants* 10: 876.
- Park J, Rhee K, Kim B, Rhee K. 1993. Single-screw extrusion of defatted soy flour, corn starch and raw beef blends. *Journal of Food Science* 58: 9-19.
- Paśko P, Bartoń H, Zagrodzki P, Chłopicka J, Iżewska A, Gawlik M, Gawlik M, Gorinstein S. 2011. Effect of amaranth seeds in diet on oxidative status in plasma and selected tissues of high fructose-fed rats. *Food Chemistry* 126: 85-90.
- Paśko P, Bartoń H, Zagrodzki P, Gorinstein S, Fołta M, Zachwieja Z. 2009. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food Chemistry* 115: 994-998.
- Pasko P, Sajewicz M, Gorinstein S, Zachwieja Z. 2008. Analysis of selected phenolic acids and flavonoids in *Amaranthus cruentus* and *Chenopodium quinoa* seeds and sprouts by HPLC. *Acta Chromatographica* 20: 661-672.

- Pedersen B, Bach Knudsen K, Eggum B. 1990. The nutritive value of amaranth grain (*A. caudatus*). III. Energy and fibre of raw and processed grain. *Plant Foods for Human Nutrition* 40: 61 - 71.
- Peh H, Tan W, Liao W, Wong W. 2016. Vitamin E therapy beyond cancer: tocopherol versus tocotrienol. *Pharmacology and Therapeutics* 162: 152-169.
- Perales J, Reyes C, Gómez M, Milán J, Cuevas E, Valdez A, Gutiérrez R. 2014. Increasing the Antioxidant Activity, Total Phenolic and Flavonoid Contents by Optimizing the Germination Conditions of Amaranth Seeds. *Plant Foods for Human Nutrition* 69: 196-202.
- Písaříková B, Zralý Z, Kráčmar S, Trčková M, Herzig I. 2005. Nutritional value of amaranth (genus *Amaranthus* L.) grain in diets for broiler chickens. *Czech Journal of Animal Science* 50: 568-573.
- Rangel E, Sesma L, Valverde M, González L, Escobedo D, Aguilar M. 2021. Does amaranth have the agronomic potential to be a global phenomenon like quinoa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12: 1459-1471.
- Rathod R, Annapure U. 2016. Effect of extrusion process on antinutritional factors and protein and starch digestibility of lentil splits. *LWT-Food Science and Technology*, 66: 114-123.
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine* 26: 1231-1237.

- Repo R, Hellström J, Pihlava J, Mattila P. 2010. Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry* 120: 128-133.
- Reyes C, Milán J, Rouzaud O, Garzón JA, Mora R. 2002. Descascarillado/suavisación/extrusión (DSE): alternativa tecnológica para mejorar la calidad nutricional del garbanzo la calidad nutricional del garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Agrociencia* 36: 181-189.
- Ríaz M. 2016. Snack Foods, Processing. Reference Module in Food Sciences 3: 98-108.
- Rosentrater K, Evers A. 2018. Introduction to cereals and pseudocereals and their production. En: Rosentrater K, Evers A, editores. *Kent's Technology of Cereals*. 5ª ed. Duxford: Elsevier. p 1-76.
- Safaei K, Yang W. 2016. Effects of Grain Processing with Focus on Grinding and Steam-Flaking on Dairy Cow Performance. En: Shields V, editor. *Herbivores*. London: IntechOpen. p 117-131.
- Sánchez Y, Zermeño M, Vázquez O, Kuño K, Villarruel A. 2024. Bioactive Compounds from Pigmented Corn (*Zea mays* L.) and Their Effect on Health. *Biomolecules* 14: 338.
- Santos G, Miralles B, Brodkorb A, Dupont D, Egger L, Recio I. 2024. Current advances for in vitro protein digestibility. *Frontier in Nutrition* 11: 1404538.
- Sarker U, Hossain M, Oba S. 2020. Nutritional and antioxidant components and antioxidant capacity in green morph *Amaranthus* leafy vegetable. *Science Reports* 10: 1336.
- Saunders J, Smith T. 2010. Malnutrition: causes and consequences. *Clinical Medicine* 10: 624-627.

- Schoenlechner R, Siebenhandl S, Berghofer E. 2008. Pseudocereals. En: Arendt E, Bello F, editores. *Gluten-Free Cereal Products and Beverages*. 1ª ed. San Diego: Elsevier. p 149-190.
- Scott C, Eldridge A. 2005. Comparison of carotenoid content in fresh, frozen and canned corn. *Journal of Food Composition and Analysis* 18: 551-559.
- Serna S. 2010. Grain Development, Morphology and Structure. En: Serna S, editor. *Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. 1ª ed. Boca Ratón: CRC Press. p 43-81.
- Shah F, Sharif M, Bashir S, Ahsan F. 2018. Role of Healthy Extruded Snacks to Mitigate Malnutrition. *Food Reviews International* 35: 299-323.
- Shamah T, Gaona T, Cueva L, Morales, Valenzuela D, Méndez I, Ávila M. 2023. Prevalencias de sobrepeso y obesidad en población escolar y adolescente de México. *Ensanut Continua 2020-2022. Salud Pública de México* 65: 218-224.
- Shelar GA, Gaikwad ST. 2019. Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal* 8: 562-568.
- Sheng S, Li T, Liu R. 2018. Corn phytochemicals and their health benefits. *Food Science and Human Wellness* 7: 185-195.
- Shimamura T, Sumikura Y, Yamazaki T, Tada A, Kashiwagi T, Ishikawa H, Matsui T, Sugimoto N, Akiyama H, Ukeda H. 2014. Applicability of the DPPH Assay for Evaluating the Antioxidant Capacity of Food Additives - Inter-laboratory Evaluation Study -. *Analytical Sciences* 30: 717-721.

- Sidorova Y, Petrov N, Perova I, Kolobanov A, Zorin S. 2023. Physical and Chemical Characterization and Bioavailability Evaluation In Vivo of Amaranth Protein Concentrate. *Foods* 12: 1728.
- Singh A, Punia D. 2020. Characterization and Nutritive Values of Amaranth Seeds. *Current Journal of Applied Science and Technology* 39: 27-33.
- Singleton V, Orthofer R, Lamuele R. 1999. Analysis of total Phenols and other oxidation substrates and antioxidant by means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in enzymology* 299: 152-165.
- Slavin J. 2000. Mechanisms for the impact of whole grain foods on cancer risk. *Journal of the American College of Nutrition* 19: 300S-307S.
- Somavat P, Li Q, de Mejia E, Liu W, Singh V. 2016. Coproduct yield comparisons of purple, blue and yellow dent corn for various milling processes. *Industrial Crops and Products* 87: 266-272.
- Soriano M, Arias I, Carrillo J, Rosas D. 2018. Nutritional functional value and therapeutic utilization of Amaranth. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research* 7: 596-600.
- Statista. 2022. Production of Amaranth in Mexico from 2012 to 2021. New York: Statista Inc. Disponible de: [statista.com](https://www.statista.com). Consultado el 31 de marzo de 2023.
- Steffensen S, Rinna Å, Mortensen A, Laursen B, de Troiani R, Noellemeyer E, Janovska D, Dusek K, Délano J, Taberner A, Christophersen C, Fomsgaard I. 2011. Variations in the polyphenol content of seed of field grown *Amaranthus* genotypes. *Food Chemistry* 129: 131-138.

- Tang Y, Li X, Chen P, Zhang B, Liu R, Hernandez M, Draves J, Marcone M, Tsao R. 2016. Assessing the Fatty Acids, Carotenoid, and Tocopherol Compositions of Amaranth and Quinoa Seeds Grown in Ontario and Their Overall Contribution to Nutritional Quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 64: 1103-1110.
- Tang Y, Tsao R. 2017. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: a review. *Molecular Nutrition and Food Research* 61: 1600767.
- Tapia M, Alzamora S, Chirife J. 2020. Effects of Water Activity (a_w) on Microbial Stability as a Hurdle in Food Preservation. En: Barbosa G, Fontana A, Schmidt S, Labuza T, editores. *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. 2^a ed. Iowa: Blackwell Publishing. p 323-355.
- Tighe P, Duthie G, Vaughan N, Brittenden J, Simpson W, Duthie S, Mutch W, Wahle K, Hogan G, Thies F. 2010. Effect on increased consumption of whole-grain foods on blood pressure and other cardiovascular risk markers in healthy middle-aged persons: a randomized controlled trial. *The American Journal of Clinical Nutrition* 92: 733-740.
- Trujillo G, Rojas C, García S, Verdolotti L, Di Maio E, Iannace S. 2015. Thermoplastic Processing of Blue Maize and White Sorghum Flours to Produce Bioplastics. *Journal of Polymers and the Environment* 23: 72-82.
- Uriarte P, Cuevas E, Gutiérrez R, Mora S, Reyes C, Puangpraphant S, Milán J. 2015. Physical, Compositional, and Wet-Milling Characteristics of Mexican Blue Maize (*Zea Mays* L.) Landrace. *Cereal Chemistry* 92: 491-496.

- Urias D, Basilio J, Valdez J, Muy D, Serna S, García S. 2015. Physical Properties and Chemical Characterization of Macro- and Micro-Nutriments of Elite Blue Maize Hybrids (*Zea Mays* L.). *Cereal Research Communications* 1: 1-12.
- Valenzuela J, García E, Pacheco R, Gutiérrez R, Mazmorra M, Muy M. 2018. Relationships between morphometrical properties and the texture of an extrusion-expanded snack made from squid mantle (*Dosidicus gigas*). *Journal of Texture Studies* 49: 476-484.
- Van E, Allaf K, Bouvier J. 1998. Texture and Structure of Crispy-Puffed Food Products Part II: Mechanical Properties in Puncture. *Journal of Texture Studies* 29:617-632.
- Vargas W, Piñeda L, Santaella L. 2006. SURFACE ROUGHNESS AND TEXTURE: EXPERIMENTS AND SIMULATIONS. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 16: 54-63.
- Venskutonis P, Kraujalis P. 2013. Nutritional Components of Amaranth Seeds and Vegetables: A Review on Composition, Properties, and Uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12: 381-412.
- Wang W, Klopfenstein C, Ponte J. 1993. Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry* 70: 707-711.
- Wani SA, Kumar P. 2015. Effect of extrusion on the nutritional, antioxidant and microstructural characteristics of nutritionally enriched snacks. *Journal of Food Processing and Preservation* 40: 166-173.
- Watson S. 2003. Description, development, structure, and composition of the corn kernel. En: White P, Johnson L, editores. *Corn: Chemistry and Technology*. 2a ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists. p 69-106.

Wu T, Guo Z, Zhang M, Yang L, Liu R, Yin J. 2017. Anthocyanins in black rice, soybean and purple corn increase fecal butyric acid and prevent liver inflammation in high fat diet-induced obese mice. *Food and Function* 8: 3178-3186.

Zhang B, Zhao Q, Guo W, Bao W, Wang X. 2017. Association of whole grain intake with all-cause, cardiovascular, and cancer mortality: a systematic review and dose-response meta-analysis from prospective cohort studies. *European Journal of Clinical Nutrition* 72: 57-65.

Zhang X, Shi J, Fu Y, Zhang T, Jiang L, Sui X. 2023. Structural, nutritional, and functional properties of amaranth protein and its application in the food industry: A review. *Sustainable* 1: 45-55.

Zhishen J, Mengcheng T, Jianming W. 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects con superoxide radicals. *Food Chemistry* 64: 555-559.