



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico-Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Desarrollo de una Botana Saludable a Partir de Maíz azul
(*Zea mays* L) y Chía (*Salvia hispanica* L).**

TESIS

Que presenta

IQ. Martín Castro López

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencia

y

Tecnología de Alimentos

Directores de Tesis

Dr. Roberto Gutiérrez Dorado

Dra. Evangelina García Armenta

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de investigación titulado “Desarrollo de una Botana Saludable a Partir de Maíz azul (*Zea mays* L) y Chía (*Salvia hispánica* L)”, se llevó a cabo en los Laboratorios de “Bioprocesos y Alimentos Funcionales”, “Nutracéuticos” y de “Química y Productos Naturales”, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Los C Dr. Roberto Gutiérrez Dorado y Dra. Evangelina García Armenta participaron como Directores de Tesis; la C Dra. Janitzio Xiomara Korina Perales Sánchez participó como Asesor Académico. Para la realización de la investigación se obtuvo financiamiento a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI), Universidad Autónoma de Sinaloa (Convocatoria 2016). El IQ. Martín Castro López recibió “Beca de Estudios para maestría” del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) durante la realización de la mencionada investigación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán Sinaloa el día 30 del mes enero del año 2019, el (la) que suscribe **IQ. Martín Castro López** alumno (a) del Programa de **Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos** con número de cuenta **0710537-1**, de la Unidad Académica **Facultad de Ciencias Químico Biológicas**, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado, Dra. Evangelina García Armenta** y cede los derechos del trabajo titulado **“DESARROLLO DE UNA BOTANA SALUDABLE A PARTIR DE MAÍZ AZUL (*Zea mays* L) Y CHÍA (*Salvia hispanica* L)”**, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Martín Castro López
IQ. Martín Castro López

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por las muchas bendiciones recibidas y por proporcionarme los medios para cumplir con esta meta de mi vida. A mis padres **Olga Elena López y Martin Castro**, por impulsarme y apoyarme en cada etapa de mi vida y por ser mi guía en las decisiones que he tomado, por enseñarme que la educación, trabajo, dedicación, valores y las buenas creencias forman buenas personas, gracias por su amor, dedicación, paciencia y bondad siempre brindada. A mi hermana **Heidy Margarita** por apoyarme y darme ánimos para seguir adelante día a día, así como curarme cuando estaba enfermo.

A los doctores que estuvieron a lo largo de esta investigación, ya que sin ellos no hubiese podido realizar este trabajo, especialmente al **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado** por confiar en mí en un principio y aceptarme como parte de su equipo de trabajo y compartir todos sus conocimientos, tiempo amistad, confianza y sus consejos.

A la **Dra. Evangelina García Armenta** por siempre apoyarme y asesorarme en mis dudas e instruirme con su paciencia y dedicación, además de brindarme su amistad y apoyo. Muchas gracias.

A mis amigos y compañeros de la MCTA Generación 2016-2018: **Jordi, Fernanda, Yazmín, Yudith, Maribel, Cynthia, Demis, Aliette, Carlos, Carolina, Samuel, Julio, Yessenia y Santos**, por haber compartido muchas experiencias juntos, brindarme su amistad, apoyo y confianza, que sin duda siempre recordare con mucho cariño.

A mis compañeros del Laboratorio #20 **Denisse, Fernando (Melquiades), Daniel, Mario, Jennifer, Alondra, Kathia, Fernanda, Yazmín y Demis**, gracias por darme su

apoyo incondicional, ayudarme en mis dudas y brindarme sus conocimientos y amistad.

A la **Dra. Xiomara Perales** por siempre brindarme su apoyo, sus conocimientos, sus consejos y por todos los reactivos que me proporciono para este trabajo.

A los profesores de la MCTA, quienes brindaron sus enseñanzas para formar los conocimientos adquiridos y empleados en esta investigación.

A mi novia **Yazmín Alejandra** por darme todo su apoyo y comprensión en esos días de estrés y estudio, por impulsarme y motivarme a seguir adelante y siempre dar lo mejor de mí.

A la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa**, así mismo a la **Maestría en Ciencia y Tecnología en Alimentos** por abrirme sus puertas y aceptarme en este gran programa, por permitirme formarme como profesional dentro de sus instalaciones.

INDICE GENERAL

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	4
III. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	7
A. MAÍZ (<i>Zea mays</i> L)	7
1. Origen	7
2. Taxonomía	8
3. Estructura del grano	8
4. Razas de maíz en México	11
5. Maíces nativos de Sinaloa	13
6. Maíz azul	16
7. Maíces azules en México	17
8. Producción de maíz azul	19
9. Composición química del grano	23
10. Valor nutricional	30
11. Fotoquímicos del maíz azul	31
12. Propiedades nutraceuticas	37
13. Actividad antioxidante	37
14. Actividad anticarcinogénica	42
15. Otras propiedades	44
B. CHIA (<i>Salvia hispánica</i> L)	46
1. Características generales	49
2. Estadísticas de producción	53
3. Composición química y aspectos nutricionales de la semilla	53

4. Propiedades nutraceuticas de la semilla	57
1. Extrusión	59
2. Proceso de extrusión	59
3. Componentes de un extrusor	61
4. Clasificación de los extrusores	64
5. Cambios en los componentes de los alimentos durante el proceso de extrusión	66
6. Producción de botanas por extrusión	71
D. ALIMENTOS BOTANA	72
1. Aspectos generales	72
2. Producción y consumo	73
3. Clasificación	76
4. Elaboración de botanas saludables	77
IV. JUSTIFICACIÓN	79
V. HIPÓTESIS	80
VI. OBJETIVOS	81
A. OBJETIVO GENERAL	81
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	81
VII. MATERIALES Y METODOS	82
A. MATERIALES	82
B. METODOS	82
1. Características físicas/fisicoquímicas y composición química de las semillas de maíz azul y chía	82

2. Características fisicoquímicas	83
3. Obtención de condiciones óptimas de extrusión para producir botana extrudida expandida optimizada (BEEO) a partir de maíz azul y chía	86
4. Medición de variables de respuesta	89
5. Análisis de varianza y regresión	91
6. Optimización del proceso de extrusión para conocer las mejores condiciones de procesamiento para elaborar una botana extrudida expandida optimizada (BEEO) de maíz azul y chía, con índice de expansión, actividad antioxidante, contenido de antocianinas altos y valores mínimos de Dureza.	91
7. Obtención de la botana extrudida expandida optimizada (BEEO)	92
8. Características físicas, de textura y morfométricas de la BEEO	92
9. Propiedades morfométricas	94
10. Composición química de la BEEO	96
11. Propiedades fisicoquímicas de la BEEO	99
12. Capacidad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos	100
13. Evaluación sensorial de la BEEO	103
14. Análisis estadístico	103
VIII. RESULTADOS Y DISCUSION	104
A. Características físicas de granos de maíz azul y chía	104
B. Mejor combinación de humedad de alimentación / temperatura de extrusión / velocidad de tornillo para producir una botana extrudida expandida optimizada de maíz azul y chía (BEEO) con valores máximos de IE, AAox, CAT y valores mínimos DE Du.	104

1. Modelos de predicción para las variables de respuesta	107
1. Optimización del proceso de extrusión para la obtención de BEEO de maíz azul y chía	116
2. Composición química y propiedades fisicoquímicas de las mezclas de harina de maíz azul (HMA) y chía (HCH) crudas y de las BEEO.	118
3. Actividad antioxidante de las mezclas de harina de maíz azul (HMA) y chía (HCH) crudas y de las BEEO.	120
4. Propiedades físicas, morfométricas y de textura de las BEEO.	124
IX. CONCLUSIONES	137
X. BIBLIOGRAFIA	139
XI. ABREVIATURAS	153

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Estructura del grano de maíz (<i>Zea mays</i> L)	9
2	Colores del grano completo y cada uno de sus componentes	18
3	Superficie sembrada con otros colores de maíz	21
4	Principales estados productores de maíz en México	22
5	Antocianidinas más comunes en flores y frutos	34
6	Estructura de antocianinas.	35
7	Plántulas e inflorescencias de <i>Salvia hispánica</i> L	51
8	Semillas de chía (<i>Salvia hispánica</i> L)	52
9	Extrusor de tornillo simple	63
10	Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación y velocidad de tornillo (HA, VT) sobre el índice de expansión (IE) de las botanas extrudidas expandidas (BEE)	110
11	Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación, temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (HA, TE, VT) sobre la dureza (Du) de las botanas extrudidas expandidas (BEE)	112
12	Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación, temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (HA, TE, VT) sobre la actividad antioxidante (AAox) de las botanas extrudidas expandidas (BEE)	113
13	Graficas de superficie que muestran el efecto de la temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (TE, VT) sobre	115

	el contenido de antocianinas totales (CAT) de las botanas extrudidas expandidas (BEE)	
14	Gráfico de deseabilidad global de las variables de respuesta para la optimización del proceso de extrusión para la obtención de una botana extrudida expandida optimizada (BEEO) de maíz azul y chía	117
15	Índice de expansión de las BEEO a) BEEO 0 %, b) BEEO 10 %, c) BEEO 20 % y d) BEEO 30 %	126
16	Microfotografías que muestran la estructura interna de las BEEO. a) BEEO 0 %, b) BEEO 10 %, c) BEEO 20 % y d) BEEO 30 %	131
17	Escala hedónica de 11 puntos (1=Máximo valor de desagrado imaginable, 11= Máximo valor de agrado imaginable) para el atributo de textura de las BEEO	134
18	Análisis de frecuencia de la aceptabilidad global de los evaluadores, en el análisis sensorial de los productos extrudidos de maíz azul y chía (BEEO) y botana comercial (BC)	135

ÍNDICE DE CUADROS

1	Composición química del grano de maíz azul	24
2	Fracciones proteínicas en el grano de maíz común	29
3	Principales compuestos fenólicos en frutos y granos	32
4	Principales categorías de nutraceuticos asociados a maíces criollos	41
5	Evolución de la producción de chía en México	54
6	Distribución de producción de chía en México durante el ciclo primavera-verano de 2015	55
7	Composición de semillas de chía	56
8	Distribución de botanas por categoría	75
9	Características físicas de los granos maíz azul y chía	105
10	Combinacion ¹ de (HA), (TE) y (VT) para la producción de (BEE) y resultados experimentales para las variables de respuesta	106
11	Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción)	108
12	Composición química y propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul (HMA) y chía (HCH) y de botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEE0) de maíz azul y chía	119

13	Actividad antioxidante de harinas de maíz azul y chía (mezclas optimizadas) y de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO)	121
14	Propiedades físicas, morfométricas y de textura de botanas extrudidas expandidas optimizadas (BEEO) de maíz azul y chía	125

I. RESUMEN

El sobrepeso y la obesidad en México se han convertido en un problema de carácter epidemiológico, a consecuencia de una alimentación desequilibrada con altos contenidos en sal, carbohidratos y grasas principalmente. La mayoría de las botanas o snacks tienen un bajo valor nutricional, ya que por lo general son fritas y no contienen proteínas y/o fibras. En la actualidad existen diversas tecnologías en la industria alimentaria que nos permiten obtener productos saludables con un alto valor nutricional como es el caso la extrusión-cocción, la cual es una importante tecnología de procesamiento en la industria alimentaria y está considerada como un proceso de manufactura muy eficiente. Los extrusores para procesamiento de alimentos proporcionan la energía termomecánica y mecánica necesaria para provocar cambios fisicoquímicos en materiales crudos con un mezclado intenso por la dispersión y homogenización de los ingredientes. Los alimentos que son comúnmente extrudidos están compuestos principalmente de cereales, almidones, y/o proteínas vegetales. El principal papel de estos ingredientes es proporcionar estructura, textura, sabor, densidad y muchas otras características deseadas, muy específicas, en los productos finales. La aceptación por los consumidores de los productos extrudidos se debe principalmente a la conveniencia, valor, apariencia atractiva y textura encontrada particularmente en estos alimentos, especialmente cuando se refiere a alimentos tipo botana.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la mejor combinación de variables del proceso de extrusión para producir una botana extrudida expandida

saludable, con valor nutricional / nutracéutico alto, sensorialmente aceptable, a partir de una mezcla de maíz azul (Ma) y chía (Ch).

Para la obtención de la botana extrudida expandida optimizada (**BEEO**) se aplicó un diseño experimental central compuesto rotatable con tres factores (variables de proceso) [humedad de alimentación (**HA** = 12-25 %), temperatura de extrusión (**TE**= 120-160°C) y velocidad de tornillo (**VT**= 50-240 rpm)] dando un total de 20 tratamientos. Buscando obtener valores máximos de índice de expansión (**IE**), actividad antioxidante (**AAox**), contenido de antocianinas totales (**CAT**) y valores mínimos de dureza (**Du**).

La mezcla maíz azul (70 %) y chía (30 %) se acondicionó ajustando el contenido de humedad para cada tratamiento, se dejó en reposo (4-8°C/12h), posteriormente se equilibró a temperatura ambiente antes de su extrusión.

Una vez obtenida la **BEEO**, se le evaluaron cada una de las variables de respuesta [índice de expansión (**IE**), dureza (**Du**), actividad antioxidante (**AAox**) y contenido de antocianinas totales (**CAT**)].

Se aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta, empleando el método numérico de deseabilidad como técnica de optimización para obtener una botana extrudida expandida optimizada (**BEEO**) con las mejores características físicas, fisicoquímicas y de textura.

La mejor combinación de variables de proceso de extrusión para la producción de **BEEO** con valores altos de **IE** (**IE**= 2.59) **AAox** [DPPH= 612.94 µmol ET/100g (bs)], **CAT** [**CAT**= 6.50 mg de Cianidina-3-glucósido/100g (bs)] y valores mínimos de **Du** (**Du**= 5.70 N) fue **HA**= 14.4 %, **TE**= 142 °C y **VT**= 240 rpm.

Se varió el contenido de harina de chía (0 – 30 %), lo cual nos permitió la obtención de cuatro **BEEO**, con las condiciones optimizadas anteriormente. Esto fue realizado para evaluar el efecto del contenido de harina de chía sobre la composición química, fisicoquímicas, actividad antioxidante, propiedades físicas, textura y morfométricas de las **BEEO**.

Se realizó un análisis sensorial a las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO 0%**, **BEEO 10%**, **BEEO 20%** Y **BEEO 30%**), en dicho análisis sensorial solo evaluaron la propiedad de textura y aceptabilidad global de las botanas. Dichas botanas fueron comparadas con los valores obtenidos por una botana comercial (**BC**). En dicho análisis se pudo observar que los resultados entre las **BEEO** y la **BC** fueron muy cercanos lo cual significa que estas tienen una textura y aceptabilidad global muy similar.

Las **BEEO** elaboradas a base de maíz azul y chía, de valor nutricional / nutracéutico alto, sensorialmente aceptables, representan un alternativa para dar valor agregado a botanas del mercado. Las cuales ayudarían a disminuir la incidencia de las enfermedades relacionadas con la alimentación cuidando así la salud de los consumidores.

Palabras clave: Extrusión, botanas extrudidas, chía, almidón, fenólicos, proteínas

II. INTRODUCCIÓN

El sobrepeso y la obesidad son el quinto factor principal de riesgo de mortalidad a nivel mundial. Cada año fallecen por lo menos 2.8 millones de personas adultas como consecuencia del sobrepeso o la obesidad (OMS, 2016). La causa fundamental del sobrepeso y la obesidad es un desequilibrio energético entre calorías consumidas y gastadas, a menudo los cambios en la actividad física y los hábitos de alimentación son los principales factores que causan esta enfermedad, por lo que la OMS (Organización Mundial de la Salud) apela a la industria alimentaria para proporcionar una alimentación saludable reduciendo el contenido de grasa, azúcar y sal de los alimentos elaborados; uno de estos alimentos son las botanas las cuales no son reconocidas como alimentos básicos, ya que por lo general tienen poco valor nutritivo y son clasificados como "comida chatarra" o "alimentos vacíos" (Limón, 2010).

En México, las botanas más consumidas son elaboradas a base de maíz, papa y cacahuate; sin embargo, se cuenta con una gran diversidad y disponibilidad de otros tubérculos y cereales de los que es posible obtener botanas con igual sabor y textura y además, con mejores características nutricionales, ya que son bajas en grasa, están constituidas por almidón resistente (no digerible en el intestino delgado), no tienen aporte calórico y ejercen funciones similares en el organismo o mejores a las de fibra (Cheftel, 1989; Camire y col, 1990).

Se considera como botana a los productos elaborados con cereales, leguminosas con o sin cáscara, tubérculos, granos, productos nixtamalizados y de piel de cerdo, los cuales pueden llevar o no un tratamiento de cocción y de sazónamiento (NOM-187-SSA1/SCFI-2002).

El maíz es el principal cereal a partir del cual son elaboradas las botanas directamente expandidas por extrusión, a las cuales se les clasifica como botanas de segunda generación. El almidón de este cereal posee las propiedades para la producción de botanas extrudidas de aceptabilidad alta; sin embargo, su valor nutricional está lejos de satisfacer las necesidades de consumidores preocupados por su salud (Uriarte-Aceves y col, 2015). El maíz (*Zea mays* L) es originario del continente americano, pertenece a la familia GRAMINEAE, y es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal (Quintanar-Guzmán, 2009). Además, su cultivo se ha extendido a todo el mundo. Es utilizado, principalmente, para la producción de tortillas, harinas instantáneas, botanas, bebidas, una gran cantidad de platillos y para el aislamiento de almidón (Esteve, 2003). La composición química del grano de maíz, depende de factores como condiciones de cultivo, temperatura, variedad y tipo de maíz, disponibilidad de nutrimentos durante crecimiento y desarrollo, entre otros (Herrera-Saldaña y col, 1990; Cowieson, 2005). En el maíz, más del 60% de las proteínas de reserva presentes en el endospermo de la semilla de maíz son del tipo de las Prolaminas y se conocen como Zeínas; las cuales; presentan contenido bajo de algunos aminoácidos esenciales (Lys, Trp), lo que ocasiona que la calidad nutricional de sus proteínas sea relativamente pobre (Paredes-López y col, 2000).

Por otro lado, la chía (*Salvia hispanica* L) se considera un alimento adecuado para enriquecer una gran diversidad de productos debido a su composición química y su valor nutricional confiriéndole un uso potencial en los mercados alimentarios, ya que es la fuente natural más rica en ácidos grasos omega-3 comparada con el aceite de pescado y de algas (Ayerza, 1995). Además es considerada como una buena fuente de fibra dietaría, proteína y antioxidantes (Bushway y col, 1981). En medio acuoso, la

semilla queda envuelta en un polisacárido mucilaginoso, el cual es excelente para la digestión porque junto con el grano en sí mismo forma un alimento saludable (Hentry y col, 1990).

Una de las técnicas de procesamiento de alimentos a gran escala es la extrusión, la cual es utilizada como un procedimiento estándar para la fabricación de muchas botanas (Colonna y col, 1989), incluidos los directamente expandidos directamente en el extrusor y los pellets no expandidos o de tercera generación (los pellets se expanden posteriormente de manera fácil en el hogar por freído o en el horno de microondas), los cuales son relativamente baratos y fáciles de producir (Milán-Carrillo y col, 2002; Carime, 2003). En la actualidad, los consumidores están exigiendo botanas más saludables, es decir, bajas en calorías y grasa, y con un mayor aporte nutrimental (Limón y col, 2010). Por lo tanto, es necesario crear alternativas para sustituir estos alimentos por otros que presenten un aporte nutricional y nutracéutico.

La elaboración de botanas a partir de mezclas de granos integrales es una opción factible para producir alimentos saludables con buenas propiedades nutricionales y nutracéuticas, y características de expansión y textura adecuadas para este tipo de botanas. Para ello, es necesario ajustar las condiciones de operación del extrusor para producir el tipo de botanas mencionadas anteriormente.

El objetivo de la presente investigación es obtener las condiciones óptimas de extrusión para producir una botana saludable, de valor nutricional / nutracéutico alto, a partir de una mezcla de maíz azul y chía.

III. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

A. MAÍZ (*Zea mays* L)

1. Origen

El maíz (*Zea mays* L) es originario del continente americano, la evidencia arqueológica más antigua sobre la existencia de este cereal indica que tiene aproximadamente 5,000 años de antigüedad. Representaciones de la planta de maíz, o sus partes, en esculturas, códices, cerámicas prehistóricas, así como estudios a fósiles encontrados, indican que el maíz tuvo su origen geográfico en la República Mexicana, específicamente en el valle de Tehuacán, Puebla y al norte del estado de Oaxaca. También indican que en México ocurrió su domesticación y posterior dispersión a otras regiones del continente, hacia el norte hasta Canadá y hacia el sur hasta Argentina. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano se introdujo a Europa a través de España (Reyes, 1990; Pandey, 1998).

Evidencia arqueológica y molecular (botánica, genética y citología) soporta que el maíz, tal y como lo conocemos en la actualidad, evolucionó de un progenitor silvestre que existió hace 8,000 años. En la actualidad el origen botánico del maíz gira en torno a dos hipótesis: la primera hace referencia a que el teocintle es el antecesor silvestre del maíz, y/o un tipo primitivo de teocintle es el antecesor silvestre común del maíz y del mismo teocintle; la segunda versión asegura que el maíz es un híbrido natural entre el teocintle y una *Gramineae* afín ya extinta, la cual se caracterizaba por ser una planta que producía el grano en forma de espiga (Paredes y col, 1983; Reyes, 1990; Galindat, 1995; Matsuoka y col, 2002; Buckler y col, 2006; Anónimo, 2007). La tesis de la proximidad entre el teocintle y el maíz se basa en que ambos tienen 10 cromosomas

y son homólogos o parcialmente homólogos. En cualquier caso, la mayoría de las variedades modernas del maíz proceden de material obtenido en el sur de los Estados Unidos, México y América Central y del Sur (FAO, 1993).

2. Taxonomía

El maíz (*Zea mays* L), pertenece a la familia de las *GRAMINEAE*, subfamilia *Panicoideae*, y tribu *Andropogoneae*; la cual incluye siete distintos géneros: *Zea* (como el teocintle), *Tripsacum* (conocidas como arrocillo o maicillo), *Coix*, *Chionachne*, *Sclerchne*, *Polytoca* y *Trilobachne* (Pandey 1998; Paliwal y col 2001).

3. Estructura del grano

En forma general el maíz se divide fundamentalmente en cuatro partes: a) pericarpio y aleurona, b) pedicelo, c) endospermo y d) germen (Watson, 1988). En la **Figura 1** se muestran las principales partes estructurales del grano.

a. Pedicelo

El pedicelo es la estructura celular mediante la cual el grano se encuentra unido al olote. Está compuesto de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, consta de una capa exterior de abscisión con la función de sellar la punta del grano maduro. A esta capa le sigue una serie de células parenquimatosas en forma de estrella, unidas entre sí por medio de sus puntas formando una estructura frágil y porosa. El pedicelo constituye un 0.8% del peso total del grano (Wolf y col, 1952; Watson, 1987).

b. Pericarpio

Capa exterior dura y fibrosa que encierra al grano. Comprende el pericarpio, la testa y la cofia, en un pequeño casquete que cubre la punta del grano y protege al embrión. Representa del 5-7 % del peso total del grano (bs). El pericarpio es la cubierta

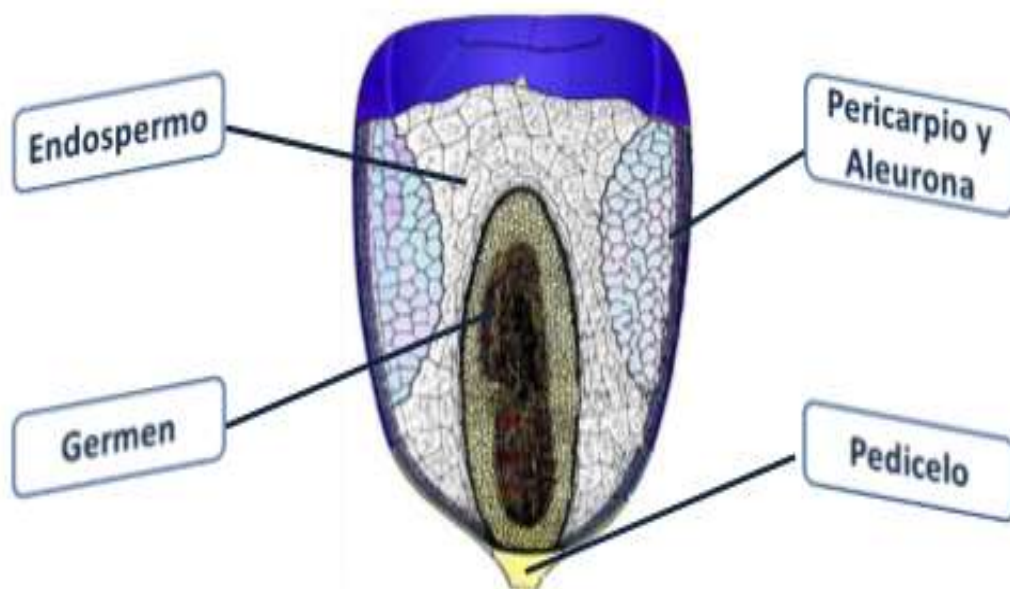


Figura 1. Estructura del grano de maíz (*Zea mays* L) (Watson, 1988).

botánica de la semilla y está compuesta por varias capas (tejidos más externos grano, incluyendo grandes cantidades de aleurona) ricas en celulosa del y hemicelulosa. La epidermis es la capa más externa y se encuentra recubierta con cutina (sustancia cerosa que restringe la entrada de agua y otros líquidos o gases). El mesocarpio es la capa inferior a la epidermis, compuesto de 17-25 capas de células elongadas conectadas entre sí por conductos a través de los cuales pueden circular líquidos y gases. Las siguientes cuatro capas las constituyen células cruzadas y tubulares; el agua que entra por el pedicelo puede ser transportada rápidamente dentro del grano a través de estas células (Eckhoff y col, 2003).

c. Endospermo

Constituye la mayor proporción del grano con aproximadamente un 80-84 % del peso total. Funciona como reserva energética a la planta durante su desarrollo. Está compuesto de dos regiones: Harinosa y córnea; generalmente la relación harinosa/córnea es de 2:1. La región harinosa del endospermo se caracteriza por tener células con gránulos de almidón grandes (10-30 μm), esféricos y una capa delgada de matriz proteínica; en la región periférica o córnea se encuentran células con gránulos de almidón más pequeños (1-10 μm). Químicamente el endospermo está compuesto por 90 % de almidón y 7 % en proteínas acompañadas de aceites, minerales y otros compuestos (Wolf y col 1952; Watson 1987).

d. Germen

Es la parte primaria del grano de maíz necesaria para el proceso de reproducción; contiene todas las enzimas, nutrimentos y componentes esenciales para producir una nueva planta de maíz (Inglett, 1970).

Aporta un 9.5-12 % del peso total del grano y se localiza en la parte inferior del mismo. Posee dos partes destacables; Eje embrionario y escutelo. El escutelo constituye cerca del 90% del germen y es donde se almacenan los nutrientes que utiliza el grano durante la germinación. Químicamente el germen está compuesto por aproximadamente un 35-40 % del contenido total de lípidos encontrados en el grano (Wolf y col 1952; Watson 1987; Hernández 2005).

4. Razas de maíz en México

El maíz como cultivo es un sistema dinámico y continuo. Su polinización es libre y hay movimiento o flujo de semilla por los agricultores año con año al mantener, intercambiar y experimentar con semilla propia o de otros vecinos de la misma localidad o de regiones distantes. A diferencia de las plantas silvestres, esto dificulta la distinción de unidades discretas para clasificar su diversidad. Una aproximación a su estudio y entendimiento ha sido seleccionar en este continuo las principales unidades (tipos o formas) que le caracterizan y a las que se han denominado razas (Perales y Golicher, 2001).

El término raza se ha utilizado en el maíz y en las plantas cultivadas para agrupar individuos o poblaciones que comparten características en común, orden morfológico, ecológico genético y de historia de cultivo, que permiten diferenciarlas como grupo (Anderson y Cutler, 1942; Hernández y Alanís, 1970; Harlan y de Wet, 1971). Las razas se agrupan a su vez en grupos o complejos raciales, los cuales se asocian a una distribución geográfica y climática más o menos definida y a una historia evolutiva común (Goodman y McK Bird, 1977; Sánchez y col, 1989).

El concepto y la categoría de raza son de gran utilidad como sistema de referencia rápido para comprender la variación del maíz, para organizar el material en las

colecciones de bancos de germoplasma y para su uso en el mejoramiento así como para describir la diversidad a nivel paisaje. Sin embargo, cada raza puede comprender numerosas variantes, como diferencias en forma de mazorca, color y textura del grano, adaptaciones y de diversidad genética (Perales y Golicher, 2011).

Las razas se nombran a partir de distintas características fenotípicas, tipo de grano, por el lugar o región donde inicialmente fueron colectadas o son relevantes o por el nombre por el que son conocidas por los grupos indígenas o mestizos que las cultivan (Wellhausen y col. 1951).

En América Latina se han descrito cerca de 220 razas de maíz (Goodman y McK. Bird, 1977), de las cuales 64 (29 %) se han identificado, y descrito en su mayoría, para México (Sánchez y col, 2000; Ortega, 2003; Ruiz y col, 2008). Diversos autores e instituciones, difieren en el número de razas que se salvaguardan en México, entre 41 (Ortega y col, 1991), 59 (Sánchez y col, 2000), 64 o 65 (LAMP, 1991).

De las 64 razas que se reportaron para México, 59 se pueden considerar nativas y que fueron descritas inicialmente en otras regiones (Cubano Amarillo, del Caribe, y cuatro razas de Guatemala (Nal Tel de Altura, Serrano, Negro de Chimaltenango y Quicheño) pero que también se han colectado o reportado en el país. Las razas de maíz de México se han agrupado, con base en caracteres morfológicos de adaptación y genéticos (isoenzimas) en siete grupos o complejos raciales (Goodman y McK Bird, 1977; Sánchez y col, 2000; Ruiz y col, 2008).

La importancia del maíz rebasa el ámbito nutricional y gastronómico, y se inserta en la tradición, cultura e identidad de México, donde se encuentran 64 de las casi 220 razas de maíz identificadas en el continente americano, incluido el teocintle, el más cercano predecesor del maíz actual (SIAP, 2018).

La diversidad genética del maíz que se cultiva en México puede apreciarse tanto en las diferentes formas y tamaños de las mazorcas como en la variedad de texturas y colores de sus granos. Las 64 razas de maíz que existen en nuestro país nos brindan una gama de colores que incluye tonalidades rojas, negras y azules, pero la mayor producción corresponde a maíces blancos y amarillos (SIAP, 2018).

El cultivo de otros colores de maíces distintos al blanco y amarillo tiene importancia económica, alimenticia, cultural y turística en algunos estados. Por la superficie sembrada y producción obtenida de estas variedades, destacaron el Estado de México y Chiapas (SIAP, 2018).

5. Maíces nativos de Sinaloa

El maíz es el cultivo de mayor importancia económica en Sinaloa. Durante los últimos diecisiete años, este cultivo ha observado un crecimiento acelerado en superficie, producción y rendimiento. Este crecimiento se debe al auge adquirido por el cultivo bajo condiciones de riego; sin embargo, bajo condiciones de temporal, modalidad en la que se cultivan los maíces nativos, se ha observado una continua reducción de superficie.

En el estado de Sinaloa el maíz de temporal se siembra en 15 de los 18 municipios; lo de mayor importancia en cuanto área sembrada son Sinaloa de Leyva, Culiacán, Badiraguato, San Ignacio y Cósala que en conjunto cultivan el 69% del total en el estado. Los municipios donde el cultivo de temporal es imperceptible son Ahome, Guasave y Navolato, debido principalmente a su ubicación en planicies costeras, donde predominan zonas irrigadas en el estado (Palacios-Velarde y col, 2008).

En áreas de temporal de Sinaloa, predominan el uso de maíces nativos en mayor grado y el uso de generaciones avanzadas de variedades mejoradas de polinización

libre en menor grado. Las condiciones limitadas por la escasa y errática precipitación pluvial, en que se siembran los maíces nativos, con elevado nivel de siniestralidad (20 a 50 % de la superficie sembrada), provoca que se obtengan rendimientos bajos (810 kg/ha en promedio). Dentro las áreas de temporal con frecuencia se siembran pequeñas aras de riego, en la cuales se utiliza semilla de híbridos de maíz, lo que favorece su infiltración en los maíces nativos (Palacios-Velarde y col, 2008).

En Sinaloa, persisten casi todas las razas reportadas en los antecedentes de investigación, pero en algunas razas la frecuencia es demasiado baja como es el caso del Reventador, Onaveño y Vandeño, y otras, están prácticamente extinguidas, como es el caso de razas Chaalote, Dulcillo y Bofo.

En cuanto a las variedades pigmentadas, en el estado de Sinaloa se han identificado 11 razas de maces pigmentados, de las cuales se han identificado 4 de ellas como nativas de la región, entre ellas la raza Elotero de Sinaloa de maíces de grano azul. Las raza de maíz presentes en el estado de Sinaloa son: (a) Chapalote, (b) Reventador, (c) Tabloncillo, (d) Tabloncillo Perla, (e) Tuxpeño Norteño, (f) Blanco de Sonora o Blandito de Sonora, (g) Harinoso de Ocho, (h) Onaveño. El Chapalote, maíz típico del noroeste de México, reventador y tunicado que tiene plantas de altura intermedia (180 cm) más precoz que el Bofo, con buena resistencia a la roya y pudriciones del grano por *Fusarium*. Las mazorcas son semicilíndricas, con 10 a 16 hileras de grano pequeño de color café claro a café muy oscuro, con una capa cristalina y endospermo blanco harinoso. Raza antigua de México, de la que posiblemente derivo el Reventador y emparentada con la raza primitiva Nal. Tel de Yucatán.

El Reventador es un maíz de porte bajo, tolerante a la roya, se mazorcas semiconicas con 12 hileras de grano blanco o rojo cristalino. Se ha propuesto que el Reventador derivo de una cruza entre Chapalote y Teocintle.

El Tabloncillo es también un maíz de altura media (180 cm), semitardío, susceptible al acame, con buena sanidad del grano y resistente a la roya. Las mazorcas son semiconicas con 8 a 10 hileras de granos blancos recubiertos con una capa cristalina delgada y endospermo blanco harinoso. Se considera a Nayarit como el centro de distribución de este maíz que posiblemente derivo de cruzamientos entre Harinoso de Ocho y Reventador.

El Tabloncillo Perla es un maíz de altura intermedia (175 cm), de ciclo semitardío, tolerante al acame, buena sanidad del grano y resistente a la roya. Las mazorcas son semicilíndricas con 8 a 10 hileras de grano blanco cristalino. En este maíz se expresa con intensidad la influencia del Reventador sobre Tabloncillo.

El Tuxpeño Norteño es un maíz semitardío, de porte medio (190 cm), resistente al acame, excelente sanidad del grano y resistencia a la roya. Las mazorcas son semiconicas con 10 a 14 hileras de grano blanco dentado, ocasionalmente rojizo. Deriva de la raza Tuxpeño del Gofo de México.

El Blando de Sonora o Blandito de Sonora es tardío, tiene una altura intermedia (180 cm), es menos propenso al acame, muestra baja incidencia de pudrición de mazorca y es ligeramente menos resistente a la roya que los anteriores. Las mazorcas son semicilíndricas con 10 a 14 hileras de grano suave harinoso de color blanco. Se sugiere que este maíz puede derivar de las interacciones del Reventador y Chapalote sobre Harinoso de Ocho.

El Harinoso de Ocho de la costa de Sonora es un maíz precoz de porte bajo a intermedio, con tolerancia al acame, resistente a la roya y tolerante a la pudrición de mazorca. Las mazorcas son largas semiconicas con 8 a 10 hileras de grano blanco, con cubierta delgada cristalina y endospermo harinoso. La mayor afinidad de este maíz es con el Harinoso Prehistórico introducido de América del Sur, considerando su parecido con los maíces de los Guaraní de Paraguay y con el Banco Amazonico y Karapampa de Bolivia (Palacios-Velarde y col, 2008).

El Onaveño nativo de Ónavas, Sonora, es una maíz semitardío de porte intermedio (175 cm), susceptible al acame, aceptable resistencia a la pudrición de grano por *Fusarium* y a la roya. Las mazorcas son semicilíndricas con 8 a 14 hileras de grano blanco cristalino aperlado. Se considera que este maíz pudo haber derivado del Blanco del Sonora, con genes de endospermo cristalino o de la infiltración genética del reventador del Maíz Blanco. Sánchez y col (2000) concluyeron que la mayor diversidad genética, estimada mediante el estudio bioquímico de isoenzimas, continua existiendo en Mesoamérica y particularmente en México.

6. Maíz azul

El maíz azul (*Zea mays* L) debe su color a las antocianinas las cuales están localizadas en una capa delgada que recubre el endospermo. La mayoría de los maíces azules son típicamente de grano harinoso. El endospermo es de textura suave. El color azul se encuentra en la capa de células llamada aleurona, donde una mayor concentración de pigmentos de antocianinas hace que los granos parezcan negros (Beltarn y col, 2001; Dickerson, 2003). El endospermo a su vez está formado por proteínas y granulos de almidón (responsable de las propiedades e textura en los

productos elaborados con este cereal) cuya forma y tamaño tienen influencia en sus propiedades fisicoquímicas (Lideboom y col. 2004; Mishra y Raid, 2006).

En la **figura 2** se puede apreciar los colores del grano completo y de cada uno de sus componentes, en seis poblaciones criollas de maíces pigmentados.

7. Maíces azules en México

México es considerado como uno de los principales centros de origen del maíz (*Zea mays* L). La diversidad que existe en el país sobre esta gramínea es muy amplia, y así lo demuestran las más de 59 razas de maíz descritas (Sánchez y col, 2000). En muchas de estas razas se presentan variantes de grano pigmentado con coloraciones que van desde el negro hasta el rosa pálido, con los colores rojo y azul/morado como los más comunes (Salinas y col, 2012). Los maíces pigmentados son producidos por agricultores de subsistencia, en suelos marginales y en pequeñas superficies, y la mayor parte de su producción es para autoconsumo. Sin embargo, en estados como Puebla y México la relación beneficio/costo de la producción de maíz azul es de 2.24, superior a la razón 1.57 del maíz comercial de grano blanco (Arellano y col., 2003; Keleman y Hellin, 2009). De esta manera, el maíz azul posee un papel importante como maíz especial.

Componentes	Progenitor					
	Rojo-1	Rojo-2	Azul-1	Azul-2	Amarillo	Blanco
Pericarpio						
Aleurona						
Grano entero						

Figura 2. Colores del grano completo y cada uno de sus componentes (pericarpio y aleurona) en seis poblaciones criollas de maíz contrastadas en color de grano (Salinas-Moreno y col, 2012).

8. Producción de maíz azul

A nivel mundial existen razas de maíz de distintos colores como blanco, amarillo, rojo, azul y morado. En México se han encontrado una de la diversidad genética más importante del maíz en el mundo siendo los maíces azules y rojos los más comunes de los pigmentados. Los maíces de color han estado presentes en la mitología, rituales religiosos y en la alimentación de las culturas indígenas de México (Hernández, 2008).

En México los pequeños productores cultivan maíz pigmentado e color rojo, azul, morado y negro en volúmenes bajos que no se registran en las estadísticas oficiales. Sin embargo, estos maíces constituyen parte de la diversidad genética que existe de esta gramínea en el país, donde se han descrito al menos 59 razas, muchas de las cuales corresponden a variantes de grano pigmentado con coloraciones que van desde el negro hasta el rosa pálido (Salinas y col, 2012).

La producción de maíz azul o de color en nuestro país es menor en comparación con la de maíces de color claro, en los estados ubicados en valles altos del centro d la República Mexicana como son Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Estado de México (Antonio y col, 2004).

El maíz azul presenta bajos rendimientos de producción debido al uso de tecnología tradicional y siembra de variedades criollas que disponen los productores. Estas variedades de maíz son vulnerables a enfermedades t a factores climatológicos, y también presentan problemas de acame de raíz (Antonio y col, 2004). La producción de maíz azul en México es utilizada para consumo humano, principalmente para la elaboración de tortilla. Actualmente el maíz azul se está industrializando debido a que el consumidor que no acostumbraba consumirlo, está adoptando este producto de

manera satisfactoria por los beneficios que aporta. Así mismo, se está tratando de fomentar en los agricultores una producción mayor de este cultivo (Antonio y col. 2004).

En 2017, **54.5%** del maíz blanco se produjo en cuatro estados: Sinaloa, Jalisco, México y Michoacán; **59.0%** de la producción de maíces de otros colores se concentró en México y Chiapas (**Figura 3**), y **80.0%** del amarillo se generó en Chihuahua, Jalisco y Tamaulipas (SIAP, 2018) este último grupo a pesar de tener la menor producción, presenta una gran diversidad de colores, que van de tonalidades rosadas a rojas, azul claro a oscuros e incluso negros, dentro de este grupo, el más importante por la superficie sembrada y producción es el grano de color azul (Hellin y col, 2013). (**Figura 4**).



Figura 3. Superficie sembrada con otros colores de maíz (SIAP, 2018).



Figura 4. Principales estados productores de maíz en México (SIAP, 2018).

9. Composición química del grano

La composición química del maíz varía de acuerdo a las condiciones climatológicas, variedad (genotipo) y condiciones de crecimiento; a su vez, dentro de las distintas zonas del mismo grano, su composición varía de un lugar a otro. En México existe una gran diversidad de variedades de maíz azul; en diferentes regiones del país se cultivan variedades criollas de este grano. La composición química del grano de maíz azul se destaca el contenido de carbohidratos y proteínas (**Cuadro 1**).

a. Almidón

El componente químico principal del grano de maíz es el almidón, al que corresponde hasta el 72-73 % del peso del grano. Uriarte-Aceves y col, (2015) reportaron un contenido de almidón en un rango del 58.1 - 71.5 % para maíz azul cultivado en el estado Sinaloa.

Los maíces pigmentados se caracterizan por contener un endospermo mayor cantidad de almidón que la encontrada en el maíz blanco (0.7-0.78 g/g de muestra seca) (Krieger y col, 1998). Utrilla-Coello y col (2009) encontró en maíz azul y blanco contenidos de almidón total de 0.84 y 0.78 g/g de muestra seca, respectivamente. Agama-Acevedo y col, (2011) analizaron 15 muestras de maíces azules (razas Tabloncillo y Chalqueño), estos maíces mostraron valores de almidón total de 0.785 – 0.899 g/g de muestra seca.

Diversos autores han reportado que el almidón de maíz azul presenta contenidos de amilosa entre de 20 – 33.3 % (Agama-Acevedo y col, 2004; Utrilla-Coello y col, 2009). En general, las muestras caen en la clasificación de almidón normal en base a su contenido de amilosa que va de 20 – 35 % de acuerdo a tester y col, (2004).

Cuadro 1. Composición química del maíz azul (Gaxiola-Cuevas, 2010).

Componente	(%, bs)
Proteínas	9.9 ± 0.5
Lípidos	5.6 ± 0.1
Cenizas	1.3 ± 0.05
Carbohidratos	83.2 ± 0.3

La concentración de amilosa en los gránulos de almidón de maíz se incrementa con la edad fisiológica del tejido en el cual son sintetizados (Boyer y col, 1976; Lu y col, 1996) reportaron que cuando el maíz es cultivado a temperaturas (35 °C) disminuye el contenido de amilosa comparado con el cultivado a 25 °C. El contenido de amilosa es importante ya que este componente del almidón de maíz es el encargado de los procesos de gelificación y retrogradación del almidón cuando este es cocinado y almacenado, por lo que los maíces con bajo contenido de amilosa pudieran formar productos con textura más suave y mayor digestibilidad (Biliaderis, 1991).

b. Carbohidratos

El maíz azul, como otras variedades de maíces es una fuente importante de carbohidratos. Los azúcares simples constituyen cerca del 2 % del peso del grano; 65 % se encuentran en el germen y 69 % de los carbohidratos del germen son glucosa. También contiene: monosacáridos libres como D-fructosa y D-galactosa, disacáridos como la sacarosa y maltosa, trisacáridos (rafinosa) y oligosacáridos; conforme madura el grano, disminuye el contenido de azúcares y aumenta el contenido de almidón. Los carbohidratos complejos representan alrededor del 80 % del peso total del grano. Los polisacáridos más importantes en el maíz son los estructurales y los de reserva. Los de tipo estructural se encuentran en las paredes del grano y son pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina; el polisacárido de reserva es el almidón y se encuentra en el endospermo (Boyer y Shannon, 2001).

c. Fibra dietaria

Los carbohidratos complejos estructurales como las sustancias pécticas, hemicelulosa, celulosa y lignina forman parte de la estructura de las paredes celulares

del endospermo del grano y como constituyentes del pericarpio y pedicelo. El salvado de maíz está formado por un 75 % de hemicelulosa, 25 % de celulosa y 0.1 % (bs) de lignina (Veles-Medina, 2004).

Después de los carbohidratos, proteínas y lípidos, la fibra dietaría es el componente químico del maíz que se encuentra en mayor cantidad. Los carbohidratos complejos como la fibra, se encuentran en el pericarpio, aunque también en las paredes celulares del endospermo y, en menor medida, en las del germen. Los valores de fibra dietaría dependen del método de análisis y también de la eficiencia de remoción de la cáscara del maíz durante su procesamiento; sin embargo, en general, se presentan contenidos entre 12 y 14 % (FAO, 2003).

La fibra dietaría está presente en el maíz azul como en todas las variedades de maíz. Se encuentra mayoritariamente en el pericarpio y en las paredes celulares del endospermo, ciertos factores como la genética, clima y altura afectan el contenido de fibra. Uriarte-Aceves (2015) cuantifico los niveles de fibra dietaría en 15 genotipos de maíz azul mexicano, reporto contenidos de 18-25 %, bs.

d. Vitaminas

El grano de maíz azul contiene vitaminas hidrosolubles y liposolubles. El grano contiene dos vitaminas liposolubles en concentraciones importantes, la vitamina A (β -caroteno) con 2.5 mg/kg y la vitamina E con 36 mg/kg. Además están presentes en menor proporción la vitamina B₁, Piridoxina, Niacina, y vitamina C en concentraciones muy bajas. En la aleurona, germen y endospermo están las proteínas hidrosolubles. Se han encontrado cantidades variables de Tiamina y Riboflavina. La concentración está determinada por el medio ambiente, las prácticas de cultivo y la genética (Dickerson, 2008).

e. Minerales

En el maíz, alrededor del 78 % de los minerales están contenidos en el germen del grano probablemente porque son esenciales durante el crecimiento del embrión. El P es el más abundante y representa 0.10 % de grano integral. El Ca es el mineral más importante del maíz azul, ya que es fundamental en el consumo humano. El contenido de Ca puede variar del 0.01 % al 0.10 % del peso seco del grano. Además posee cantidades de K y Mg (Dikerson, 2008).

f. Lípidos

El contenido de lípidos en el maíz es aproximadamente del 5 %; los lípidos se localizan principalmente en el germen. Casi todos los lípidos en el grano de maíz son triglicéridos libres y están compuestos principalmente por ácidos grasos polinsaturados como ácido Linoleico (18:2) 58.7-61.9 %, y Oleico (18:1) 24.1-26.6 % que representan la mayoría de los lípidos presentes en el grano de maíz, al igual que la mayoría de los aceites de origen vegetal. A su vez contienen en menor proporción, ácidos Palmítico (16:0) 11-11.5 %, Esteárico (18:0) 2-2.2 % y Linolénico (18:3) 0.7-0.8 %; estos ácidos se han relacionado, desde un punto de vista epidemiológico, con problemas cardiovasculares (Paredes-López y col, 2000).

Los lípidos del maíz azul son muy estables, porque contienen altos niveles de antioxidantes naturales. Por lo tanto el maíz azul es una excelente fuente de ácidos grasos y poder generar aceites de buena calidad (Boyer-Shannon, 2001).

Ortiz-Prudencio (2006) determino la composición proximal de 10 variedades criollas de maíz azul del estado de Hidalgo, reportando un contenido de lípidos de 3 –

6 %, bs. Uriarte-Aceves y col (2015) reportaron un contenido de lípidos de 4.5 – 6.5 %, bs.

g. Proteínas

El contenido promedio de proteína en el maíz es de 10 % y la mayor parte se localiza en el germen del grano; no obstante, el endospermo y pedicelo llegan a tener hasta un 9 % de proteína. Las proteínas se han clasificado en cuatro tipos de acuerdo a su solubilidad: Albúminas (solubles en agua), Globulinas (solubles en soluciones salinas), Prolaminas (solubles en soluciones alcohólicas) y Glutelinas (solubles en soluciones alcalinas o ácidas diluidas) (Paredes-López y col, 2006). En el grano de maíz, las Prolaminas se encuentran principalmente en el endospermo y se les reconoce como Zeínas; las Glutelinas se encuentran en la matriz proteínica de esta misma estructura. Ambas proteínas constituyen cerca del 90 % del total de las proteínas presentes en el grano. Las Albúminas y Globulinas se encuentran en menor proporción en el endospermo, pero estas proteínas son predominantes en el germen (Paredes-López y col, 2006).

Las proteínas de la semilla del maíz son clasificadas como Albúminas (8.3 %), Globulinas (9.4 %), Prolaminas (40.6 %), y Glutelinas (41.7 %) (**Cuadro 2**). Los cuerpos proteínicos del maíz están compuestos principalmente de Prolaminas. Con la excepción de Prolaminas, todas las fracciones son relativamente balanceadas en aminoácidos.

Estudios realizados en la Universidad Estatal de Colorado indican que el maíz azul presenta un 30 % más de proteína que los maíces blancos o amarillos (Johnson y Jha, 1996).

Cuadro 2. Fracciones proteínicas en el grano de maíz común, (Paredes-López y col, 2000).

Fracción proteínica (%)	Grano entero	Endospermo	Germen	Pericarpio y pedicelo
Albúminas	8.3	4.3	33.3	-
Globulinas	9.4	4.3	33.3	-
Prolaminas (Zeínas)	40.6	50	5.6	-
Glutelinas	41.7	41.4	27.8	-

10. Valor nutricional

La tendencia actual en la ingesta de maíz indica un consumo más elevado en las zonas rurales que en las urbanas (Paredes-López y col, 2000). El maíz, debido a su ingesta relativamente elevada en los países en desarrollo, no se puede considerar sólo una fuente de energía, sino que además suministra proteínas, vitaminas y minerales. Los granos de maíz tienen una concentración baja de proteínas y la calidad de éstas se encuentra limitada por la deficiencia de algunos aminoácidos esenciales, sobre todo Lisina y Triptófano. A excepción del arroz, la calidad de las proteínas del maíz común es similar a la de los demás cereales. Al parecer, el aminoácido limitante de las proteínas de más importancia, después de la Lisina y Triptófano, es la Isoleucina, según se ha determinado en experimentos de alimentación animal (Bressani y col, 1990). Aun con la ausencia de estos dos aminoácidos, tanto las Albuminas como las Globulinas y las Glutelinas contienen un adecuado balance de aminoácidos esenciales y presentan un alto contenido del aminoácidos esencial Leucina (Krehl y Barboriak, 1971).

Variedades de maíces modificados o híbridos, conocidos como maíces de calidad proteínica (QPM por sus siglas en ingles), contienen de un 70 – 90 % de Lisina y Triptófano que los maíces normales (Paredes-López y col, 2000).

Vidal-Martínez y col, (2008) evaluaron la calidad proteínica con base en el contenido de proteína, Lisina y Triptófano de 45 colectas de maíces nativos recolectados en 2003 – 2006 en la región serrana de Nayarit, México. De acuerdo con el agrupamiento, de los maíces con mejor calidad proteínica fueron los maíces de grano azul: Biofito Pinto, Chino Morado y Negro (% de proteína = 9.0 % en grano entero

y 5.4 % en endospermo); también tuvieron los mejores contenidos de Lisina (3.5 – 3.65 %) y Triptófano (0.55 – 0.68 %).

11. Fotoquímicos del maíz azul

a. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se incluyen dentro de un grupo de moléculas bioactivas no nutritivas (fotoquímicos) contenidas en frutas, vegetales y granos (Liu, 2004). Químicamente, un compuesto fenólico es una molécula que incluye en su estructura un anillo bencénico con uno o más grupos hidroxilo. Estos compuestos son derivados de sales 2-fenil-benzopirilo que existen en las plantas generalmente como glucósidos. Con excepción de algunos compuestos amino. El maíz contiene mayor cantidad de compuestos fenólicos y actividad antioxidante que otros cereales como trigo, arroz y avena (Adom y Liu, 2002). Cabrera-Soto y col, (2009) demostraron que los compuestos fenólicos del maíz se encuentran en varias partes anatómicas del grano donde varían en contenido, y que este se correlaciona con la dureza del grano. Mora-Rochín (2010) reporta un contenido de compuestos fenólicos totales en el maíz azul criollo de 27 ± 4.2 mg de EAG / 100 g, bs, de compuestos fenólicos libres; 115.10 ± 5.3 mg de EAG / 100 g, bs, de compuestos fenólicos ligados; obteniendo un contenido total de compuestos fenólicos de 142.1 ± 8.3 mg de EAG / 100 g, bs. Los compuestos fenólicos comprenden un amplia variedad de formas químicas: fenoles simples, fenilpropanoides, derivados de ácido benzoico, flavonoides (antocianinas), etilbencenos, taninos, lignanos y ligninas (Sahidi y Naczki, 2004). En el **cuadro 3** se ilustra la clasificación de compuestos fenólicos presentes en algunos frutos.

Cuadro 3: Principales de compuestos fenólicos en frutos y granos (Han y col, 2007).

Átomos de carbono	Estructura Básica	Clase	Ejemplo	Fruto (Ejemplo)
7	$C_6 - C_1$	Ácido hidroxibenzoico	P-hidroxibenzoico	Fresa
9	$C_6 - C_3$	Ácido hidroxicinámico	Cafeico	Manzana
		Cumarinas	scopolina	Cítricos
10	$C_6 - C_4$	Naftoquinonas	Juglona	Nuez
13	$C_6 - C_1 - C_6$	Xantonas	Mangiferina	Mango
14	$C_6 - C_2 - C_6$	Estilbenos	Resveratrol	Uva
15	$C_6 - C_3 - C_6$	Flavonoides	Quercetina	Cereza
		Isoflavonoides	Cianidina	Frijol de
		Ligninas	Diadzeina	soya
		Taninos		Frutos con hueso

b. Antocianinas en maíz

Las antocianinas representan los principales pigmentos solubles en agua, que son visibles al ojo humano. Aunque se pueden encontrar en cualquier parte de la planta, son mucho más frecuentes en flores y frutos, estructuras en las que contribuyen a los brillantes colores rojos, azules y morados de estos tejidos vegetales. Pertenecen al grupo de los flavonoides, y su estructura básica es un núcleo de flavona que consta de dos anillos aromáticos unidos por una unidad de tres carbonos (**Figura 5**).

En las plantas las antocianidinas no se acumulan como tal, si no es su forma glucosilada; esto es, unidas a un azúcar, y en cuyo caso se denominan máices de color guinda o rojo intenso. Si el pigmento se localiza en la capa de la aleurona son adecuados para elaborar productos nixtamalizados. Los máices con estas características son de color morado, azul o negro (Brouillard, 1982). Las antocianinas simples reportadas para maíz son: Cianidina 3-Glucosido, Pelargonidina 3-Glucosido y Peonidina 3-Glucosido. La primera es muy común en máices de grano azul y morado (Bustillos, 1997) y los dos restantes en máices de grano rojo (Collison y col, 2015; Mora-Rochín, 2016).

Únicamente glucosa y se han identificado en hojas de maíz coloreadas (Harborne y Self, 1987) y en el grano (De Pascual, 2002); las aciladas con alguno de los ácidos cinámicos (Salinas y col, 2015) poseen en su estructura glucosa y rutinosa (Abdel-Aal y col, 2006) (**Figura 6**).

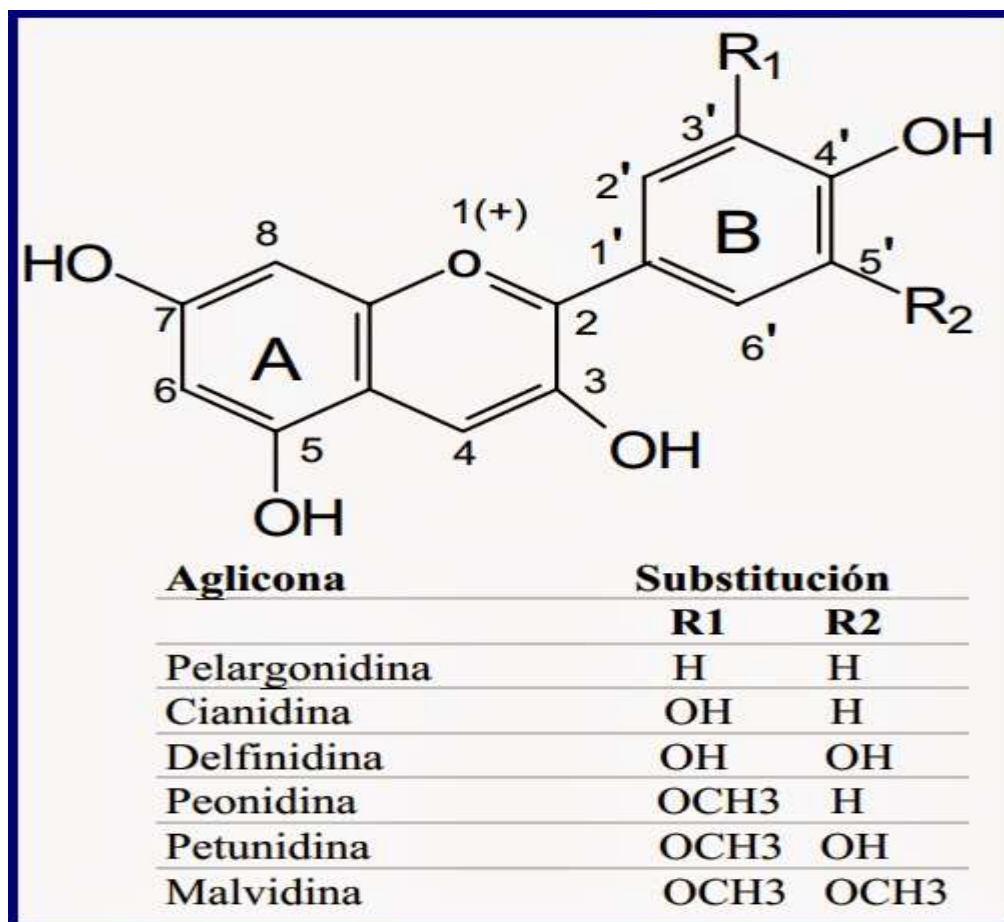


Figura 5: Antocianidinas más comunes en flores y frutos (Gross, 1967).

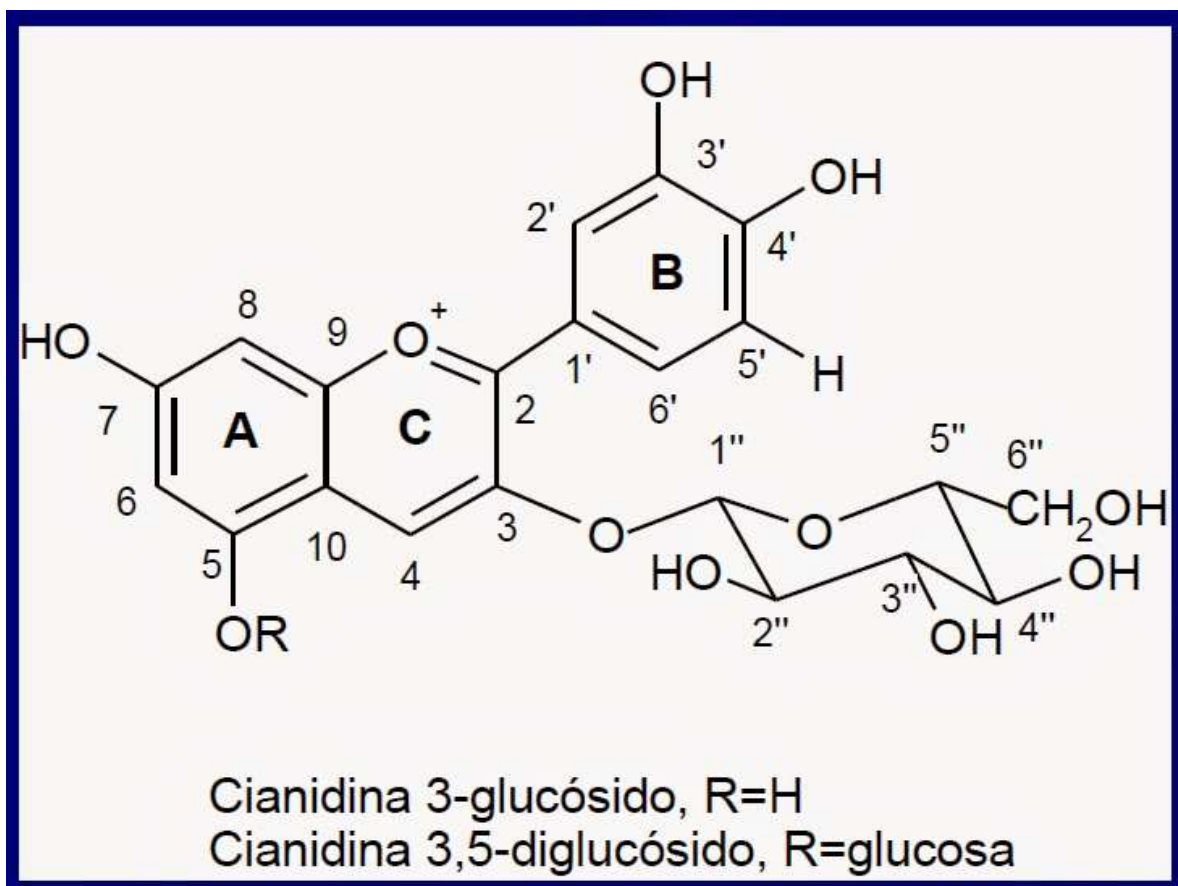


Figura 6: Estructura de antocianinas (Castañeda-Ovando y col, 2009).

El grano de maíz azul presenta entre 9 a 11 antocianinas diferentes, entre las que se tienen del tipo aciladas y no aciladas. El porcentaje relativo de cada tipo puede cambiar de acuerdo a la raza de la cual provenga el material y el sitio de cultivo, en productos derivados de este cereal, las condiciones del proceso usado para su elaboración (Espinosa, 2003; Collison y col, 2015; Mora-Rochín, 2016). Según Salinas (1999) el perfil de antocianinas en los maíces de grano azul está determinado por el tono del color del mismo y no se ve influenciado a la raza a la cual pertenece. Entre las antocianinas no aciladas del grano del maíz azul destacan: la Cianidina-3-Glucosido, Pelargonidina-3-Glucosido y Peonidina-3-Glucosido. Las aciladas son los derivados mono y diacilados de estas antocianidinas.

Gaxiola-Cuevas (2013) evaluó los niveles y perfiles de antocianinas de 6 genotipos de maíces criollos azules 230, 290, 387, 419, 485 y 512; reporto un contenido de antocianinas totales de 17.2, 23.7, 20.6, 27.9, 33.1, 31.0 mg EC3G/100g, bs, respectivamente. Se identificaron 6 diferentes tipos de antocianinas, CY-3-Glu, CY-MalGlu I, PG-3Glu, CY-MalClu II, CY-MalClu III, CY-SucGlu I, PG-MalGlu, CY-SucGlu II, CY-diSugGli I, CY-diSugGlu I.

Mora-Rochín y col (2016) identificaron y cuantificaron las antocianinas presentes en 15 accenciones de maíz azul mexicano (Elotero de Sinaloa), reportando valores en un rango de 14.1 – 34.2 mg ECG/100g (bs), siendo las de tipo aciladas las más abundantes (CY-Suc-Glu y CY-diSug-Glu) representando el 51.1% y 15.6% del total de antocianinas, respectivamente.

12. Propiedades nutraceuticas

Los cereales integrales son fuente importante de fibra, vitaminas, minerales y de fitoquímicos que incluyen a los compuestos fenólicos, carotenoides, vitamina E, lignanos, β -glucanos, inulina, almidón resistente, esteroides y fitatos. Los cereales integrales poseen propiedades nutraceuticas así como también contienen cantidades significativas de compuestos bioactivos que pueden proveer beneficios a la salud, más allá de la nutrición y reducir el riesgo de contraer ciertas enfermedades crónicas (Slavin, 2000; Serna-Saldivar y col, 2011). En el **Cuadro 4** se muestran algunos de estos fitoquímicos presentes en maíces pigmentados y sus propiedades nutraceuticas.

13. Actividad antioxidante

Un antioxidante puede definirse como un compuesto que puede donar fácilmente un electrón o un átomo de hidrogeno a un radical peróxido o alcohoxido para terminar una reacción peroxilipidica en cadena o para regenerar un compuesto fenólico, o que puede quelar efectivamente un metal prooxidante. También reciben la denominación de antioxidantes aquellas sustancias que eliminan el catalizador de la oxidación del medio de reacción. En el caso de los agentes quelantes de metales por el papel de estos últimos en la iniciación de la reacción. Además, la sustancia debe poseer unas características de hidrofilia/lipofilia que le permitan acceder al lugar donde debe prevenir la oxidación (Pannalay col, 1998). Además de esta definición, cabe considerar el concepto de antioxidante como aquella sustancia que es capaz de contrarrestar los aspectos deletéreos que la oxidación ocasiona en tejidos biológicos (Hwang y col, 2005).

La actividad antioxidante de los cereales es mayoritariamente debida a los compuestos fenólicos. El grano de maíz produce diversos tipos de compuestos

fenólicos que son categorizados como simples, flavonoides y antocianinas. Todos los maíces contienen fenólicos simples, mientras que solamente los maíces pigmentados como el azul o morado contienen cantidades significativas de antocianinas. Entre los fenoles simples el ácido Ferúlico es el más relevante, es el compuesto fenólico presente en mayor cantidad en maíz, donde se le puede encontrar una forma ligada, libre y condensada. Su propiedad antioxidante está asociada a su núcleo fenólico y su cadena lateral extendida, el ácido Ferúlico forma fácilmente una resonancia estabilizante con su radical fenoxi que aplica un efecto secuestrador de radicales libres (López-Martínez y col, 2011, Serna-Saldívar y col, 2013).

Cuadro 4. Principales categorías de nutraceuticos asociados a maíces criollos (Serna-Saldívar, 2010).

Compuesto nutracéutico		Estructura anatómica	Efecto preventivo o terapéutico
Familia	Clase		
Fenolicos	Simples como el ferulico	Principalmente asociados al pericarpio	Previenen el estrés oxidativo, cáncer, alto colesterol, arterioesclerosis y envejecimiento
Antocianinas y flavonoides	Antocianinas, flavonoles, flavan- 3 – ols	Principalmente asociadas a la aleurona	Previenen el estrés oxidativo, cáncer, alto colesterol, arterioesclerosis y envejecimiento
	Carotenos	Principalmente asociados al endospermo de maíces amarillos	Los B – Carotenos son convertidos en vitamina A o retinol. Previenen el cáncer, las enfermedades cardiovasculares y refuerzan el sistema inmunológico
Carotenoides	Xantofilas: luteínas, zeaxantina, criptoxantina	Principalmente asociados al endospermo de maíces amarillos	Previene la degradación macular y formación de cataratas (opacidad en el cristalino ocular). Retarda la aparición de síntomas relacionados con <i>retinitis</i> . Previene enfermedades cardiovasculares.
Fitoesteroles	Sitosterol, estigmasterol, campesterol	Principalmete asociados al germen, pericarpio y aleurona	Compiten con los sitios de absorción de colesterol y por consiguiente son considerados como hipocolesterolemicos y previsores de enfermedades cardiovasculares.

Fibra	Soluble como arabinoxilanos y hemicelulosas solubles	Principalmente asociados al pericarpio	Mejora función gastrointestinal, mejora la viscosidad de bolo alimenticio y reduce el índice glicémico. Reduce el riesgo de diabetes e hipocolesterolemia. Efecto prebiótico generando ácidos grasos volátiles.
	Insoluble como celulosa y lignina	Principalmente asociados en el endospermo de maíces amarillos	Mejora la función gastrointestinal, mejora el ligado de ácidos biliares y el volumen y peso de las heces y reduce constipación, hemorroides, diverticulosis y cáncer.
Ácido fitico inositol	Inositol	Principalmente asociado al pericarpio y aleurona	Considerado como antioxidante y con propiedades anticancerígenas de mama, colon, hígado, leucemia, próstata y sarcomas.
Ácidos grasos polinsaturados	Ácido linoleico (18:2 ω 6) y Ácido linoleico (18:2 ω 3)	Principalmente asociados al germen	Ayudan a reducir triglicéridos y colesterol sanguíneo. Estos ácidos son convertidos en prostaglandinas y otros ácidos grasos como EPA y DHA.
Fosfolípidos	Fosfatidil colina, fosfatidil etanolamida, fosfatidil inositol, fosfatidil serina	Principalmente asociados al germen	Esenciales para el funcionamiento de las membranas celulares y las neuronas cerebrales. Previenen el envejecimiento

			celular y alto colesterol. La colina es especial para producir acetil colina como principal neurotransmisor.
Vitaminas	Tocoferoles	Principalmente asociados al germen	Los tocoferoles son considerados antioxidantes. El α -tocoferol o vitamina E es considerado como la segunda línea de defensa contra el estrés oxidativo que previene enfermedades cardiovasculares, alto colesterol y todo tipo de cáncer. Además ayudan a mejorar la capacidad mental y función cerebral.
	Ácido fólico	Principalmente asociados a la capa de aleurona	Previene abortos y los defectos del tubo neural y malformaciones del bebe. Ayuda a reducir los niveles de homocisteina y por ello previene enfermedades cardiovasculares
Policosanoles o ceras	Octacosanol, tricontanol, hexacosanol, dotriacontanol	Principalmente asociados al germen y pericarpio	Reducen lípidos cericos, colesterol y la agregación de plaquetas.

De la Parra y col (2007) evaluaron la actividad antioxidante en extractos hidrofílicos de cinco tipos de maíces (blanco, amarillo, azul, rojo y con un contenido alto de carotenoides) reportando valores de 41 – 49.6 μ moles equivalentes de vitamina C / 100 g para los extractos. No se encontró diferencia significativa en la actividad antioxidante hidrofílica entre el maíz azul y el blanco.

Mora-Rochín y col, (2010) evaluaron la actividad antioxidante de maíces pigmentados (rojo y azul) y comerciales (blanco y amarillo) reportando valores de 19, 312, 19,191, y 19, 180 μ mol Trolox equivalentes / 100 g bs, para maíces blanco, rojo y amarillo, respectivamente; estos valores fueron mayores que los obtenidos para maíz azul.

14. Actividad anticarcinogénica

Los radicales libres son considerados factores importantes en la etiología del cáncer. Los componentes de la dieta con actividad antioxidante reciben particular atención como potenciales inhibidores de varios tipos de cáncer. Los fitoquímicos pueden presentar actividades anticancer, parcialmente para combatir a las especies reactivas de oxígeno (ERO) y por ende proteger moléculas celulares críticas (ADN, proteínas y lípidos) del estrés oxidativo. Los fitoquímicos también pueden interferir con los caminos de señalización celular, entre ellos, lo que regulan la proliferación celular, inducen la apoptosis y la respuesta al estrés oxidativo (Gutiérrez-Urbe, 2003; Roy y col, 2003; Dedoussis y col, 2005).

La fibra dietaria representa uno de los constituyentes más importantes de la dieta, sin embargo, el hombre moderno no la consume en cantidades suficientes, sino aproximadamente la mitad de la dosis recomendada. Los granos integrales, incluyendo el maíz, aportan cantidades significativas de fibra dietaria, especialmente soluble, que

mejora la función gastrointestinal y previene constipación, divertículos, hemorroides, diabetes y cáncer de colon. Adicionalmente el maíz es rico en fitatos, que si bien tradicionalmente han sido considerados como factores antinutricionales, por que disminuyen la biodisponibilidad de minerales como el hierro, también poseen propiedades anticarcinogénicas (Kroon y col, 1997; Steer y Gibson, 2002).

Janicke y col (2011) investigaron los efectos del ácido Ferulico y p-Cumarico (componentes de la fibra dietaria) en la línea celular CaCo-2; observaron que los tratamientos de las células con 150 μ M de esos ácidos por 24 h retarda la progresión del ciclo celular, específicamente durante la fase S por ácido Ferulico y en la fase G₂/M con el tratamiento de ácido p-Cumarico.

Los granos de maíz contienen una compleja mezcla de componentes, algunos con propiedades antimutagénicas (Pedrechi y col, 2007).

Jing y col (2008) analizaron la estructura y función de extractos ricos en antocianinas de maíz morado, zanahoria púrpura, arándano, uva, rábano y sauco, contra la inhibición de la proliferación de células de cáncer de colon (utilizando línea celular colorectal adenocarcinoma humano HT29). Todos los extractos inhibieron la proliferación celular; sin embargo, los extractos de maíz morado mostraron un efecto mayor (GI₁₅₀ = 14 μ g de Cianidina-3-glucosido equiv 7mL).

Los efectos antioxidantes *in vitro* de las antocianinas se han demostrado en varios cultivos celulares de células de colon, endoteliales, hepáticas y leucositos. En dichos sistemas las antocianinas han exhibido efectos antitóxicos y anticarcinogénicos, como: Destrucción de radicales libres, reducción de la capacidad de absorción de radicales libres de a células, estimulación de enzimas de la fase II para la desintoxicación y reducción de varios procesos negativos, como la formación de productos oxidativos en

el ADN, peroxidación de lípidos, mutagenesis ocasionada por toxinas ambientales y carcinógenos, y la proliferación celular por medio de la modulación de vías de señalización (Wang y Stoner, 2008).

Reynosa-Camacho y col (2015), evaluaron el efecto protector de tortillas de maíz (azul, rojo, amarillo y blanco) contra el desarrollo de cáncer de colon, administrado en la dieta tortilla (27 % p/s) a ratas con cáncer de colon inducido. Observando una disminución de la incidencia de hasta el 77.5 % en dietas con tortillas elaboradas con maíz blanco y azul. Además, una inhibición de la actividad de β -glucuronidasa, así como una disminución en la expresión de las dos proteínas de proliferación más importante (K-ras y β -catenina) implicadas en la carcinogénesis de colon.

15. Otras propiedades

Un amplio espectro de actividades benéficas para la salud humana ha sido asociado con los compuestos fenólicos, en parte por su fuerte capacidad antioxidante. El ácido Ferúlico, un compuesto fenólico, es un antioxidante de membrana fuerte y se le atribuyen efectos positivos sobre la salud humana. Posee un amplio rango de propiedades terapéuticas (antiinflamatorio, antiaterogénico, antidiabético, antienviejesimiento, neuroprotector, radioprotector, hepaticoprotector). Muchas de estas propiedades pueden ser atribuidas a su elevada actividad antioxidante, causada por sus núcleos fenólicos y la conjugación de su cadena lateral extendida. Este fácilmente forma un radical fenoxi estabilizado por resonancia, asociado a su potencial antioxidante (Srinivasan y col, 2007).

Tsuda y col (2003) experimentaron con ratones de laboratorio alimentados con antocianinas de maíz morado, particularmente con la Cianidina-3-Glucosido (C3G); encontraron que la dieta hiperlipídica rica en antocianinas produjo menor ganancia

de peso en los ratones y redujo significativamente la aparición de enfermedades como hiperglicemia, hiperinsulinemia (resistencia a la insulina) e hiperleptinemia, en comparación con grupo alimentado con una dieta hiperlipidémica sin antocianinas; estos autores concluyeron que las antocianinas se pueden considerar como un aditivo funcional que previene la obesidad, la diabetes y el síndrome metabólico.

En un estudio llevado a cabo por Guo y col (2012) con ratones normales y ratones genéticamente diabéticos, de seis semanas de edad, se alimentaron a ambos grupos con una dieta alta en grasas durante 12 semanas, además se les suministró una suplementación dietaria (0.2 % de C3G) durante 5 semanas. La C3G redujo los niveles de glucosa en ayunas y mejoró notablemente la sensibilidad a la insulina, en los dos grupos de ratas, en comparación con los controles sin suplementar. También los niveles de ARN mensajero del tejido adiposo blanco y las concentraciones séricas de citoquinas inflamatorias se redujeron, al igual que la infiltración de macrófagos en el tejido adiposo. Al mismo tiempo, el contenido de triglicéridos hepáticos y esteatosis fueron mejorados. Se concluyó que la C3G tiene potencial antidiabético.

B. CHIA (*Salvia hispánica* L)

La chía (*Salvia hispánica* L) es un cultivo autóctono de Mesoamérica con una historia agrícola. Si bien ninguna fuente afirma de manera categórica que la chía sea originaria de un lugar específico, existe una alta probabilidad relacionada con los territorios que actualmente ocupan la República Mexicana y Guatemala (Tecante, 2010). Existen evidencias que demuestran que la semilla de chía fue utilizada como alimento hacia el año 3500 a.C., siendo cultivada en el Valle de México entre los años 2600 y 900 a.C. por las civilizaciones teotihuacanas y toltecas. Asimismo, fue uno de los principales componentes de la dieta de los aztecas junto con la quínoa, el amaranto, el maíz y alguna variedad de porotos (Rodríguez Vallejo, 1992). La importancia de estos cinco cultivos en la dieta azteca está bien fundamentada en el Codex Florentino escrito en tiempos de la conquista de América entre 1548 y 1585 por Fray Bernardino de Sahagún, titulado Historia general de las cosas de Nueva España, en el cual se describen algunos aspectos relacionados con la producción, comercialización y usos de la chía. La chía era utilizada como materia prima para la elaboración de medicinas, alimentos y pinturas, así como en ofrendas a los dioses durante las ceremonias religiosas (Sahagún, 1579). Las semillas eran tostadas y se mezclaban con agua para consumirse como gachas (masa blanca medio líquida) o bien se mezclaban con harina para hornear. El aceite se usaba en pinturas o como emoliente y el mucilago como una pasta (ungüento extendido en lienzo) aplicado en heridas o para remover la suciedad del ojo (Ortiz de Montellano, 1978). Tenochtitlán, la capital del Imperio Azteca, recibía entre 5000 y 15000 toneladas de chía anualmente como tributo de los pueblos conquistados (Codex Mendoza, 1542). Con respecto a los Mayas, no existe evidencia que la chía fuera cultivada en el apogeo de su civilización

(800 a.C. a 900 d. C.), aunque la existencia de un intenso comercio entre los centros Teotihuacanos y Mayas durante varios siglos hacen suponer que también era conocida por este pueblo precolombino, el cual ocupó una gran parte de México, Guatemala, Honduras y El Salvador (Ayerza y Coates, 2005).

Cuando los conquistadores invadieron América, las tradiciones de los nativos fueron suprimidas y la mayor parte de su agricultura intensiva y de su sistema de comercialización destruidos hasta casi su extinción. Muchos cultivos que habían tenido la mayor preponderancia en las dietas precolombinas fueron prohibidos por los españoles debido a su estrecha asociación con los cultos religiosos y reemplazados por especies exóticas (trigo, cebada, arroz, entre otras) demandadas por los conquistadores (Soustelle, 1955; Engel, 1987). Así, de los cinco cultivos básicos de la dieta azteca, la chía y el amaranto perdieron sus lugares privilegiados y casi desaparecieron, siendo los efectos de la persecución española mayores sobre la chía.

Sin embargo, esta especie logró sobrevivir a la persecución de los conquistadores españoles debido a la conservación de algunas tradiciones precolombinas por parte de pequeños grupos de descendientes de las naciones Nahuatl. Así, estos pueblos lograron vencer a los conquistadores y las presiones de la cultura impuesta permaneciendo aislados en el sudoeste de México y las zonas montañosas de Guatemala. Actualmente, los descendientes de los Nahuatl y de los Mayas utilizaban este grano ancestral en una popular bebida denominada “agua fresca de chía”, aunque su preparación difiere de la realizada por los antiguos Mexicanos la cual era consumida por razones étnicas o religiosas (Ayerza y Coates, 2005). Durante muchos años las semillas de chía fueron comercializadas solamente en los mercados mexicanos. En 1965 la chía comenzó a estar disponible en comercios dietéticos del sudeste de

California y Arizona (Hicks, 1966) y hacia finales de los años 1980s se comenzó a comercializar como un alimento para mascotas (Chia Pets), incrementándose la demanda de las semillas y posibilitando la venta mayoritaria de su producción.

En 1991 se inició el Proyecto Regional del Noroeste de Argentina, con el fin de identificar y llevar a producción comercial nuevos cultivos industriales, los que pudieran ayudar a diversificar la producción agrícola e incrementar las ganancias de los agricultores de dicha región.

Desde el comienzo, organizaciones privadas y gubernamentales de los Estados Unidos y de Argentina han trabajado en este proyecto en forma cooperativa. Durante el curso del mismo, la chía fue identificada como la especie más promisoría, siendo cultivada comercialmente (Ayerza y Coates, 2005).

Paralelamente, los resultados de las investigaciones científicas acerca de los efectos negativos de las grasas saturadas, los ácidos grasos trans y el desbalance entre los ácidos grasos omega-6 y omega-3 en la dieta occidental, así como los beneficios del consumo de ácidos grasos omega-3 para prevenir la ocurrencia de enfermedades cardiovasculares, depresión, cáncer y otras patologías comenzaron a ser cada vez de mayor interés. Asimismo, la información sobre la chía – fuente natural de este tipo de ácidos grasos, antioxidantes y fibra dietética- acrecentó las expectativas en torno a su cultivo. En virtud de ello, su uso como alimento comenzó a expandirse fuera de México (Ayerza y Coates, 2005).

Actualmente, su cultivo se ha extendido a otras áreas como Australia y el Sudeste de Asia (Jamboonsri y col, 2012). En base a lo expresado anteriormente, la ciencia actual permite explicar por qué las antiguas civilizaciones consideraban a la chía un componente básico de su dieta. La composición química y el valor nutricional asociado

le confiere un gran potencial para incorporarla en los mercados de alimenticios e industriales. A su vez, esta información ha brindado una excelente oportunidad para desarrollar una industria agrícola capaz de ofrecer al mundo un “cultivo nuevo y antiguo a la vez” (Ayerza y Coates, 2005).

1. Características generales

Las especies de *Salvia* pertenecen a la familia Lamiaceae (anteriormente Labiatae). El género llamado *Salvia* L. es derivado del Latin *salvare* que significa “curar o estar sano y salvo” refiriéndose a las propiedades medicinales de algunas especies (Blumentahal y col, 2000). Este género ha sido usado por siglos, especialmente por los chinos para promover la longevidad y en ceremonias romanas como una hierba sagrada. Este nombre fue traducido a sauge (salvia) en francés y sawge en ingles antiguo. El género *Salvia* incluye unas 900 especies y se distribuye extensamente en varias regiones del mundo, e incluye diversas especies ornamentales, culinarias y medicinales (Codd, 1985; Paton 1991; Gali-Muhtasib y col 2000). Este género tienen una distribución subcosmopolita pero está ampliamente ausente en el norte y la mayoría de las áreas tropicales de baja altitud del mundo como la cuenca del Amazonas y el centro y sur de África (Paton 1991). Aunque México tiene el mayor número de especies (alrededor de 250), el centro de origen del género se cree que fue Afganistán y Asia Soviética Central donde se encuentran una mayor gama de tipos morfológicos primitivos (Paton 1991).

Salvia hispánica L., conocida como “salvia española”, “artemisa española”, “chía mexicana”, “chía negra” o simplemente “chía”, es una planta herbácea anual originaria de las áreas montañosas del oeste y centro de México (Beltrán-Orozco y Romero, 2003), de 1 a 1.5 m de altura, con tallos ramificados de sección cuadrangular, con

pubescencias cortas y blancas. Las hojas miden 8-10 cm de longitud y 4-6 cm de ancho, se encuentran opuestas con bordes aserrados y de color verde intenso. Las flores son hermafroditas de un tono entre violeta y celeste o blancas, pedunculadas y reunidas en grupos de seis o más, en verticilios sobre el raquis de inflorescencia (**Figura 7**). El fruto, al igual que las otras especies de la familia *Lamiaceae*, es típicamente un esquizocarpo consistente en lóculos indehiscentes que se separan para formar 4 mericarpios parciales denominados núculas, comúnmente conocidos como “semillas”, los cuales son monos pérmicos, ovales, suaves y brillantes, de color pardo grisáceo con manchas irregulares marrones en su mayoría y algunos blancos y miden entre 1.5 a 2.0 mm de longitud (Ayerza y Coates, 2005) (**Figura 8**).



Figura 7. Plántulas (izquierda) e inflorescencias de *Salvia hispánica* L (centro y derecha).



Figura 8. Semillas de chía (*Salvia hispanica* L) (4x) (Guiotto y col, 2011).

2. Estadísticas de producción

La Chía comenzó a comercializarse a nivel internacional a partir de los noventas. Se cultiva en Argentina, México, Bolivia, Paraguay y Australia. En 2011-2012 Argentina tuvo una producción de 35%. Mientras Australia, México, Bolivia y Paraguay participaron con 15% y 3 000 ha c/u (Busilacchi y col, 2015). Recientemente se incorporaron como productores Nicaragua y países del sudeste de Asia (Jamboonsri y col, 2012). La producción mundial ha crecido rápidamente, un ejemplo es Nicaragua, donde la producción de chía pasó de 5 000 quintales en 2013, a 180 000 quintales en 2014.

En el **Cuadro 5**, se muestra el comportamiento que ha tenido la chía, donde es claro el crecimiento en la superficie sembrada que ha tenido, así como el comportamiento del precio y del rendimiento por hectárea.

La producción en México se concentra en Jalisco y Puebla y se empieza a incursionar en nuevas zonas con potencial productivo, como se observa en el **Cuadro 6**. En Jalisco la producción se centra en los municipios de: Acatic, Cuquío, Ixtlahuacán del Río y Jamay, mientras en Puebla los municipios productores son: Atzitzihuatlán, Huaquechula, San Felipe Tepemaxalco y Tochimilco (SIAP, 2018).

3. Composición química y aspectos nutricionales de la semilla

La semilla de chía está compuesta de nutrientes, vitaminas, antioxidantes y ácidos grasos (**Cuadro 7**). La cantidad y calidad de los componentes puede variar por el sitio de cultivo, condiciones ambientales, disponibilidad de nutrientes, año de cultivo, por el tipo de suelo y clima (Ayerza y Coates, 2010). La chía es un alimento completo y funcional por: su contenido de antioxidantes (ácido clorogénico, ácido caféico,

Cuadro 5. Evolución de la producción de chía en México (SIAP, 2018).

Año	Superficie Sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Volumen de producción (t)	Valor de la producción (\$)	Rendimiento (t ha⁻¹)	Precio medio rural (\$ t⁻¹)
2006	15	15	37.5	292 500.00	2.5	7 800.00
2007	37	22	45.8	343 500.00	2.082	7 500.00
2008	20	20	60	312 000.00	3	5 200.00
2009	45	34	33.6	177 800.00	0.988	5 291.00
2010	2 329	2 329	2913.5	57 240 000.00	1.251	19 646.00
2011	2 750	2 750	3448.6	55 477 500.00	1.254	16 086.00
2012	5 097	5 097	2060.16	135 512 961.00	0.404	65 777.00
2013	18 155	17 915	8431.89	478 425 545.00	0.471	56 740.00
2014	16 721	16 515	9548.14	420 701 810.00	0.578	44 061.00

Cuadro 6. Distribución de producción de chía en México durante el ciclo primavera-verano de 2015 (SIAP, 2018).

Ubicación	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Costo (\$ t ⁻¹)	Valor de la producción (miles de pesos)
Jalisco	15 790	15 790	9 058	0.57	44 408.00	402 285.00
Puebla	460	460	391	0.85	34 659.00	13 562.00
Nayarit	281	261	97	0.37	49 793.00	4 830.00
San Luis P.	20	4	1	0.25	24 000.00	24.00
Guanajuato	150	0	0	0	0.00	0.00
Ags	20	0	0	0	0.00	0.00
Total	16 721	16 515	9 548	0.58	44061	420 701

Cuadro 7. Composición de semillas de chía (100 g de porción comestible)

Nutriente	Unidad	Valor
Proteína	(%)	15 a 25
Lípido total (grasa)	(%)	30 a 33
Hidratos de carbono	(%)	26 a 41
Fibra dietética	(%)	18 a 30
Ceniza	(%)	4 a 5
Calcio	mg	631
Potasio	mg	407
Magnesio	mg	335
Fósforo	mg	860
Selenio	µg	55.2
Cobre	µg	0.924
Hierro	µg	7.72
Manganeso	µg	2.72
Molibdeno	µg	0.2
Sodio	µg	16
Zinc	µg	4.58
Niacina	mg	6.13
Tiamina	mg	0.18
Rivoflavina	mg	0.04
Vitamina A	IU	44
Ácido α-linolénico	(%)	64.9 a 65.6
Ácido linoleico	(%)	19.8 a 20.3
Ácido palmítico	(%)	6.2 a 6.7
Ácido oleico	(%)	5 a 5.5
Ácido esteárico	(%)	2.7 a 3
Ácido oleico	(%)	7.75
Ácido margárico	(%)	0.1
Ácido nonadecanoico	(%)	0.1
Ácido nonadecenoico	(%)	0.2
Ácido araquidico	(%)	0.3
Ácido gadoleico	(%)	0.2
Ácido vaccénico	-	0.5
Ácido pentadecanoico	-	-
Ácido araquidónico	-	-
Ácido docosahexaenoico	-	-
Ácidos grasos saturados	(%)	9.3
Ácidos grasos poliinsaturados	(%)	85.4
PUFA/SFA	(%)	8.7

miricetina, quercetina y kaempferol flavonoles), niveles seguros de metales pesados, ser libre de micotoxinas y por no contener gluten (Mohd, 2012).

La chía es la fuente vegetal con el mayor contenido de ácidos grasos esenciales, su aceite contiene propiedades físico-químicas de interés para la industria alimentaria, considerado como ingrediente alimentario potencial debido a sus beneficios en salud humana por contener 85.4% de ácidos grasos poliinsaturados (Segura y col, 2014).

4. Propiedades nutracéuticas de la semilla

La semilla de chía por su contenido de aceite se considera como “alimento funcional” porque además de contribuir a la nutrición humana, aumenta el índice de saciedad, previene enfermedades cardiovasculares, trastornos inflamatorios y nerviosos, así como la diabetes. Absorbe 27 veces su peso de agua (Muñoz y col, 2012), por su contenido de fibra dietética soluble, ayudando a contrarrestar problemas de estreñimiento, divertículos y cáncer de colón (Alvarado, 2011). Para esto ingerir de 15 a 25 g de semillas remojadas en agua quince minutos, durante 20 días (Bernal y col, 2015).

Una suplementación de 12 semanas con 35 g de harina día-1 de chía en la dieta de humanos se logró reducir significativamente de peso y circunferencia de cintura, gracias a su contenido de fibra dietética que actúa dando efecto de saciedad y disminuyendo la entrada calórica por la alta viscosidad del gel formado en el tracto gastrointestinal, así mismo por el alto contenido de Omega 3 que suprime el apetito, mejorando la oxidación de lípidos y el gasto de energía (Toscano y col, 2015).

La ingesta continua de chía durante 12 semanas ayuda a diabéticos a controlar el nivel de glucosa después de ingesta de comida (glucemia postprandial), mejorando la presión y coagulación de la sangre (Vuksan y col, 2010). El aceite de chía es usado

como agente adyuvante hidratante para la piel pruriginosa, característica de personas con deficiencia renal y diabetes, mejorando la función de barrera epidérmica de permeabilidad e hidratación de la piel (Jeong y col, 2010).

C. PROCESAMIENTO TECNOLÓGICO DE CEREALES Y LEGUMINOSAS

Es bien sabido que para el consumo humano de los diferentes granos cultivados en el mundo, es necesario darles un procesamiento previo a su consumo, esto con la finalidad de disminuir algunos componentes en el grano que pudieran tener repercusiones en la salud del consumidor, o bien hacen que el grano no presente una buena aceptabilidad por parte de los consumidores como lo son buen sabor, buena textura, entre otros. Es por ello que se han utilizado, desde tiempos ancestrales, procesos donde está involucrada la temperatura, para disminuir dichos componentes hasta un nivel donde no sean dañinos al ser consumidos y además, para darle una mejora en la aceptabilidad del grano. Dentro de los procesos típicos y ancestrales se encuentran el tostado, la cocción, la nixtamalización, el reventado; y más recientes como lo es la extrusión, la micronización, microondas y la germinación; ésta última, es un bioproceso el cual aumenta a producción de compuestos bioactivos en las semillas, lo cual le dan un mayor potencial para la prevención de algunas enfermedades de las denominadas crónico degenerativas.

1. Extrusión

La palabra extrudir proviene del latín “*extrudere*” que significa empujar o presionar hacia afuera (Fellows, 1990). El primer registro sobre su aplicación es de 1797 cuando Joseph Bramah usó un artefacto con un pistón para elaborar tubos de plomo sin costura. A mediados de 1930’s los extrusores se utilizaron para mezclar harina y agua y formar productos de pasta; años después esta tecnología se utilizó para producir el primer “cereal instantáneo para el desayuno” (harina de avena precocida) (Bhattacharya y Padmanabhan, 1994). La cocción por extrusión generalmente se refiere a la combinación del calentamiento de productos en el extrusor para crear un producto cocinado y con forma. Materiales crudos, como harinas, almidones, proteínas, sal, azúcar y otros ingredientes minoritarios son mezclados, cortados, cocinados para formar una masa semejante a un plástico. El calor se aplica directamente por inyección de vapor o indirectamente a través de una chaqueta que se encuentra en el extrusor o por la conversión de la energía mecánica. La temperatura final del proceso puede ser hasta de 230 °C; el tiempo de residencia es relativamente corto con tiempos de 10-60 s. La cocción por extrusión se reconoce como un proceso de temperatura alta - tiempo corto (HTST por sus siglas en inglés) (Mercier, 1993). Este procesamiento minimiza la degradación de nutrimentos por la acción del calor y mejora la digestibilidad por la gelatinización y desnaturalización parcial/total de almidón y proteínas, respectivamente; también destruye la mayoría de los factores antinutricionales de la materia prima (Fellows, 1990).

2. Proceso de extrusión

La extrusión puede definirse como un proceso que involucra el transporte de un material, bajo ciertas condiciones controladas, forzándolo a pasar por una boquilla de

una geometría específica y con un caudal masivo preestablecido. Durante este transporte se produce la cocción parcial o total de los componentes de la mezcla (González, y col, 2002). La extrusión es un proceso que combina varias operaciones unitarias, incluyendo mezclado, cortado, calentamiento, enfriamiento y formación del producto. Involucra compresión y trabajo sobre un material para formar una masa semisólida bajo condiciones controladas y, finalmente, se forza a pasar esta masa semisólida a través de un área diminuta a una velocidad determinada.

La cocción por extrusión es una forma especializada, y única en el procesado de materiales amiláceos debido a que se trata de una cocción a niveles de humedad relativamente bajos, comparado con el horneado convencional o la cocción de masas y pastas. Los niveles normales de humedad utilizados están en el intervalo de 10-40 %; sin embargo, a estos niveles de humedad el material se transforma en un fluido dentro del extrusor. Bajo estas condiciones las características físicas de las materias primas, tales como tamaño de partícula, dureza y el grado de plastificación alcanzado durante el proceso de extrusión llegan a ser determinantes para la transformación final del material. Otra característica de la cocción por extrusión es que, debido a los esfuerzos de corte que se desarrollan durante el transporte del material en el extrusor, la temperatura se eleva rápidamente (conversión de energía mecánica en calor por flujo viscoso) y así la estructura del material sufre transformaciones profundas en pocos segundos. La masa de partículas, generalmente harinas de cereales y/o leguminosas, hidratada apropiadamente, se convierte en un fluido de viscosidad alta. A medida que el fluido se transporta los elevados esfuerzos de corte en combinación con temperatura alta transforman a los elementos estructurales del material (gránulos de almidón, estructuras proteínicas). En la elaboración de productos expandidos tipo

“snack” el almidón no solo pierde la estructura cristalina sino también desaparece la mayor parte de la estructura granular y los componentes del gránulo (moléculas de amilosa y amilopectina) se dispersan en la matriz. Durante la producción de proteína vegetal texturizada (PVT) las proteínas (cuerpos proteínicos) son dispersadas y las fracciones proteínicas desnaturalizadas, alineándose en las corrientes de flujo, de esta manera se facilita la formación de nuevos enlaces entre cadenas (“cross links”) los cuales otorgan al producto la resistencia a la disgregación por hidratación durante la preparación del alimento del que forma parte la PVT. En la cocción por extrusión de materiales amiláceos, el término “grado de cocción” (GC) implica, no solo la pérdida de la estructura cristalina (mayor digestibilidad), sino también el grado de destrucción de la estructura granular del almidón. El proceso de extrusión es influenciado por (1) Parámetros del proceso (materia prima, contenido de humedad en el material crudo, velocidad del tornillo, y temperatura de cilindro); (2) Parámetros del sistema (distribución del tiempo de residencia, energía mecánica específica) y (3) propiedades del producto (expansión radial, densidad del producto, propiedades químicas y mecánicas) (Ganjyial y col. 2003).

3. Componentes de un extrusor

El extrusor básico de tornillo consiste en un tornillo o tornillos rotando en un cilindro al cual encajan casi exactos, siendo movilizadas por un motor a través de una transmisión para reducir o variar la velocidad (**Figura 9**). El mecanismo de alimentación está compuesto por una tolva para recibir el material a ser extrudido y de un tornillo alimentador localizado horizontal verticalmente. Para permitir un mejor flujo, el alimentador está equipado con un agitador que ayuda a mantener constante la alimentación lo cual es esencial para el funcionamiento adecuado del extrusor y

homogeneidad en la calidad del producto extrudido (Harper, 1998). El tornillo es el componente principal de un extrusor, los tornillos de extrusión son largos en relación a su diámetro ($L/D > 10$). Consta de tres secciones cada una con una función: (1) Sección de alimentación, (2) Sección de compresión y (3) Sección de medición o cocimiento. La sección de alimentación se caracteriza por poseer alabes hondos que adaptan fácilmente los ingredientes crudos y los transportan hacia delante. Durante el proceso de transporte los materiales alimentados son transformados en una masa continua, el aire es expulsado y los espacios vacíos son eliminados, haciendo que los alabes se llenen completamente (Harper, 1998). En la sección de compresión o transición los ingredientes húmedos se convierten en una masa termoplástica por la gelatinización del almidón e hidratación de la proteína; esta zona se caracteriza por la disminución de la altura de las hélices o restricciones internas consistentes de platos que restringen el área de sección transversal del tornillo al flujo. Estas restricciones incrementan la relación de esfuerzo de corte y la energía suministrada al alimento, resultando en un incremento en la temperatura (Fellows, 1990).

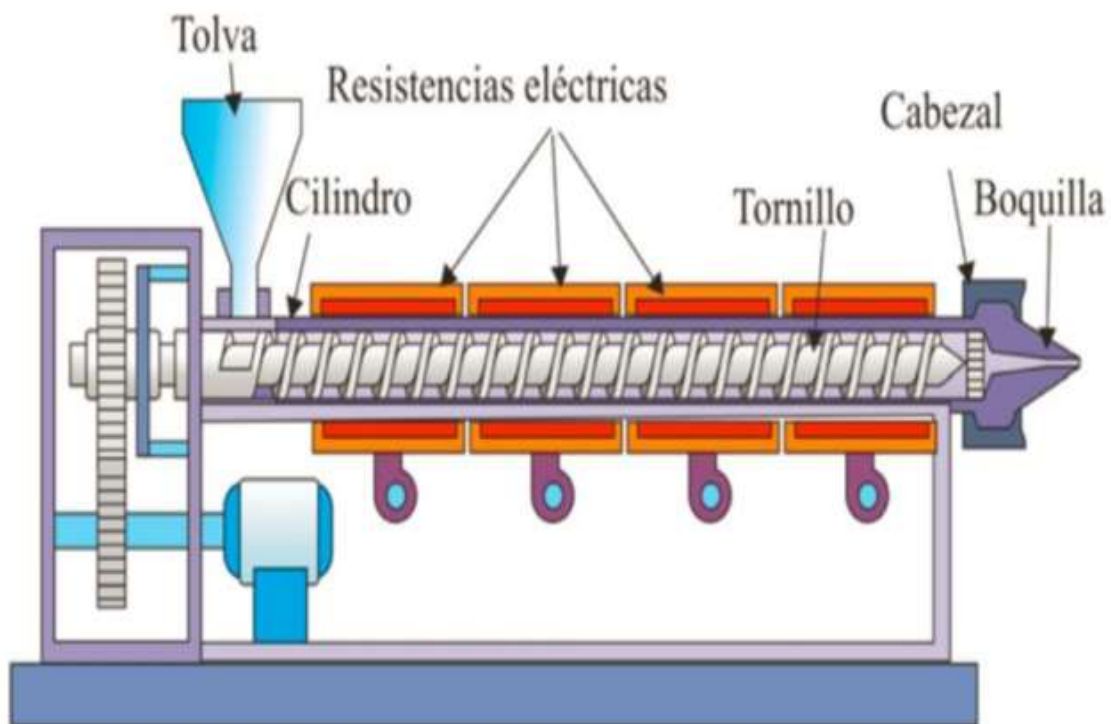


Figura 9. Extrusor de tornillo simple (Harper, 1998).

La sección de medición o cocimiento es aquella en donde el flujo se somete a fuerzas de presión, compresión y velocidad de corte altas. Esta zona se caracteriza por hélices poco profundas y con una disminución de tornillo. En esta sección la masa termoplástica se transforma en una masa plástica, como resultado de la conversión de la energía mecánica en energía térmica, la acción de corte en esta zona se homogeniza y adiciona más calor a la mezcla (Fellows, 1990). Esta zona es quizás, la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogeneizarlo y hacerlo pasar a través del dado a presión constante. El tornillo y el cilindro pueden ser segmentados o unitarios. Típicamente el tornillo está montado en un eje, en donde se encuentra engranado por llaves. El cilindro puede tener una cubierta reemplazable, y puede ser liso o con ranuras (para afectar el flujo y generación de calor). Frecuentemente hay canales barrenados a través del cilindro para flujo de fluidos que transfieren calor o se pueden utilizar calentadores externos separados. El producto emerge por un dado (resistencia) con uno o más orificios del tamaño adecuado para cada aplicación en particular. El dado de extrusión sirve principalmente como una resistencia al flujo, influye en la conducta de flujo del alimento dentro del tornillo y contribuye a la texturización y forma del producto por el corte desarrollado en el dado mismo (Harper, 1998).

4. Clasificación de los extrusores

Los extrusores se pueden clasificar en tres tipos principales: (1) Pistón, (2) Rodillos y (3) Tornillo. Los extrusores de pistón, son los más simples en diseño, se utilizan principalmente para dar forma a un material determinado. Consisten en un pistón o una batería de pistones, los cuales depositan cantidades muy precisas de material en

una banda transportadora. Estas máquinas son comúnmente usadas en la industria de confitería, por ejemplo para depositar el relleno en los chocolates (Dziezack, 1989).

Los extrusores de rodillos, utilizados también para dar forma, consisten de dos rodillos contra-rotatorios que giran a velocidades iguales o diferentes y que tienen superficies lisas o perfiladas. El claro entre los rodillos puede cerrarse para comprimir el material que pasa a través de la unidad, o bien el extrusor se fabrica en una variedad de configuraciones y con capacidad para formar cilindros rellenos o placas. Los extrusores de tornillo constan de tornillos sencillos, dobles o múltiples, los que rotan en el interior de un cañón estacionario para empujar el material hacia y a través de un orificio de un dado (Dziezack, 1989). Los extrusores se clasifican también de acuerdo al tipo de construcción en extrusores de tornillo simple y extrusor de tornillos gemelos. Los principios de operación son similares en los dos tipos.

a. Extrusor de tornillo simple.

En éste, el canal del tornillo no se encuentra dividido, sino que es continuo a lo largo del tamaño del tornillo. En lugar de ser empujado por las aletas del tornillo, el producto es arrastrado por el canal del tornillo por el movimiento relativo del tornillo y la superficie de barril-presión y flujo son generados por el corte. El resultante “flujo de arrastre” es más o menos la mitad de la capacidad volumétrica del tornillo, la mitad del producto es dejado atrás. Las aletas del tornillo redirigen la mayoría del flujo tangencial de arrastre a una dirección hacia abajo. La porción restante del flujo de arrastre se mueve a lo largo de la dirección del canal, originando una circulación del producto en el canal, importante para la transferencia de calor y mezcla. Cuando se genera presión en el tornillo, otro flujo se combina con el flujo de arrastre; debido a que el canal es continuo a lo largo del tornillo, la presión en la descarga hace que el producto quiera

fluir hacia atrás, sustrayéndolo del flujo de arrastre. Por lo tanto, la capacidad actual de un extrusor de tornillo único oscila de la mitad de la capacidad volumétrica a mucho menos a presiones altas. La eficiencia de bombeo está afectada por la geometría del tornillo y por la viscosidad del material (Dziezack, 1989).

b. Extrusor de doble tornillo

Los extrusores de doble tornillo o tornillos gemelos están compuestos de dos tornillos que tienen rotación dentro de un cilindro simple. De este modo, es posible tener cuatro configuraciones para la dirección de la rotación y posición de los tornillos. La configuración entrelazada es más eficiente ya que la función de los dos tornillos es la de una bomba de desplazamiento positivo, incrementa el flujo y reduce los depósitos de material en el extrusor. Estos extrusores pueden estar contruidos en varios diseños, el diámetro puede ser igual o desigual y cónico. El ancho del canal y el espesor del alabe también puede ser variable. En algunos diseños de extrusores se utilizan elementos calefactores a base de resistencias eléctricas, en otros se emplea vapor de agua para calentar directamente el cilindro. El calor también se genera en el material por fricción, causada por la acción del tornillo y las barras interiores del cilindro (Fellows, 1990).

5. Cambios en los componentes de los alimentos durante el proceso de extrusión

Los materiales crudos se someten a cambios químicos y transformaciones estructurales. Los cambios químicos que ocurren incluyen conversión (gelatinización y fusión) de almidones, desnaturalización y entrecruzamiento de proteínas, formación de complejos de lípidos y degradación de vitaminas y pigmentos.

a. Cambios en proteínas

Físicamente, la extrusión convierte los cuerpos proteínicos en una matriz homogénea. Químicamente, el proceso recombina las proteínas de reserva en fibras estructuradas. Además, estos procesos producen alteraciones nutrimentales en las proteínas (Stanley, 1998). La extrusión térmica expone a las proteínas a temperaturas y presiones altas y esfuerzos mecánicos intensos, los que se combinan para convertir a los materiales proteínicos en una masa plástica continua. A medida que esta masa viaja a través del extrusor, las características del flujo hacen que las cadenas de proteínas se alineen en capas paralelas al tornillo, formando una matriz tridimensional de polipéptidos parcialmente asociados, entre la cual se encuentra atrapada el agua. Cuando la presión se libera a la salida del dado, se busca una vaporización de la humedad, lo que resulta en la formación de partículas de proteína fibrosas y porosas. Esta estructura conserva la capacidad de retener agua debido a la disposición de los grupos reactivos en el espacio (Stanley, 1998).

Las condiciones del procesamiento por extrusión (temperatura alta y contenido de humedad bajo) favorecen la reacción de Maillard de grupos amino con azúcares reductores que resultan en pérdidas de aminoácidos (disminución de Lisina disponible) y formación de compuestos coloreados. Los cambios químicos durante el cocimiento por extrusión se deben en mayor parte a la forma e intensidad del tratamiento térmico (Ilo y Berghofer, 2003).

Ilo y Berghofer (2003) investigaron la degradación cinética de aminoácidos inestables durante el cocimiento por extrusión de fragmentos de maíz. Estudiaron además, la estabilidad de lisina en cocimiento por extrusión de fragmentos de maíz fortificados con Lisina. Los experimentos mostraron una reacción de primer orden para

la pérdida de Lisina; la constante de primer orden fue dependiente, en mayor medida, de la temperatura del producto y del contenido de humedad. La velocidad del tornillo no tuvo influencia. La energía de activación de pérdida de Lisina, Arginina y Cisteína fue de 127, 68 y 76 KJ/mol, respectivamente. La fuerza de corte afectó significativamente el grado de pérdida constante de aminoácidos en cocimiento por extrusión.

b. Cambios en almidón

La extrusión incluye la aplicación de tratamientos térmicos, presiones altas y fuerza de cizalla en el alimento; este tratamiento termomecánico induce algunos cambios en la molécula de almidón, como la fusión de cristales, rompimiento de gránulos y disrupción molecular de amilopectina. El grado de degradación macromolecular es función de los parámetros de extrusión: temperatura, humedad del alimento, tipo de almidón y velocidad del tornillo dentro del extrusor; a su vez, el número de enlaces hidrolizados incrementa con el aumento de la temperatura de extrusión y la disminución de la humedad inicial en el alimento (Davison y col, 1984).

Los polímeros de almidón extrudidos son degradados en compuestos de menor peso molecular. El análisis de contenido de β -dextrina límite, obtenida de la hidrólisis del almidón por β -amilasa, en almidón extrudido, revela que la distribución de tamaño es diferente, indicando una variación muy grande en la estructura interna de la amilopectina sometida a extrusión (Colonna y col, 1998). Además, se ha encontrado que se conserva la proporción de enlaces α -1-6 y α -1-4 en los componentes amilosa y amilopectina del almidón extrudido en comparación con el almidón nativo. Tanto la amilosa como la amilopectina tienen la misma susceptibilidad a degradación

macromolecular; se sugiere que los puntos extremos de ramificación de amilopectina son los más susceptibles a ruptura hidrolítica en almidones extrudidos con un contenido de humedad de 20-25 % a temperaturas dentro del extrusor de 121-127 °C (Davison y col, 1984). Los enlaces α -(1-4) de amilosa parecen ser cortados preferencialmente durante la extrusión, atribuido a la diferenciación en la estructura de los componentes de almidón y no por ésteres de ácido fosfórico unidos a los puntos extremos de amilopectina (Colonna y col, 1998).

c. Cambios en otros componentes

Las operaciones del extrusor pueden seleccionar parámetros para los factores primarios y de estos factores determinar un grupo secundario de factores; energía mecánica específica (EME), temperatura de masa o producto (TP) y presión. Estos factores influyen en la viscosidad del alimento dentro del barril del extrusor, además el tiempo de residencia del material en el extrusor y el corte mecánico aplicado al alimento. Las variaciones causadas por la composición de alimento y por el procesamiento previo de los materiales alimenticios son fuentes importantes de la variación experimental (Harper, 1986; Riaz, 2000).

La cocción por extrusión es preferible a otras técnicas de procesamiento de alimentos en términos de un proceso continuo con alta productividad y una significativa retención de nutrientes, debido a las altas temperaturas y el tiempo corto requerido (Guy, 2003), la extrusión desnaturaliza enzimas indeseables e inactiva algunos factores antinutricionales (inhibidores de tripsina, taninos y fitatos), esteriliza el producto terminado y retiene los colores naturales y sabores de los alimentos (Fellows, 2000; Bhandari y col, 2001). La cocción por extrusión aumenta la fibra dietaría total

harinas de cebada, el aumento tanto en fibra dietaria insoluble y fibra dietaria soluble contribuyen al aumento en el contenido de fibra dietaria total (Vasanthan y col, 2002).

La extrusión puede prevenir la liberación de ácidos grasos libres debido a la desnaturalización de las enzimas hidrolíticas (Camire y col, 1990). La oxidación lipídica tiene un impacto negativo en las cualidades sensoriales y nutrimentales en los alimentos, y estos probablemente no se lleven a cabo durante la extrusión debido al tiempo muy corto de residencia.

Con respecto a los cambios ocurridos en las vitaminas se ha observado que la degradación térmica es el factor más importante que contribuye a las pérdidas del β -caroteno durante la extrusión. Las temperaturas del barril altas (200 °C comparadas con 125 °C) reducen todos los trans - β -caroteno en la harina de trigo en un 50 % (Guzman-Tello y Cheftel, 1990). El ácido ascórbico (vitamina C) es también sensible al calor y a la oxidación, esta vitamina disminuye en harina de trigo con es extrudida con altas temperaturas de barril y muy baja humedad (10 %) (Andersson y Hedlund, 1990), en resumen, la retención de vitaminas durante la extrusión disminuye cuando se aumenta la temperatura, la velocidad del tornillo y la entrada de energía específica, también disminuye con la disminución de humedad, la velocidad de alimentación y el diámetro del dado.

La extrusión puede mejorar la absorción de minerales al reducir otros factores que inhiben su absorción. Los fitatos pueden formar complejos insolubles con minerales y eventualmente pueden afectar la absorción de minerales negativamente (Alonso y col, 2001). La extrusión hidroliza los fitatos para liberar las moléculas de fosfato. La extrusión de chícharo y frijol resulta con la hidrólisis de los fitatos, que explica la más alta disponibilidad de los minerales después del procesamiento (extrusión a altas

temperaturas) (Alonso y col, 2001). La extrusión no afecta significativamente la composición de los minerales en semillas de chícharo y frijol.

6. Producción de botanas por extrusión

La elaboración de botanas de maíz representa una oferta con un mercado alto para las industrias de frituras en el país y una excelente opción para mejorar el contenido de nutrimentos. En la actualidad se utilizan industrialmente diversos tipos de maíz para la elaboración de botanas. Una de las características importantes de las botanas es su textura y esta tiene que ver con el índice de expansión que presenta así como las variables del proceso de extrusión influyen en ésta (Gragen y Wang, 1997).

Extrusión de alimentos botana incluye someter los granos seleccionados a una variedad de complejos procesos físicos que producen botanas con variadas formas y texturas (White, 1994). En la extrusión de alimentos botana, los cereales y otros ingredientes se mezclan y se cocinan a presión, cizallamiento a alta temperatura en un tubo, el cual es llamado barril. La masa resultante es forzada a través de una matriz, cortado en piezas individuales y asume las diversas formas que los consumidores han llegado a esperar en los pasillos de los mercados de botanas (Harper, 1981).

Ingredientes novedosos, de última generación de tecnología de extrusión y métodos innovadores de procesamiento se combinan para producir nuevos productos botana con cada vez mayor atractivo para la salud de los consumidores conscientes de que están buscando diferentes texturas y sentir una sensación en la boca con comodidad (Pamies y col, 2000).

Con el fin de fabricar productos que sean aceptables en un mercado muy competitivo, la extrusión de productos botana exige el control de muchos parámetros que, directa o indirectamente influyen en la aceptabilidad de los consumidores. Las

características del producto final son en parte resultados de los parámetros críticos específicos inducidos en las materias primas. Los parámetros críticos que en parte se afectan a la humedad, la expansión, la solubilidad, absorción, color, sabor y textura del producto final son (Huber, 2001).

D. ALIMENTOS BOTANA

1. Aspectos generales

Las botanas son una industria que abarca diversos mercados, amplios rangos de edad y un alimento que se consume en cualquier momento y situación desde las reuniones de amigos, el recreo, el cine, entre otras. Las botanas en México al igual que en otros países del mundo ha sido un producto que cubre las necesidades del consumidor con respecto a: precio, accesibilidad, amplio surtido en sabor y tamaño, disponible en muchos puntos de ventas, no es exclusivo de una clase social y es para todas las edades (Arroyo y col, 1999).

De acuerdo con la NOM-187-SSAI/SCFI-2002, las botanas son los productos de pasta de harinas, cereales, leguminosas, tubérculos o féculas; así como de granos, frutas, frutos, semillas o leguminosas con o sin cascara o cutícula, tubérculos; productos nixtamalizados y piel de cerdo, que pueden estar fritos, horneados, explotados, cubiertos, extrudidos o tostados; adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales y aditivos para alimentos; sin embargo, por el incremento de la demanda de estos productos, la mayoría de las grandes industrias botaneras, han modificado los ingredientes y elaboración; actualmente estos productos están elaborados para ser menos perecederos y más apetecibles con relación a los alimentos naturales. Muchas veces son clasificados como "comida basura" al tener

poco o ningún valor nutricional, exceso de aditivos, grasas y no favorecer a la salud general, contribuyendo así al gran problema de salud pública en México y en el mundo; la obesidad.

Las botanas (snacks en inglés) son un tipo de alimento que en la cultura occidental no es considerado como uno de los alimentos básicos de la dieta diaria (desayuno, almuerzo o cena). Generalmente se utilizan para satisfacer el hambre temporalmente, proporcionar una mínima cantidad de energía para el organismo, o simplemente por placer (Limón, 2006).

2. Producción y consumo

El mercado de las botanas es un mercado muy redituable, prueba de ello son las grandes compañías líderes que cada día están innovando y lanzando productos que satisfagan todos los paladares (Taddei, 2006).

La mayoría de los productores de botanas son empresas medianas y pequeñas diseminadas en toda la república, algunos tienen marca comercial, otros maquilan para empresas más grandes y hay cientos de fabricantes caseros, de acuerdo con el costo por temporada de la materia prima. Parte del éxito del sector botanero consiste en las complejas redes de distribución de las compañías líderes, que abarcan las localidades más remotas del país (Arroyo y col., 1999). La investigación realizada en el 2011 por TNS Research International y Kantar Worldpanel, reportó que 7 de cada 10 hogares compraban alguna botana, especialmente para niños, 37% la adquiría los fines de semana y llegaban a gastar 312 pesos mensuales. El volumen de producción de botanas en México ha crecido de 420,000 toneladas en el año 2008 a 450,000 toneladas en el 2010 (Hernández y Bustamante, 2012).

El consumo de botanas promedio anual por mexicano en el año 2000, fue de 2.3 kg, mientras que en el año 2010 aumentó a 4 kg, representando un incremento del 70 %. Este aumento se reflejó en las ventas anuales, que en el 2010 se sumaron 3 mil millones de dólares, triplicando las ventas del año 2000 (Canacintra, 2012). Tan solo en el último bimestre del 2010 se incrementó 12 % comparado con el mismo periodo del 2009 (Hernández y Bustamante, 2012). Existen 130 empresas fabricantes establecidas y registradas en el Quinto Directorio Nacional de Fabricantes de Botanas, de las cuales se estima que el 6 % son empresas grandes, 14 % son empresas medianas, 20 % son empresas pequeñas y 60 % son micro empresas. La mitad de las empresas fabricantes se encuentran localizadas en la ciudad de México (20 %), Jalisco (17 %) y Nuevo León (15 %), la otra mitad se encuentran repartidas en el resto del territorio nacional. Las empresas grandes y medianas generan el 80 % del valor de la industria, las pequeñas y micro empresas generan el 20 % del valor. Se estima que la industria de las botanas generan 50,000 empleos directos y los indirectos pueden sumar alrededor de 150,000 (Hernández y Bustamante, 2012). En el **Cuadro 8**, se muestra la distribución tipos de botanas por categorías. Actualmente las botanas proporcionan aproximadamente el 30 por ciento de las calorías diarias en muchos países de América. La posición establecida de los aperitivos en la dieta se demuestra por el continuo crecimiento en las ventas (Riaz, 2006).

Cuadro 8. Distribución de botanas por categoría. (CANACINTRA, 2015).

Tipo de botana	% de distribución
Frituras de trigo y maíz	36
Papas fritas	27
Totopos y tostadas	19
Otros productos inflados / Horneados	11
Cacahuates y semillas	4
Chicharrón de cerdo	3

3. Clasificación

Antiguamente la industria alimentaria brindaba pocos productos a grupos de personas cercanas a la fuente de producción; en la actualidad se ofrece una amplia gama de productos a muchas más personas. Por otro lado, para lograr tal desarrollo, la industria se enfrentó a problemas en relación a la vida de anaquel de la materia prima, entre otras, los cuales han ido resolviendo de manera ingeniosa y gradualmente. La industria botanera apoyándose en la innovación ha resuelto dichos problemas; con la introducción de tecnología y materiales que han sido un beneficio para el sector; así se dio pie a la creación de diferentes botanas. Existen muchas formas de clasificar a las botanas, los fabricantes de éstas utilizan tres términos principales para identificarlos:

a. Botanas de primera generación

En esta categoría se sitúan todos los productos naturales utilizados para botana, como nueces, papas fritas y palomitas. En ellas se destacan claramente dos inconvenientes: la materia prima es perecedera, con una vida de anaquel muy corta de 1 a 3 meses donde los empaques “abiertos” ocasionaban también una vida corta en el producto terminado (Riaz, 2006).

b. Botanas de segunda generación

La mayoría de las botanas actuales están incluidas en esta categoría. Las botanas de un solo ingrediente como los totopos o chetos y las botanas directamente expandidas se sitúan en esta categoría. Se llaman productos directamente expandidos porque no requieren procesamiento adicional después de la extrusión para completar la expansión del producto, y se dice que son los productos más fáciles de hacer con

un extrusor (Sevatson y Huber, 2000). Una vez extrudidos, los productos directamente expandidos pueden terminarse al hornearlos o freírlos (Huber, 2001).

c. Botanas de tercera generación

En esta categoría se incluyen las botanas y pellets de múltiples ingredientes, así como las botanas que se hayan cocinado mediante extrusión. También llamadas productos indirectamente expandidos, productos intermedios o semiproductos, aunque el producto obtenido no se encuentra listo para ser consumido. La presentación final viene comúnmente después de un freído en aceite caliente o expansión con aire caliente. Debido a su alta estabilidad, al almacenamiento y alta densidad aparente, las botanas de tercera generación no expandidas presentan un interesante mercado potencial (Rías, 2006). Los pellets obtienen su forma por un “dado” utilizado a temperaturas bajas para prevenir la expansión (Moore, 1994). Generalmente contienen al menos 60% de almidón para alcanzar la expansión máxima durante el proceso de post-extrusión (Sevatson y Huber, 2000). Una variante más reciente de este proceso es la expansión por radiación infrarroja o calentado con microondas (Huber, 2001).

4. Elaboración de botanas saludables

El mercado de comida rápida está en constante cambio con respecto a los tipos de producto, y aunque la mayoría de aperitivos no son consumidos principalmente por sus nutrientes, muchas botanas se fabrican pensando que sean lo más nutritivamente posible. La industria botanera está experimentando cambios extraordinarios desde el punto de vista del consumidor porque quieren botanas al gusto, no sólo sabrosas, sino también que posean un olor agradable, con buena textura y con buena apariencia, y ofrecer al consumidor una sensación como “hecho en casa” y sentirse frescas. Las

botanas pueden ser procesadas por una variedad de métodos y técnicas. Desde el invento de las papas fritas por el chef George Crum, en 1853, hasta llegar al uso de tecnologías como la extrusión que permiten ofrecer una gran variedad de productos. Los productos directamente expandidos o también llamados de segunda generación, no requieren un procesamiento adicional después de la extrusión para completar la expansión del producto. El inflado de los productos es bastante simple, los ingredientes secos y el agua se mezclan en el extrusor y se calienta por encima de 100 °C, donde el agua sigue siendo líquida, debido a las altas presiones en el interior del cilindro del extrusor. Una vez que el producto llega a la abertura de la boquilla, el agua sobrecalentada se vaporiza cuando se pone en contacto con la atmósfera exterior. Esta vaporización rápida produce un estiramiento en la matriz de almidón del producto, resultando un producto expandido, poroso, con un tamaño característico, forma y textura (Moore, 1994). La forma final del producto será determinada por la configuración del dado utilizado y la velocidad de corte en la abertura del dado o matriz (Matson, 1982). Una vez extrudidos, estos productos expandidos pueden ser terminados mediante horneado o freído (Huber, 2001). Existen nuevas materias primas que contienen propiedades nutraceuticas y funcionales. Se están introduciendo en el mercado todos los días para los productos de comida rápida. Los snacks se pueden preparar mediante una combinación de diferentes materias primas que contienen diferentes propiedades. El papel de las botanas para los que buscan un estilo de vida saludable está desarrollándose (Riaz, 2006).

IV. JUSTIFICACIÓN

México es actualmente el país que ocupa el primer lugar en obesidad infantil, y en 30 años se ha duplicado el número de obesos, y el 70 % de su población adulta tiene problemas con esta situación porque disminuye la expectativa de vida y aumenta el riesgo a padecer enfermedades como: diabetes, hipertensión, dislipidemias, enfermedades cardiovasculares, ciertos tipos de cáncer, entre otras. La obesidad es un problema creciente de salud pública en México al grado que hoy, siete de cada 10 adultos tienen exceso de grasa corporal, con los consiguientes riesgos de salud, los altos costos en la atención de enfermedades y la disminución de la productividad. Lo anterior es debido principalmente a la poca actividad física y los malos hábitos alimentarios, principalmente asociados con el consumo de alimentos chatarra entre los cuales se encuentran las botanas. Desafortunadamente la mayor parte de la población no toma conciencia del efecto que tiene el consumo de ciertos productos poco saludables y sin embargo, siguen siendo parte de su dieta, es por ello que es necesario el estudio y elaboración de botanas funcionales, que permitan una mejor calidad de vida y que ayuden a prevenir enfermedades como la obesidad y la diabetes.

Debido a la importancia del consumo de alimentos nutritivos y saludables para preservar y mantener la salud y del sector que representan las botanas en la producción alimentaria se propone desarrollar una botana, evaluando su calidad para encontrar las mejores condiciones de proceso con la intención de competir sensorial, nutricional y funcionalmente y proponer una alternativa de mejoramiento a las botanas comerciales, mediante la tecnología de extrusión a partir de maíz (*Zea mays* L) azul y chía (*Salvia hispánica* L).

V. HIPÓTESIS

La botana saludable de valor nutricional y nutracéutico alto, elaborada a partir de una mezcla de maíz azul y chía con condiciones optimizadas de extrusión, presenta características físicas, fisicoquímicas, morfométricas y de textura, adecuadas para una botana directamente expandida o de segunda generación.

VI. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Producir una botana saludable, sensorialmente aceptable, de valor nutricional / nutracéutico alto, a partir de una mezcla de maíz azul y chía, aplicando la tecnología de extrusión.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Optimizar el proceso de extrusión para la obtención de una botana saludable (botana extrudida expandida optimizada, BEEO), con buenas características de expansión y textura, a partir de una mezcla de maíz azul y chía
2. Evaluar las características físicas, fisicoquímicas, morfométricas y de textura de la BEEO.
3. Evaluar calidad nutricional y digestibilidad proteínica *in vitro* de la BEEO.
4. Evaluar la capacidad antioxidante de la BEEO.
5. Evaluar niveles de compuestos fenólicos (compuestos fenólicos totales, flavonoides totales, taninos condensados, antocianinas totales) en la BEEO.
6. Evaluar sensorialmente la BEEO.

VII. MATERIALES Y METODOS

A. MATERIALES

Se utilizaron maíz (*Zea mays* L) azul y chía (*Salvia hispánica* L), los cuales fueron obtenidos del mercado municipal de Culiacán, Sinaloa.

B. METODOS

1. Características físicas/fisicoquímicas y composición química de las semillas de maíz azul y chía

a. Dimensiones (largo, ancho y grosor)

Se evaluó longitud, anchura y grosor, utilizando un vernier Scala modelo UNOX (Metro Mex, S.A. México, DF). Las mediciones se realizaron en 25 semillas de chía seleccionadas al azar. La determinación se llevó a cabo por triplicado (Milán-Carrillo y col, 2002).

b. Peso de 1000 granos / hectolítrico

Se determinó pesando 1,000 granos, tomados al azar de un lote de semillas limpias, en una balanza OHAUS (Mod TP2KS, Seedburo Equipment, Co., EUA). La prueba se realizó por triplicado.

Se cuantifico según el procedimiento 55-10 de la AACC (1995) utilizando una microescala. Un recipiente de volumen conocido (1 L) se llenó de semillas y se pesó en una balanza analítica. El peso hectolítrico se obtuvo al dividir el peso de los granos entre el volumen del recipiente y relacionándolo a un volumen de 100 L (kg/hL). La prueba se realizó con diez repeticiones.

2. Características fisicoquímicas

a. Diferencia total de color (ΔE)

Se utilizó la metodología reportada por Reyes-Moreno y col (2002). El color de las muestras se determinó en un colorímetro Minolta Chroma-Meter mod CR-210 (Minolta LTD, Japón). La determinación de color se basa en el efecto triestímulo, donde **L** mide la brillantez y varía de 100 para un blanco perfecto a cero para negro. Las dimensiones de cromaticidad son dadas por los parámetros **a** y **b**. El valor positivo de **a** está asociado al color rojo y el negativo con el verde. El valor positivo de **b** está asociado al color amarillo y el negativo con el azul. Para la evaluación del color se utilizaron aproximadamente 100 g de muestra, la cual se colocó en una tapa de caja Petri de vidrio Kimax de 15 cm de diámetro y se midieron los parámetros correspondientes a **L**, **a** y **b**. Se usó un mosaico blanco como referencia (estándar) de valores **L**, **a** y **b** conocidos (**L**= 97.63, **a**= -0.78 y **b**=2.85). La diferencia total de color (ΔE) de la muestra fue calculada con la ecuación:

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

Dónde: ΔE = Diferencia total de color entre el estándar y la muestra; ΔL , Δa y Δb = Diferencias absolutas de los valores de **L**, **a** y **b** del estándar utilizado y los valores correspondientes observados en la muestra.

b. Actividad acuosa (A_w)

Para su determinación se utilizó un equipo marca Aqualab mod CX2 (Decagon Devices Inc, Pullman, WA, EUA). Una muestra de aproximadamente 2 g se colocó en la celda portamuestras del equipo hasta que alcanzo el equilibrio (40-60 min). El instrumento se calibro con una disolución saturada de cloruro de potasio (a_w = 0.876). Las mediciones se realizaron por triplicado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ (Milán-Carrillo y col, 2002).

c. Composición química

1) Humedad

Se determinó de acuerdo al método 925.09B de la AOAC (1999). Se calculó la pérdida de peso de 2 g de muestra, después de calentar a 130 °C durante 1 h en una estufa de circulación de aire (FELISA mod 142^a, México). La prueba se realizó por triplicado.

2) Proteína cruda

Se utilizó el método 960.52, microKjeldahl, de la AOAC (1999) para la determinación de nitrógeno en un sistema Kjeltex (Mod 1009 y 1002, Tecator, Suecia). Se digirió 0.2 g de muestra, con 5 mL de ácido sulfúrico y mezcla reactiva de selenio (Merck Co., Alemania) a una temperatura de 200 °C. En la destilación de la muestra, previamente diluida con 25 mL de agua, se emplearon disoluciones de NaOH al 40 % y ácido bórico al 4 % como indicador para recibir el destilado. La titulación se llevó a cabo con una disolución valorada de HCl 0.1 N. Posteriormente, la proteína cruda se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno total por 6.25. La prueba se realizó por triplicado.

3) Grasa cruda

Se determinó de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Las extracciones se realizaron en muestras de 3-4 g de harina, que pasaron a través de malla 80 (0.180 mm). Se utilizó equipo Soxtec System HT 1043 Extraction Unit (Tecator, Suecia); se empleó como disolvente éter de petróleo. La prueba se realizó por triplicado.

4) Cenizas

Se utilizó el método 923.03 de AOAC (1999). Se pesaron 3 a 5 g de muestra, la cual se colocó en crisol de porcelana, y se sometió a incineración en mufla a 550 °C

hasta que resulto una ceniza gris luminosa con peso constante. Las muestras incineradas se enfriaron en un desecador, se atemperaron (25 °C) y se pesaron. La prueba se realizó por triplicado.

5) Carbohidratos

Se calcularon por diferencia.

6) Fibra dietaría total (FDT)

Se determinó de acuerdo al método oficial 985.29 de la AOAC (1999), con ayuda de un kit de análisis de fibra dietaría total (TDF-100A, Sigma). Se realizaron cuatro réplicas de 1 g de muestra cada una, previamente desgrasadas. Las muestras se colocaron en un vaso de precipitado de 300 mL y se le agregaron 50 mL de una solución reguladora de fosfatos (pH 6) a cada muestra. A cada vaso con la muestra se adicionaron 100 µL de α -amilasa. Las muestras se sometieron a tratamiento térmico (95 °C/15 min) en agitación constante. Después de este tiempo, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, y el pH se ajustó a 7.5 con NaOH 0.275 M o HCl 0.325 M. Se adicionaron 100 µL de una solución de proteasa (5 mg proteasa) a cada muestra y se sometieron a baño maría a 60 °C por 30 min y posteriormente se enfriaron. Se ajustó el pH entre 4-4.6, y se adicionaron 100 µL de amiloglucosidasa, las muestras se colocaron a 60°C por 30 min. Finalmente, las muestras se enfriaron y filtraron (usando filtros Gooch #2, previamente secos con 0.5 g de celita, a peso constante), se hicieron 3 lavados de 20 mL con etanol al 78%, 2 lavados de 10 mL con etanol al 95 % y 2 lavados de 10 mL con acetona. El residuo de filtro se secó en una estufa a 70 °C por 12 h. Esta parte del residuo se denomina fracción insoluble. A la solución del filtrado de la fracción insoluble se le adicionaron 4 veces el volumen de la solución filtrada (280 mL aprox.) con etanol al 95 % y se dejó reposar (12 h/ 25 °C),

para posteriormente ser filtrado (usando filtros Gocch #2, previamente secos con 0.5 g de celita) y se hicieron los mismos lavados descritos en la fracción insoluble. Al residuo de este filtrado se le denominó fracción soluble. El filtro con el residuo se secó en una estufa a 70 °C por 12 h. Se registraron los pesos de la fracción insoluble y soluble; de las cuatro réplicas, se tomaron dos de ellas para cuantificar proteínas y las otras dos para cenizas. El porcentaje de fibra de la fracción insoluble y soluble se calculó de la siguiente manera:

$$\%FI \text{ y/o } FS = [(PRFS - \text{Proteína} - \text{Cenizas}) / PMI] * 100$$

Donde:

FI= Fibra insoluble

FS= Fibra soluble

PRFS= Peso del residuo final seco

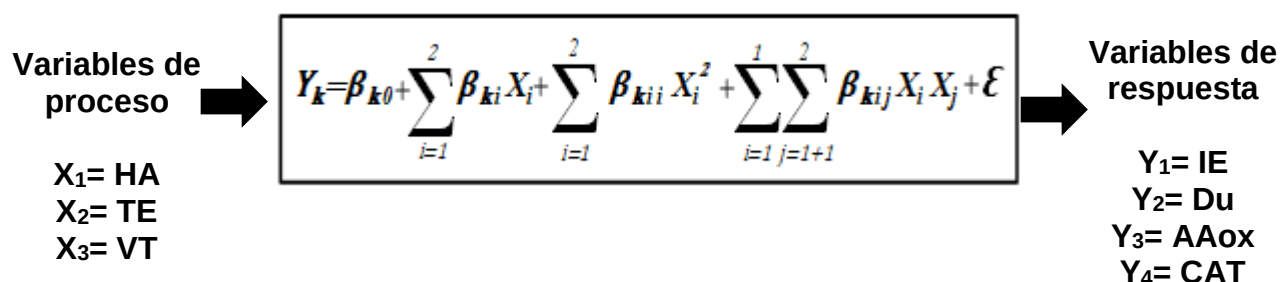
PMI= Peso de la muestra inicial

3. Obtención de condiciones óptimas de extrusión para producir botana extrudida expandida optimizada (BEEO) a partir de maíz azul y chía

a. Diseño experimental

Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (MSR), como técnica de optimización, para determinar la mejor combinación de variables del proceso de extrusión para la producción de una botana extrudida expandida optimizada de maíz azul y chía (**BEEO**), con valores de índice de expansión (**IE**), actividad antioxidante (**AAox**), contenido de antocianinas totales (**CAT**) altos y valores mínimos de dureza (**Du**). Datos de la literatura y ensayos preliminares se tomaron en cuenta para seleccionar el número y niveles de variación de las variables de proceso en el diseño

experimental. Se seleccionó un diseño experimental central compuesto rotatable de 20 tratamientos. Como variables de proceso se seleccionaron humedad de alimentación (**HA**, 12 – 25 %), temperatura de extrusión (**TE**, 120 - 160 °C) y velocidad de tornillo (**VT**, 50 - 240 rpm). Como variables de respuesta se consideraron índice de expansión (**IE**), dureza (**Du**), actividad antioxidante (**AAox**) y contenido de antocianinas totales (**CAT**). El modelo empírico de la “caja negra” que se presenta a continuación representa la relación entre variables de proceso (**HA**, **TE**, **VT**) y variables de respuesta (**IE**, **Du**, **AAox**, **CAT**).



La expresión dentro de la “caja negra” representa **IE**, **Du**, **AAox** y **CAT** cuyo $k=1$, y 2, respectivamente; β_{k0} , β_{ki} , β_{kii} y β_{kij} representan la constante y los coeficientes de los efectos lineal, cuadrático y de interacción, respectivamente. X_i , X_i^2 y $X_i X_j$ representan los efectos lineal, cuadrático y de interacción de las variables independientes, respectivamente; y ϵ representa el error, primariamente considerado por la incapacidad para determinar el modelo verdadero. Se aplicó análisis de regresión, los términos no-significativos ($p \leq 0.1$) se eliminaron del polinomio de segundo orden, se recalculó un nuevo polinomio y se obtuvo un modelo de predicción para cada variable de respuesta (Myers, 1977). Los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA), seguido por la aplicación de la prueba

de rango múltiple de Duncan, con un nivel de significancia del 0.05, para comparación de medias. Para la realización de estos análisis se utilizó el programa STAT-EASE (Design Expert, 2007).

b. Preparación de las mezclas

Lotes de 300 g de **Ma** y **Ch**, respectivamente, se fragmentaron en una licuadora doméstica a velocidad baja; donde se obtuvieron fragmentos (grits) de alrededor de 1-2 mm de diámetro. Los grits obtenidos previamente se fragmentaron en la misma licuadora a velocidad alta, hasta obtener grits finos que pasaron a través de una malla 40 (0.425 mm). Los grits de maíz se mezclaron con hidróxido de calcio (0.21 g cal / 100 g grits). Se mezclaron los grits de maíz azul con los de chíá, posteriormente a las mezclas obtenidas se les ajustó los contenidos de humedad entre 12 - 25 % con agua purificada, según diseño experimental. Se empacaron en bolsas de polietileno y se almacenaron (4 °C / 4 h) para asegurar el equilibrio de la humedad. Antes de la extrusión los lotes se atemperaron al medio ambiente (25 °C / 4 h).

c. Proceso de extrusión

La extrusión se llevó a cabo en un extrusor de tornillo simple modelo 20 DN (CW Brabender Instruments Inc, NY, EUA) con diámetro de tornillo de 19 mm, relación de longitud a diámetro 3 : 1, razón de compresión nominal 1:1 y apertura de dado de 3 mm. Las condiciones de operación del extrusor se seleccionaron de combinaciones factoriales de las variables de proceso [temperatura de extrusión (**TE**, 120 - 160 °C), velocidad del tornillo (**VT**, 50 - 240 rpm), humedad de alimentación, (**HA**, 12 - 25 %)]. Los extrudidos se colectaron en charolas de aluminio perforadas y se enfriaron / secaron a temperatura ambiente (25 °C / 8 h) con ayuda de un abanico doméstico. Los

extrudidos se evaluaron acorde a cuatro características de calidad (variables de respuesta): (1) **IE**= Índice de expansión, (2) **Du**= Dureza (3) **AAox** y (4) **CAT**.

4. Medición de variables de respuesta

a. Índice de expansión (IE)

A las botanas extrudidas expandidas provenientes de cada uno de los tratamientos se les evaluó el índice de expansión (**IE**) de acuerdo a la metodología propuesta por Gujska y Khan (1990); el valor de **IE** se obtuvo dividiendo el diámetro de la botana extrudida expandida entre el diámetro del orificio de la boquilla del extrusor. Para cada tratamiento se hicieron diez repeticiones.

b. Dureza (Du)

A las botanas extrudidas expandidas provenientes de cada uno de los tratamientos se les evaluó su dureza (**Du**) según la metodología propuesta por Park y col, (1993). Se utilizó un Texturómetro Universal Instron Mod 4411, adaptado para pruebas de punción; para poder medir la fuerza que se requiere aplicar para penetrar la botana extrudida expandida (Fuerza de punción = Dureza = **Du**). La muestra (botana extrudida expandida de 5 cm de longitud) se colocó horizontalmente en el receptáculo para colocación de la misma (plato de acero inoxidable) y se lo colocó encima una probeta de 2 mm de diámetro, la velocidad de avance de la misma fue de 10 mm/min aplicando una carga de 500 kgf (aproximadamente 499 N). Para cada muestra se realizaron diez repeticiones.

c. Actividad antioxidante (AAox)

La actividad antioxidante se determinó a los extractos de compuestos fenólicos libres y ligados por el método DPPH. La actividad antiradical DPPH de los extractos de harinas se determinó mediante el procedimiento descrito por Shimamura y col,

(2014) con ligeras modificaciones para su lectura en un espectrofotómetro. El método de DPPH se utilizó para determinar la capacidad de los antioxidantes presentes en una muestra 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-Williams y col., 1995). Se preparó una solución DPPH (0.2 µM), después de 30 min de incubación a temperatura ambiente se midió la absorbancia en un espectrofotómetro. Se utilizó como estándar una curva de Trolox (TE) por 100 g de muestra en base seca (µmol de TE/100 g, bs). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

d. Contenido de antocianinas totales (CAT)

El contenido de antocianinas se evaluó de acuerdo a la metodología descrita por Abdel-Aal y Hucl (1999). Se pesó 1 g de muestra el cual se homogenizó en 10 mL de una solución de metanol acidificado (95 % metanol y 1 N de HCl 85:15, v/v) en un tubo de centrifuga de 10 mL. Se agitó por 30 min y posteriormente se centrifugó (30,000xg / 4 °C /10 min) (Sorvall RCSC, Sorvall Instruments, Dupont, Wilmington, DE, EUA); se recolectó el sobrenadante. La absorbancia de los extractos se leyó a 535 nm y 700 nm en un lector de microplacas (Synergy™ HY Multi-detection, DioTek, Inc., Winooski, VT, EUA). El contenido de antocianinas se calculó de la siguiente manera:

$$\text{CAT} = [(A_{535} - A_{700}) / (\epsilon)] \times [(\text{Vol. total de ext.}) \times (\text{PM})] \times [1/(\text{Peso de la muestra})]$$

Donde:

CAT= Conc. Total de antocianinas (mg de Cianidina-3-Glucosido/ g de muestra)

A= Absorbancia

ε= Absorción molar de la Cianidina-3-Glucosido (25 965 cm/M)

PM= Peso molecular de la Cianidina-3-Glucosido (449.2 g/mol)

5. Análisis de varianza y regresión

El análisis de varianza y regresión se realizó a los valores obtenidos de índice de expansión (IE), dureza (Du), actividad antioxidante (AAox), y contenido de antocianinas totales (CAT), de acuerdo a un diseño experimental central compuesto rotatable utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR), con tres variables de proceso, seleccionadas para este estudio.

6. Optimización del proceso de extrusión para conocer las mejores condiciones de procesamiento para elaborar una botana extrudida expandida optimizada (BEEO) de maíz azul y chía, con índice de expansión, actividad antioxidante, contenido de antocianinas altos y valores mínimos de Dureza.

Se aplicó el método numérico de deseabilidad descrito por De la Vara y Domínguez (2002) para encontrar la mejor combinación de las variables del proceso de extrusión (**HA, TE, VT**) para obtener botanas saludables con valores máximos de **IE, AAox, CAT** y mínimos de **Du**. La ecuación de transformación que se utilizó para calcular $d_i(X)$:

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

Dónde: $d_i(X)$ = 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 calculadas las deseabilidades individuales de cada una de las variables de respuesta se calculó la deseabilidad global [$D = (d_1 d_2 d_3)^{1/3}$]. Siendo el valor ideal óptimo ($D=1$). Los cálculos de deseabilidades individuales (d_i) y la deseabilidad global (D) se llevaron a cabo utilizando el Programa Design Expert ver 7.0 (Design Expert, 2005).

7. Obtención de la botana extrudida expandida optimizada (BEEO)

Una vez obtenidas las condiciones óptimas del proceso de extrusión se produjo una botana expandida aplicando el procedimiento descrito en el apartado **B.4.b** del capítulo VII. **MATERIALES Y MÉTODOS (Proceso de extrusión)**. A dicha **BEEO** se le evaluó la composición nutrimental, propiedades fisicoquímicas y nutricionales, capacidad antioxidante y contenido de fitoquímicos. Además, esta se evaluó sensorialmente por panelistas semientrenados.

8. Características físicas, de textura y morfométricas de la BEEO

a. Índice de expansión (IE)

A las botanas extrudidas expandidas provenientes de cada uno de los tratamientos se les evaluó el índice de expansión (**IE**) de acuerdo a la metodología propuesta por Gujska y Khan (1990); el valor de **IE** se obtuvo dividiendo el diámetro de la botana extrudida expandida entre el diámetro del orificio de la boquilla del extrusor. Para cada tratamiento se llevaron a cabo diez repeticiones.

b. Densidad aparente (DA)

Se les evaluó la densidad aparente (**DA**), a las botanas extrudidas expandidas provenientes de cada uno de los tratamientos acorde al procedimiento descrito por Wang y col, (1993). A diez muestras de extrudidos expandidos, provenientes de cada tratamiento, de aproximadamente 50 mm seleccionados al azar, se les midió el

diámetro (**d**) y longitud (**l**). A cada muestra se le realizaron tres mediciones de diámetro y se calculó el promedio. A las muestras también se les determinó su peso (**P_m**=Peso de la muestra). El cálculo de DA se llevó a cabo aplicando la siguiente ecuación:

$$DA = (P_m) / [(0.5d)^2(l)]$$

c. Dureza (Du**)**

Se le evaluó la dureza (**Du**), a las botanas extrudidas expandidas provenientes de cada uno de los tratamientos según la metodología propuesta por Park y col, (1993). Se utilizó un Texturómetro Universal Instron Mod 4411, adaptado para pruebas de punción; para poder medir la fuerza que se requiere aplicar para penetrar la botana extrudida expandida (Fuerza de punción = Dureza = **Du**). La muestra (botana extrudida expandida de 5 cm de longitud) se colocó horizontalmente en el receptáculo para colocación de la misma (plato de acero inoxidable) y se lo colocó encima una probeta de 2 mm de diámetro, la velocidad de avance de la misma fue de 10 mm/min aplicando una carga de 500 kgf (aproximadamente 499 N). Para cada muestra se realizaron diez repeticiones.

d. Crispness / crunchiness

Para cada tratamiento se emplearon 60 muestras de 5.0 ± 0.1 cm de longitud. Los datos de firmeza se obtuvieron empleando un analizador de textura (AMETEK, LS, USA) acoplado al software NEXIGEN PLUS 4.0. Se utilizó una punta (probeta) de 50 mm de diámetro, a una velocidad de 10 mm/s para comprimir las muestras de manera transversal en un 90 %. La firmeza se midió como la resistencia de la muestra a la compresión en Newton (N). Se determinó el valor de crispness como la longitud de la

curva de fuerza-deformación; crunchiness se calculó como el trabajo total realizado durante la prueba y W_c .

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

$$W_c = \frac{F_{cr}}{N_{sr}} = \frac{S}{n} (N * mm)$$

Dónde: 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 crispness.

9. Propiedades morfométricas

a. Adquisición de imágenes con Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM)

La morfología de las muestras fue analizada en un Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (MEBA), modelo EVO LS 10 (Carl Zeiss, Alemania). Las muestras secas y sin ningún tratamiento previo fueron montadas sobre un portaobjeto con ayuda de una cinta doble adhesiva de carbono. Las muestras se cortaron transversalmente, por lo que el análisis que se presenta corresponde a la morfología interior, la observación se realizó en condiciones de presión extendida mediante la admisión de vapor de agua en la cámara del microscopio a una presión de 10 Pa. Se empleó un detector de electrones secundarios y voltaje de aceleración de 8 kV (García-Armenta y col, 2016).

b. Análisis Digital de Imágenes (ADI)

Las imágenes capturadas con MEBA 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 (Df_t) y lagunaridad (Λ_t).

El procesamiento de las imágenes consistió en realizar un ajuste de brillo y contraste automático en escala de grises. Finalmente, se procedió a utilizar el plugin FracLac para el cálculo de dichos parámetros morfométricos. Además, el ADI incluyó la generación de gráficas de superficie en tercera dimensión (3D) con el objetivo de observar las diferencias en intensidad de gris en la estructura de las botanas. Para ello, se utilizó el plugin 3D Surface Plot para ImageJ, en el cual se utilizaron las siguientes condiciones: tamaño de la malla (256), escala (10), nivel de alisamiento (3.5), perspectiva (0.09) y luminosidad (0.21). Finalmente, el nivel de intensidad de gris se calculó para cada ubicación del pixel en la imagen de la superficie de la botana (García-Armenta y col, 2016)

c. Dimensión fractal de textura (Df_t) y lagunaridad (Λ_t)

La dimensión fractal de textura se calculó con la metodología reportada por García-Armenta y col, (2016), la cual se utilizó el método de conteo de cajas. Se aproximó la pendiente log-log de la relación entre el tamaño de caja (r) y la diferencia en intensidad de nivel de gris (I) con la siguiente ecuación:

$$Df_t = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log I(r)}{\left(\frac{1}{r}\right)}$$

Por otra parte, la lagunaridad de las imágenes de superficie se obtuvo mediante el cálculo de la desviación estándar (σ) y el promedio (η) de intensidad de nivel de gris

por pixeles en cada caja en un determinado tamaño de caja a cualquier orientación (*g*) (García-Armenta y col, 2016):

$$\Delta t = \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)_{r,g}^2$$

10. Composición química de la BEEO

a. Humedad

Se determinó de acuerdo al método 925.09B de la AOAC (1999). Se calculó la pérdida de peso de 2 g de muestra, después de calentar a 130 °C durante 1 h en una estufa de circulación de aire (FELISA mod 142^a, México). La prueba se realizó por triplicado.

b. Proteína cruda

Se utilizó el método 960.52, microKjeldahl, de la AOAC (1999) para la determinación de nitrógeno en un sistema Kjeltex (Mod 1009 y 1002, Tecator, Suecia). Se digirieron 0.2 g de muestra, con 5 mL de ácido sulfúrico y mezcla reactiva de selenio (Merck Co., Alemania) a una temperatura de 200 °C. En la destilación de la muestra, previamente diluida con 25 mL de agua, se emplearon disoluciones de NaOH al 40 % y ácido bórico al 4 % como indicador para recibir el destilado. La titulación se llevó a cabo con una disolución valorada de HCl 0.1 N. Posteriormente, la proteína cruda se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno total por 6.25. La prueba se realizó por triplicado.

c. Grasa cruda

Se determinó de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Las extracciones se realizaron en muestras de 3-4 g de harina, que pasaron a través de malla 80 (0.180

mm). Se utilizó el equipo Soxtec System HT 1043 Extraction Unit (Tecator, Suecia); se empleará como disolvente éter de petróleo. La prueba se realizó por triplicado.

d. Cenizas

Se utilizó el método 923.03 de AOAC (1999). Se pesaron 3 a 5 g de muestra, la cual se colocó en crisol de porcelana, y se sometió a incineración en mufla a 550 °C hasta que resultó una ceniza gris luminosa con peso constante. Las muestras incineradas se enfriaron en un desecador, se atemperaron (25 °C) y se pesaron. La prueba se realizó por triplicado.

e. Carbohidratos

Se calcularon por diferencia.

f. Fibra dietaría total (FDT)

Se determinó de acuerdo al método oficial 985.29 de la AOAC (1999), con ayuda de un kit de análisis de fibra dietaría total (TDF-100 A, Sigma). Se realizaron cuatro réplicas de 1 g de muestra cada una, previamente desgrasadas. Las muestras se colocaron en un vaso de precipitado de 300 mL y se le agregaron 50 mL de una solución reguladora de fosfatos (pH 6) a cada muestra. A cada vaso con la muestra se adicionaron 100 µL de α -amilasa. Las muestras se sometieron a tratamiento térmico (95 °C/15 min) en agitación constante. Después de este tiempo, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, y el pH se ajustó a 7.5 con NaOH 0.275 M o HCl 0.325 M. Se adicionaron 100 µL de una solución de proteasa (5 mg proteasa) a cada muestra y se sometieron a baño maría a 60 °C por 30 min y posteriormente se enfriaron. Se ajustó el pH entre 4-4.6, y se adicionaron 100 µL de amiloglucosidasa, las muestras se colocaron a 60 °C por 30 min. Finalmente, las muestras se enfriaron

y filtraron (usando filtros Gooch #2, previamente secos con 0.5 g de celita, a peso constante), se hicieron 3 lavados de 20 mL con etanol al 78 %, 2 lavados de 10 mL con etanol al 95 % y 2 lavados de 10 mL con acetona. El residuo de filtrado se secó en una estufa a 70 °C por 12 h. Esta parte del residuo se denominó fracción insoluble. A la solución del filtrado de la fracción insoluble se le adicionaron 4 veces el volumen de la solución filtrada (280 mL aprox.) con etanol al 95% y se dejó reposar (12 h/ 25 °C), para posteriormente ser filtrado (usando filtros Gocch #2, previamente secos con 0.5 g de celita) y se hicieron los mismos lavados descritos en la fracción insoluble. Al residuo de este filtrado se le denomino fracción soluble. El filtro con el residuo se secó en una estufa a 70 °C por 12 h. Se registraron los pesos de la fracción insoluble y soluble; de las cuatro réplicas, se tomaron dos de ellas para cuantificar proteínas y las otras dos para cenizas. El porcentaje de fibra de la fracción insoluble y soluble se calculó de la siguiente manera:

$$\%FI \text{ y/o } FS = [(PRFS - \text{Proteína} - \text{Cenizas}) / PMI] * 100$$

Donde:

FI= Fibra insoluble

FS= Fibra soluble

PRFS= Peso del residuo final seco

PMI= Peso de la muestra inicial

11. Propiedades fisicoquímicas de la BEE0

a. pH

Se determinó de acuerdo a la AOAC (1999). 10 g de muestra fueron agregados a 100 mL de agua desionizada hervida y enfriada; la suspensión se agitó en agitador orbital por 10 min a 240 rpm, después se midió el pH de la suspensión. Las mediciones se realizaron por triplicado.

b. Diferencia total de color (ΔE)

Se utilizó la metodología reportada por Reyes-Moreno y col (2002). El color de las muestras se determinó en un colorímetro Minolta Chroma-Meter mod CR-210 (Minolta LTD, Japón). La determinación de color se basa en el efecto triestímulo, donde **L** mide la brillantez y varía de 100 para un blanco perfecto a cero para negro. Las dimensiones de cromaticidad son dadas por los parámetros **a** y **b**. El valor positivo de **a** está asociado al color rojo y el negativo con el verde. El valor positivo de **b** está asociado al color amarillo y el negativo con el azul. Para la evaluación del color se utilizaron aproximadamente 100 g de muestra, la cual se colocó en una tapa de caja Petri de vidrio Kimax de 15 cm de diámetro y se midieron los parámetros correspondientes a **L**, **a** y **b**. Se usó un mosaico blanco como referencia (estándar) de valores **L**, **a** y **b** conocidos (**L**=97.63, **a**=-0.78 y **b**=2.85). La diferencia total de color (ΔE) de la muestra se calculó con la ecuación:

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

Dónde: ΔE = Diferencia total de color entre el estándar y la muestra; ΔL , Δa y Δb = Diferencias absolutas de los valores de **L**, **a** y **b** del estándar utilizado y los valores correspondientes observados en la muestra.

c. Actividad acuosa (a_w)

Para su determinación se utilizó el equipo marca Aqualab mod CX2 (Decagon Devices Inc, Pullman, WA, EUA). Una muestra de aproximadamente 2 g se colocó en la celda porta muestras del equipo hasta que alcanzo el equilibrio (40-60 min). El instrumento se calibro con una disolución saturada de cloruro de potasio ($a_w = 0.876$). Las mediciones se realizaron por triplicado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ (Milán-Carrillo y col, 2002).

12. Capacidad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos

a. Obtención de extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

Para obtener los extractos de fitoquímicos libres se utilizó la metodología propuesta por Dewanto y col. (2002). A una porción de 0.5 de muestra se le agregó etanol al 80 % (v/v) para formar una suspensión que se agito durante 10 min. La suspensión se centrifugo ($2,500\text{ g} / 25^\circ\text{C} / 10\text{ min}$) y el precipitado fue separado del sobrenadante. El sobrenadante se evaporo a 45°C hasta un volumen de 2 mL. El extracto (fitoquímicos libres) fue congelado (-80°C) y posteriormente almacenado hasta su utilización. El extracto de fitoquímicos ligados se obtuvo acorde al procedimiento reportado por Adom y Liu (2002) y Adom y col. (2005) con ligeras modificaciones. El precipitado (residuo) obtenido durante la extracción de fitoquímicos libres se digirió con 10 mL de NaOH 2 M en baño María ($95^\circ\text{C} / 30\text{ min}$). El residuo digerido se agito a temperatura ambiente durante una hora e inmediatamente después se acidifico con 2 mL de HCl concentrado. La suspensión resultante fue extraída cuatro veces con 10 mL de acetato de etilo en cada extracción. El acetato de etilo se evaporo a 35°C . Los fitoquímicos ligados se reconstruyeron y solubilizaron con 2 mL de metanol para la obtención de una solución clara y homogénea (fitoquímicos ligados).

b. Determinación de actividad antioxidante (ABTS y DPPH)

La actividad antioxidante se determinó a los extractos de compuestos fenólicos libres y ligados por el método ABTS para compuestos hidrofílicos de acuerdo a lo descrito por Re y col. (1999). El ensayo del ácido 2,2-azinobis-(3etilbenzotioazolín-6-sulfónico) (ABTS) se basa en la captación por los antioxidantes del radical catión $\text{ABTS}^{\cdot+}$ generado en el medio de reacción. El radical catión del ABTS posee una coloración verde-azulada con un máximo de absorción a 415 nm y una serie de máximos secundarios de absorción a 645, 660, 734, 815 y 820 nm. Dependiendo de la variante del método ABTS utilizada se emplean distintas longitudes de onda, aunque las más frecuentes son 415 y 734 nm. Para el desarrollo del método se suelen emplear dos estrategias; inhibición y decoloración. En la primera los antioxidantes se añaden previamente a la generación del radical $\text{ABTS}^{\cdot+}$ y lo que se determina es la inhibición de la formación del radical, que se traduce en un retraso en la aparición de la coloración verde-azulada. En la segunda estrategia, los antioxidantes se añaden una vez el $\text{ABTS}^{\cdot+}$ se ha formado y se determina entonces la disminución de la absorbancia debida a la reducción del radical, es decir la decoloración de este.

El grado de protección antioxidante mediada se cuantifico utilizando el antioxidante Trolox como estándar. El radical $\text{ABTS}^{\cdot+}$ se obtuvo tras la reacción de ABTS (7 mM) con persulfato potásico (2.45 mM) incubados a temperatura ambiente (25 °C) y oscuridad durante 12-16 h. Después la solución de $\text{ABTS}^{\cdot+}$ se diluye con agua desionizada para obtener una solución de trabajo de $\text{ABTS}^{\cdot+}$. La reacción entre la solución de trabajo de $\text{ABTS}^{\cdot+}$ y muestras con diferentes concentraciones se iniciaron y almacenaron a temperatura ambiente (25 °C) hasta que la reacción se complete. La disminución de coloración se monitoreo en un lector de microplacas (Synergy™) y se

expresó como porcentaje de inhibición de ABTS, la cual se comparó con una curva estándar de Trolox. Los datos se expresaron como μmol equivalentes de Trolox (ET)/100 g de muestra seca. Todas las mediciones se hicieron por triplicado.

La actividad antiradical DPPH de los extractos de harinas se determinó mediante el procedimiento descrito por Shimamura y col (2014) con ligeras modificaciones para su lectura en un espectrofotómetro. El método de DPPH se utilizó para determinar la capacidad de los antioxidantes presentes en una muestra 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-Williams y col, 1995). Se preparó una solución DPPH (0.2 μM), después de 30 min de incubación a temperatura ambiente se midió la absorbancia en un espectrofotómetro. Utilizando como estándar una curva de Trolox (TE) por 100 g de muestra en base seca (μmol de TE/100 g, bs).

c. Compuestos fenólicos totales (CFT)

Para la determinación de **CFT** se utilizó el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton y col (1999). En una celda de una placa de 96 celdas, se agregaron 20 μL de una solución estándar de ácido gálico; en las otras celdas se agregaron 20 μL de extractos de fitoquímicos libres y ligados de cada muestra. A la solución estándar de ácido gálico, y a los extractos de fitoquímicos libres y ligados, se les agregaron 180 μL del reactivo de Folin-Ciocalteu y 50 ml de NaCO_3 al 7 %. El estándar y los extractos se incubaron (25 °C/90 min) en el mismo equipo. Concluida la incubación se midió la absorbancia a 750 nm en un Lector de Microplacas (Synergy

HT Biotek Instrument). Se utilizó metanol como blanco. El contenido de **CFT** se expresó como microgramos equivalentes de ácido gálico (EAG) por 100 g de muestra seca ($\mu\text{g EAG}/100\text{ g}$). El contenido de **CFT** se calculó como la suma de compuestos fenólicos presentes en fitoquímicos libres y ligados. El rango de linealidad de la curva de calibración de ácido gálico fue de 25 a 300 ppm. Las determinaciones se realizaron por cuadruplicado.

13. Evaluación sensorial de la BEEO

La evaluación sensorial de la **BEEO** se llevó a cabo con un panel de 30 jueces no entrenados. Los miembros del panel fueron estudiantes de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, todos ellos familiarizados con el consumo cotidiano de botanas. La BEEO se evaluó empleando una escala hedónica de 11 puntos (1=Máximo valor de desagrado imaginable, 11= Máximo valor de agrado imaginable) para los atributos diámetro expandido, textura y aceptabilidad global (Larmond, 1977). Las muestras se presentaron en orden aleatorio y se evaluaron con luz del día a media mañana. Las evaluaciones se repitieron tres veces en cuatro diferentes días.

14. Análisis estadístico

Los resultados generados durante las evaluaciones físicas, fisicoquímicas, nutrimentales, morfométricas, capacidad antioxidante, de contenido de fitoquímicos y de evaluación sensorial de la **BEEO** se analizaron utilizando un análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía y prueba de rangos múltiples de Duncan ($p \leq 0.5$).

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

A. Características físicas de granos de maíz azul y chía

En el **Cuadro 9** se muestran las características físicas de los granos maíz azul y chía. Las dimensiones físicas de los granos enteros son importantes indicadores de la calidad comercial, del manejo y almacenamiento de los mismos. El tamaño de los granos de maíz azul fue de 10.25 ± 0.94 mm de largo, 10.01 ± 0.85 mm de ancho y 5.22 ± 0.72 mm de grosor. El peso hectolítrico, peso de 1000 granos y de 100 granos fueron de 79.35 kg/hL y 314.03 g respectivamente.

El tamaño de las semillas de chía fue de 2.044 ± 0.11 mm de largo, 1.26 ± 0.09 mm de ancho y 0.40 ± 0.03 mm de grosor. El peso hectolítrico, peso de 1000 granos y de 100 granos fueron de 69.18 kg/hL y 1.376 g respectivamente (cuadro 9).

B. Mejor combinación de humedad de alimentación / temperatura de extrusión / velocidad de tornillo para producir una botana extrudida expandida optimizada de maíz azul y chía (BEEO) con valores máximos de IE, AAox, CAT y valores mínimos DE Du.

El **Cuadro 10** muestra las diferentes combinaciones de variables del proceso de extrusión [humedad de alimentación (**HA**), temperatura de extrusión (**TE**) y velocidad de tornillo (**VT**)] utilizada para la producción de botanas extrudidas expandidas de maíz azul y chía (**BEE**), y los valores experimentales de las variables de respuesta [índice de expansión (**IE**), dureza (**Du**), actividad antioxidante (**AAox**) y contenido de antocianinas totales (**CAT**)] evaluadas a las **BEE**.

Cuadro 9. Características físicas de los granos maíz azul y chía.

Característica	Maíz Azul ¹	Chía ²
Dimensiones físicas		
(mm)		
Longitud	10.25 ± 0.94	2.044 ± 0.11
Ancho	10.01 ± 0.85	1.26 ± 0.09
Grosor	5.22 ± 0.72	0.40 ± 0.03
Peso hectolítrico (kg/Hl)	79.35 ± 0.61	69.18 ± 0.22
Peso de 1000 granos (g)	314.03 ± 8.01	1376 ± 0.03

¹ Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar.

Cuadro 10. Combinación¹ de humedades de alimentación (**HA**), temperaturas de extrusión (**TE**) y velocidades de tornillo (**VT**) para la producción de botanas extrudidas expandidas (**BEE**) y resultados experimentales para las variables de respuesta.

Trat ²	Variables de Proceso ³				Variables de ⁴ Respuesta		
	HA	TE	VT	IE	Du	AAox	CAT
1	14.6	128.1	88.5	2.11	14.62	479.95	4.92
2	22.3	128.1	88.5	1.72	17.94	374.83	4.94
3	14.6	151.8	88.5	2.21	6.28	499.07	3.43
4	22.3	151.8	88.5	1.51	16.70	471.48	2.83
5	14.6	128.1	201.4	2.30	10.35	503.70	7.06
6	22.3	128.1	201.4	1.63	25.01	437.84	6.66
7	12.0	151.8	201.4	2.59	5.52	616.67	5.60
8	25.5	151.8	201.4	1.61	19.65	554.59	5.92
9	18.5	140.0	145.0	2.55	7.22	534.12	5.22
10	18.5	140.0	145.0	1.53	19.23	431.08	4.68
11	18.5	120.0	145.0	1.88	18.79	462.82	5.66
12	18.5	160.0	145.0	1.79	8.47	472.04	3.87
13	18.5	140.0	50.0	1.66	17.22	485.96	4.39
14	18.5	140.0	240.0	2.03	11.22	632.85	6.42
15	18.5	140.0	145.0	1.93	14.39	619.33	6.56
16	18.5	140.0	145.0	1.87	16.52	594.22	6.92
17	18.5	140.0	145.0	1.93	13.38	612.33	5.97
18	18.5	140.0	145.0	2.05	14.40	594.84	6.28
19	18.5	140.0	145.0	2.03	15.22	578.48	5.79
20	18.5	140.0	145.0	1.85	12.91	569.61	6.06

Diseño central compuesto rotatable con tres factores y cinco niveles de variación, 20 tratamientos.

² Trat= Tratamiento ordenado al azar

³HA= Humedad de alimentación (%), TE= Temperatura de extrusión (°C), VT= Velocidad de tornillo para extrusión (rpm)

⁴AAox= Actividad antioxidante (umol ET/100 g, bs), CAT= Contenido de antocianinas totales (mg EC3G / 100 g, bs), IE= Índice de expansión, Du= Dureza (N).

1. Modelos de predicción para las variables de respuesta

A partir de los datos experimentales de **IE**, **Du**, **AAox** y **CAT** de las **BEE** mostrados en el **cuadro 10** se obtuvieron modelos de predicción, como resultado de ajustar el polinomio que relaciona las variables de respuesta con las variables del proceso de extrusión (**HA**, **TE**, **VT**). A estos modelos de predicción se les probó su idoneidad y ajuste por análisis de varianza (**Cuadro 11**). Un buen modelo de predicción debe tener una R^2 ajustada (coeficiente de determinación) ≥ 0.80 , un nivel de significancia de $p < 0.05$, un valor de coeficiente de varianza $CV \leq 10\%$, y prueba de falta de ajuste > 0.1 (Myers y Montgomery, 2002). Estos criterios se utilizaron para decidir el nivel de satisfacción de los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta.

a. Índice de expansión (IE)

Las botanas extrudidas expandidas de maíz azul y chía (**BEE**) exhibieron valores mínimos y máximos de 1.51 y 2.85 respectivamente (**Cuadro 10**). El análisis de varianza mostro un modelo cuadrático significativo ($p = 0.0001$) para **IE**. Este análisis también mostro que el **IE** de las **BEE** fue dependiente de los términos lineales humedad de alimentación (**HA**) y velocidad de tornillo (**VT**), así como de la interacciones (**HA**)(**TE**) y (**HA**)(**VT**) y del termino cuadrático de humedad de alimentación [**(HA)²**] (**Cuadro 11**). El modelo de predicción obtenido para **IE** fue:

Variables no codificadas:

$$IE = 1.91 - 0.33*HA + 0.088*VT - 0.077 *HA*TE - 0.068*HA*VT + 0.051*HA^2$$

Este modelo de predicción explico 94.87 % de la variabilidad total ($p = 0.0001$) de los valores de **IE** de las **BEE**. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo

Cuadro 11. Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos de las ecuaciones de segundo orden (modelos de predicción) mostrando las relaciones entre las variables proceso y de respuesta para la producción de botanas extrudidas expandidas (BEE).

Coeficientes	Índice de expansión ¹	Dureza ²	Actividad Antioxidante ³	Contenido de antocianinas totales ⁴
Intercepto				
B₀	1.91	14.26	594.98	6.26
Lineal				
B₁	-0.33	4.59	-31.77	NS
B₂	NS	-2.72	26.43	-0.65
B₃	0.088	NS	39.14	0.92
Cuadrático				
B₁₁	0.051	1.88	-40.79	-0.42
B₂₂	NS	NS	-46.26	-0.49
B₃₃	NS	NS	-13.64	-0.26
Interacciones				
B₁₂	-0.077	NS	NS	NS
B₁₃	-0.068	NS	NS	NS
B₁₄	NS	NS	NS	NS
P_{modelo}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
P_{falta de ajuste}	0.5188	0.1461	0.1169	0.4349
CV	4.17	13.27	5.44	8.17
R²	0.9487	0.8497	0.8986	0.8924
R²_{ajustada}	0.9303	0.8567	0.8518	0.8540
R²_{predicha}	0.8992	0.8050	0.6634	0.6943

fue 0.9303 y la falta de ajuste fue no significativa ($p = 0.5188$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo fue de 4.17 %. Estos valores indican que el modelo experimental para el **IE** de las **BEE** fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo de predicción se construyeron graficas de superficie de respuesta (**Figura 10**) en las cuales se observa el efecto de **HA** y **VT** sobre el índice de expansión de las **BEE**. En las gráficas se puede observar que tanto la humedad de alimentación y velocidad de tornillo tuvieron un efecto significativo sobre la expansión de las botanas. Los valores más bajo (1.51) se localizó a una **HA** = 22.3 %/ **VT**= 88.5 rpm. A medida que los valores de **HA** y **VT** aumentaron los valores de **IE** también incrementaron hasta alcanzar el valor máximo posible (2.85) el cual se localizó a una **HA** = 18.5 %/ **VT**= 145 rpm.

b. Dureza (Du)

La humedad de alimentación (**HA**) y temperatura de extrusión (**TE**) tuvieron un efecto significativo ($p < 0.01$) sobre la dureza (**Du**) de las botanas extrudidas expandida (**BEE**). De igual manera, la interacción entre la humedad de alimentación y velocidad de tornillo (**HA**) (**VT**) tuvo un efecto significativo ($p < 0.01$) sobre la dureza (**Du**) de las botanas extrudidas expandida (**BEE**). El modelo de regresión para la dureza (**Du**) de las botanas extrudidas expandida (**BEE**), fue del orden lineal y presentó las siguientes expresiones: Usando variables no codificadas:

$$\mathbf{Du} = 14.26 + 4.59 \cdot \mathbf{HA} - 2.72 \cdot \mathbf{TE} + 1.88 \cdot \mathbf{HA} \cdot \mathbf{VT}$$

El modelo de regresión para la dureza (**Du**) de las botanas extrudidas expandidas (**BEE**) explicó el 84.97 % de la variación total ($p = 0.0001$) de los valores de **IE** de las

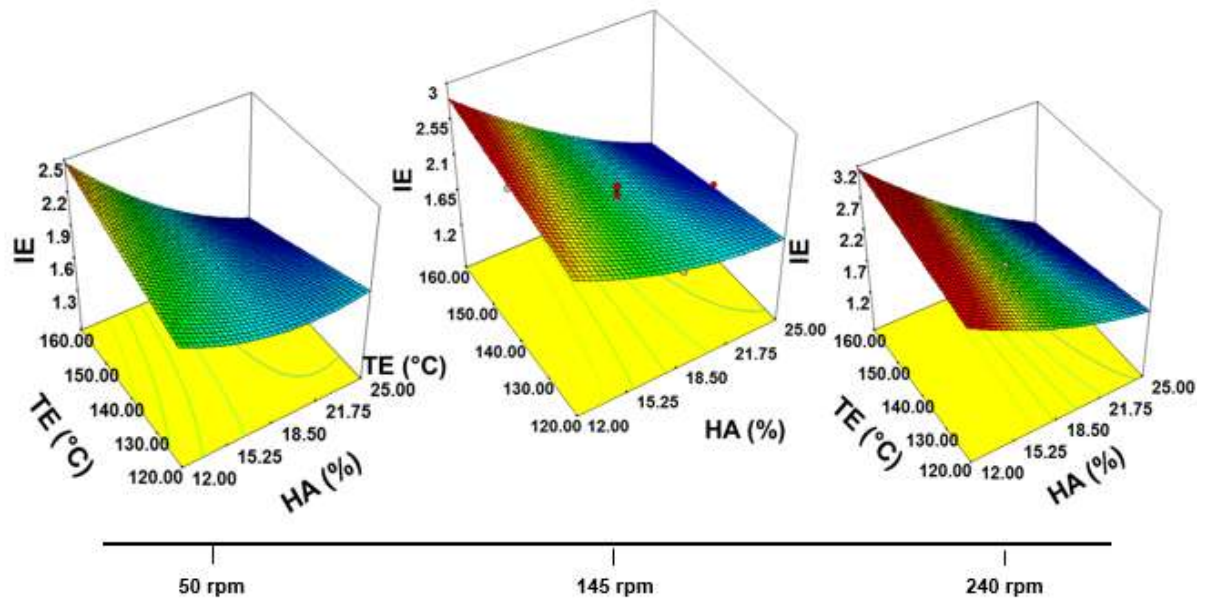


Figura 10: Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación y velocidad de tornillo (**HA, VT**) sobre el índice de expansión (**IE**) de las botanas extrudidas expandidas (**BEE**).

BEE. La **Figura 11** muestra la relación entre la humedad de alimentación (**HA**) y la temperatura de extrusión (**TE**) sobre los valores de dureza de las **BEE**. En dicha figura se puede observar que a valores bajos de **TE**, valores altos de **HA** y **VT** altas se producen los mayores valores de **Du** en las **BEE**. Los valores de **Du** variaron desde 5.5 hasta 25.0 N.

c. Actividad antioxidante (**AAox**)

Los valores de actividad antioxidante de las **BEE** correspondientes a los diferentes tratamientos estuvieron en el rango de 374.8 – 632.8 $\mu\text{molET/100 g}$ de mezcla (**Cuadro 10**). El análisis de regresión mostró que la actividad antioxidante dependió de la humedad de alimentación (**HA**), temperatura de extrusión (**TE**) y velocidad de tornillo (**VT**) ($P \leq 0.01$), términos cuadráticos de $[(\text{HA})^2]$, $[(\text{TE})^2]$ y $[(\text{VT})^2]$ tuvieron un efecto significativo ($P \leq 0.01$) (**Cuadro 11**). Modelo de predicción Variables no codificadas:

$$\text{AAox} = 594.98 - 31.77 \cdot \text{HA} + 26.43 \cdot \text{TE} + 39.14 \cdot \text{VT} - 40.79 \cdot \text{HA}^2 - 46.26 \cdot \text{TE}^2 - 13.64 \cdot \text{VT}^2$$

El modelo de predicción explicó el 89.86 % de la variación total en actividad antioxidante de las botanas estrudidas (**BEE**) generados a partir de los diferentes tratamientos (**Cuadro 11**). La **Figura 12** muestra el efecto de la **HA**, **TE** y **VT** sobre la actividad antioxidante de los extractos de las **BEE**, donde se puede observar que al aumentar la **HA**, **TE** y **VT** la **AAox** de las **BEE** aumenta, esto puede deberse, que a mayores **VT** se produce una mayor liberación compuestos antioxidantes ligados, así como también a **TE** elevadas se puede llevar a cabo la formación de productos de la reacción de Maillard a los cuales se les atribuye actividad antioxidante fue observada

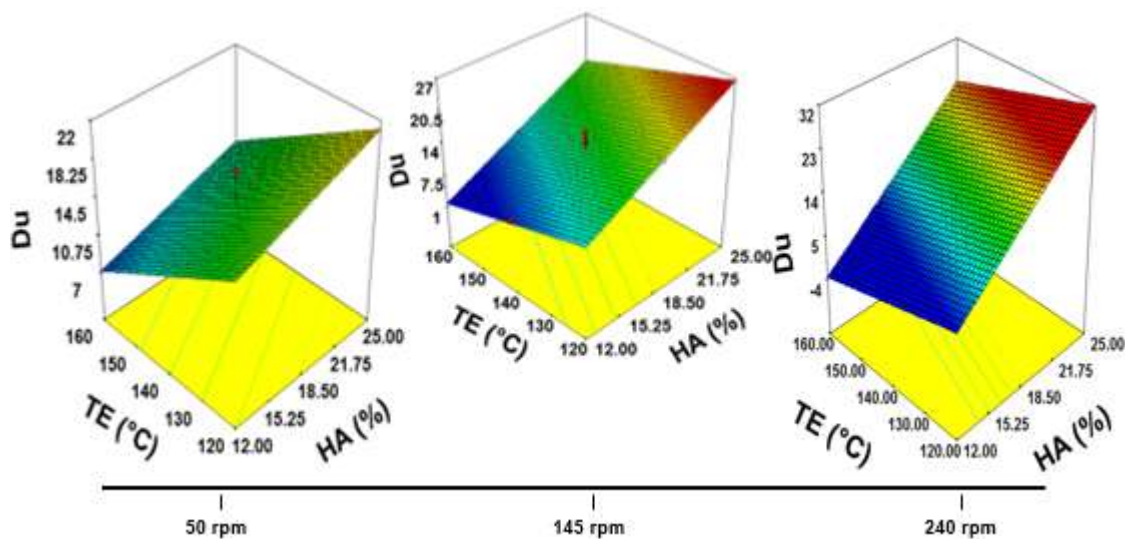


Figura 11: Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación, temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (**HA**, **TE**, **VT**) sobre la dureza (**Du**) de las botanas extrudidas expandidas (**BEE**).

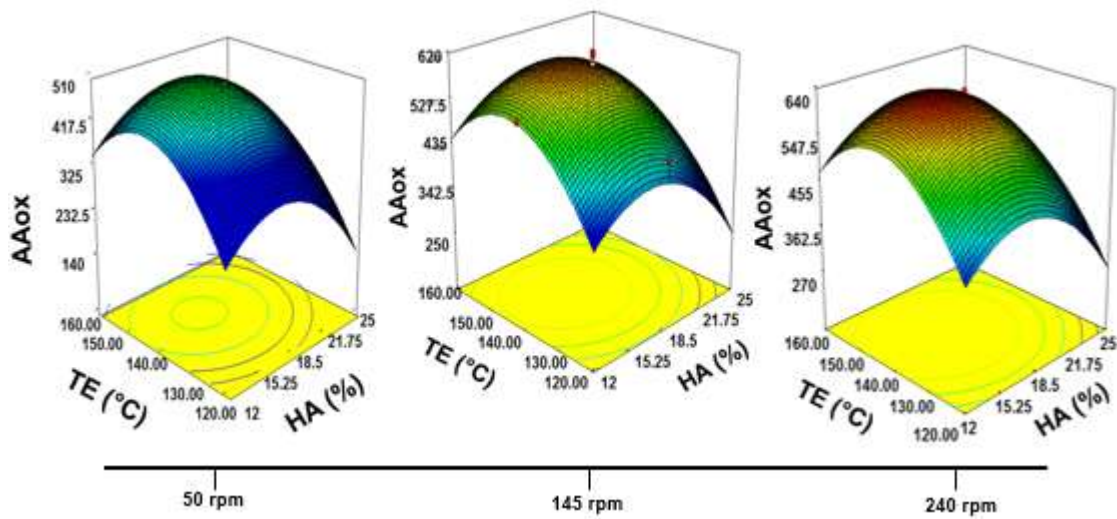


Figura 12: Graficas de superficie que muestran el efecto de la humedad de alimentación, temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (**HA**, **TE**, **VT**) sobre la actividad antioxidante (**AAox**) de las botanas extrudidas expandidas (**BEE**).

por primera vez por Franzke y Iwainsky (1954), los cuales descubrieron un incremento en esta actividad al aumentar del tiempo de calentamiento.

d. Contenido de antocianinas totales (CAT)

El contenido de antocianinas totales de las **(BEE)** vario de 2.83 y 7.06 mg equivalentes de Cianidina-3-Glucosido (C3G) / 100 g (bs), respectivamente (**Cuadro 10**). En el **Cuadro 11** se muestra la estimación de los coeficientes de regresión y análisis de varianza y el modelo de predicción para el **CAT** de las **BEE**. Este análisis mostro que el **CAT** de las **BEE** fue significativamente dependiente de los términos lineales temperatura de extrusión (**TE**) y velocidad de tornillo (**VT**) ($p < 0.05$), así como de los términos cuadráticos de humedad de alimentación $[(HA)^2]$, temperatura de extrusión $[(TE)^2]$ y velocidad de tornillo $[(VT)^2]$, ($p < 0.05$), (**Cuadro 11**). El modelo de predicción obtenido para **IE** (Variables no codificadas) fue:

$$\text{CAT} = 6.26 - 0.65*TE + 0.92*VT - 0.42*HA^2 - 0.49*TE^2 - 0.26*VT^2$$

Este modelo de predicción explico 89.24 % de la variabilidad total ($p=0.0001$) de los valores de **CAT** de las **BEE**. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue 0.8540 y la falta de ajuste fue no significativa ($p= 0.4349$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo fue de 8.17 %. Estos valores indican que el modelo experimental para el **IE** de las **BEE** fue adecuado y reproducible. A partir del modelo de predicción se construyeron graficas de superficie de respuesta (**Figura 13**) en las cuales se observa el efecto de **TE** y **VT** sobre el contenido de antocianinas totales de las **BEE**. En las gráficas se puede observar que a **TE** bajas y **VT** elevadas hay un mayor **CAT** presente en las **BEE**, esto puede deberse a que las

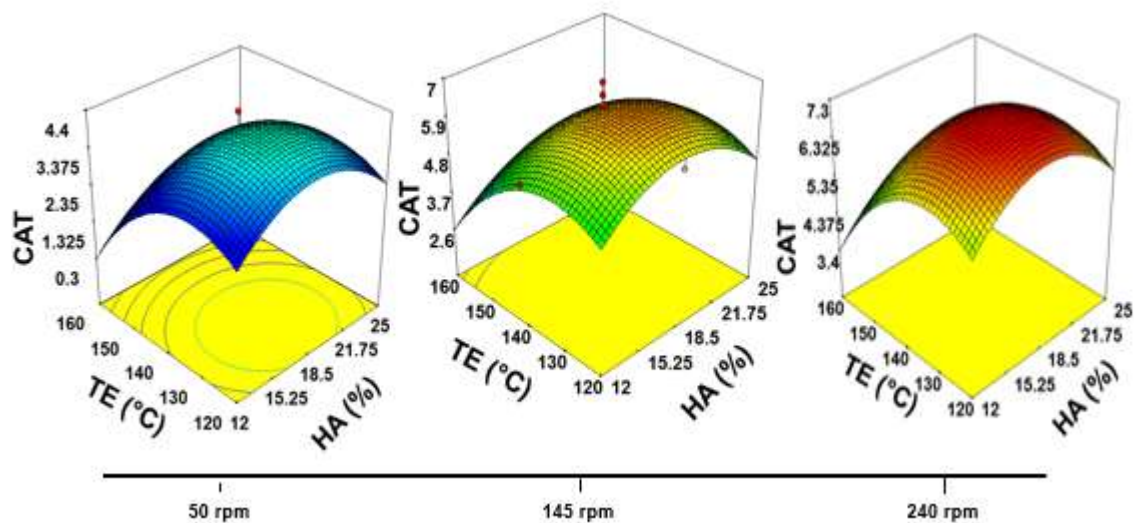


Figura 13: Graficas de superficie que muestran el efecto de la temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (**TE**, **VT**) sobre el contenido de antocianinas totales (**CAT**) de las botanas extrudidas expandidas (**BEE**).

antocianinas son compuestos termolábiles los cuales se desnaturalizan por efecto de la temperatura, sin embargo, a **VT** elevadas el tiempo de residencia de la muestra dentro del barril del extrusor disminuye, minimizando así el daño térmico a las antocianinas, dando como resultado una menor disminución al **CAT** de las **BEE**.

1. Optimización del proceso de extrusión para la obtención de BEEO de maíz azul y chía

Las mejores condiciones de procesamiento para la obtención de botanas extrudidas expandidas de maíz azul y chía correspondieron aquellas donde se obtuvo el máximo valor de deseabilidad global (**Figura 14**). El valor de deseabilidad global obtenido durante la optimización del proceso de extrusión, para la obtención de **BEEO**, fue de 0.994; esta deseabilidad corresponde a condiciones de operación del extrusor donde el índice de expansión, actividad antioxidante y contenido de antocianinas totales obtuvieron los máximos valores posibles [**HA**= 14.4 %, **TE**= 142 °C y **VT**= 240 rpm]. Esta combinación de variables de proceso, permite obtener valores predichos de las variables de respuesta, obtenidos usando los modelos de predicción de cada variable de respuesta y las condiciones de extrusión optimizadas, los cuales fueron: **IE**= 2.59, **Du**= 5.70 N, **AAox**= 612.94 µmol ET/ 100 g, bs y **CAT**= 6.50 mg Eq. Cianidina-3-glucósido/100 g. Se aplicó la mejor combinación del proceso de extrusión, para la obtención de una **BEEO**. Los valores experimentales de las variables de respuesta fueron: **IE**= 2.37, **Du**= 5.59 N, **AAox**= 611.66 µmol ET/ 100 g, bs y **CAT**= 7.75 mg Eq. Cianidina-3-glucósido/100 g. Estos fueron similares a los valores predichos, lo que significa que las condiciones de extrusión optimizadas fueron adecuadas y reproducibles.

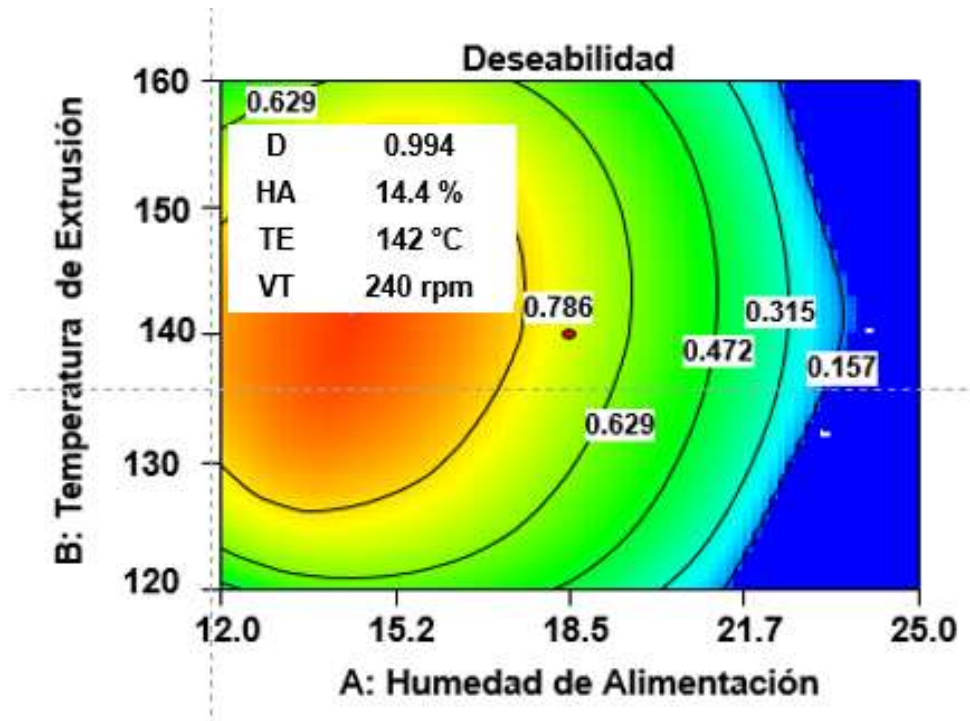


Figura 14: Grafico de deseabilidad global de las variables de respuesta, índice de expansión, dureza, actividad antioxidante y contenido de antocianinas totales (**IE**, **Du**, **AAox** y **CAT**) para la optimización del proceso de extrusión para la obtención de una botana extrudida expandida optimizada (**BEEO**) de maíz azul y chía.

2. Composición química y propiedades fisicoquímicas de las mezclas de harina de maíz azul (HMA) y chía (HCH) crudas y de las BEEO.

En el **Cuadro 12** se presenta la composición química y propiedades fisicoquímicas de las mezclas de **HMA** y **HCH** en la siguientes combinaciones, **HC 0%** (**HMA 100%** + **HC 0%**), **HC 10%** (**HMA 90%** + **HC 10%**), **HC 20%** (**HMA 80%** + **HC 20%**) y **HC 30%** (**HMA 70%** + **HC 30%**), así como de las botanas extrudida expandidas optimizadas en las mismas proporciones (**BEEO 0%**, **BEEO 10%**, **BEEO 20%** y **BEEO 30%**). La mezcla optimizada fue **HC 30%** y **BEEO 30%**.

El contenido de proteína de las **HC** fue de 11.92%, 15.12%, 16.32% y 17.87%, para las **BEEO** fue de 11.18%, 11.91%, 14.92% y 16.13% respectivamente. El nivel de lípidos de las **HC** fue de 5.30%, 8.53%, 11.37% y 14.54% y para las **BEEO** fue de 2.18%, 2.58%, 3.48% y 4.27%, respectivamente. Podemos destacar que la **BEEO 30%** presento menores valores de proteína y lípidos que la **HC 30%**.

La diferencia total de color (ΔE) de **HC** fue de 30.84%, 32.41%, 34.20% y 36.66%, para las **BEEO** fue de 30.94%, 32.96%, 36.17% y 39.59%. La ΔE se evaluó utilizando como estándar de referencia un mosaico color blanco; mayores valores de ΔE significan harinas más oscuras.

Las **HC** registraron valores de actividad acuosa de 0.40 a 0.42, las **BEEO** presentaron valores de 0.33 a 0.37, respectivamente; este rango de actividad acuosa está relacionado con productos de vida de anaquel larga.

Las **HC** presentaron valores de pH de 5.91 a 6.04, para las **BEEO** fue de 5.96 a 6.36. Al comparar los resultados de las harinas crudas con las **BEEO**, se observa que las **HC** optimizada incrementó su pH al someterse al proceso de extrusión; esto se debe a la adición de cal durante la preparación de la alimentación.

Cuadro 12. Composición química y propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul (**HMA**) y chía (**HCH**) y de botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**) de maíz azul y chía.

	HC 0%	HC 10%	HC 20%	HC 30%	BEEO 0%	BEEO 10%	BEEO 20%	BEEO 30%
Propiedad ¹								
C. Química(%bs)								
Proteína cruda	11.92±0.1 ^d	15.12±0.0 ^c	16.32±0.1 ^b	17.87±0.1 ^a	11.18±0.2 ^e	11.91±0.2 ^d	14.92±0.2 ^c	16.13±0.2 ^b
Lípidos	5.30±0.08 ^d	8.53±0.29 ^c	11.37±0.2 ^b	14.54±0.0 ^a	2.18±0.05 ^h	2.58±0.10 ^g	3.48±0.01 ^f	4.27±0.07 ^e
Cenizas	1.67±0.08 ^e	2.19±0.14 ^d	2.56±0.12 ^b	2.81±0.04 ^a	1.68±0.10 ^e	1.79±0.08 ^e	2.35±0.22 ^c	2.70±0.07 ^{ab}
Carbohidratos	67.89±0.2 ^b	58.38±0.4 ^d	52.36±0.15 ^f	42.35±0.8 ^g	72.32±0.4 ^a	68.50±0.2 ^b	62.72±0.4 ^c	56.90±0.2 ^e
Fibra dietaria								
Soluble	0.96±0.68 ^b	9.33±0.04 ^d	10.37±0.02 ^f	12.67±0.6 ^g	0.78±0.01 ^a	9.04±0.01 ^b	9.78±0.02 ^c	12.54±0.2 ^e
Insoluble	11.38±0.3 ^b	6.48±0.1 ^d	7.21±0.03 ^f	9.02±1.04 ^g	10.69±0.1 ^a	6.27±0.02 ^b	6.78±0.10 ^c	6.72±0.02 ^e
Total	13.3±0.38 ^b	15.7±0.35 ^d	17.4±0.47 ^f	21.5±1.47 ^g	12.4±0.35 ^a	15.2±0.19 ^b	16.4±0.05 ^c	20.0±0.25 ^e
Fisicoquímicas								
Color								
Valor Hunter “L”	60.30±0.6 ^e	64.66±0.5 ^b	62.73±0.5 ^c	60.39±0.9 ^e	66.86±1.0 ^a	64.41±0.5 ^b	61.13±0.7 ^d	57.84±1.55 ^f
ΔE	30.84±0.6 ^e	32.41±0.4 ^d	34.20±0.4 ^c	36.66±1.1 ^b	30.94±1.0 ^e	32.96±0.4 ^d	36.17±0.7 ^b	39.59±1.6 ^a
Aw	0.40±0.01 ^b	0.42±0.02 ^a	0.42±0.01 ^a	0.42±0.03 ^a	0.33±0.02 ^d	0.37±0.01 ^c	0.35±0.01 ^{cd}	0.36±0.02 ^c
pH	6.04±0.04 ^a	5.96±0.01 ^b	5.93±0.03 ^b	5.91±0.03 ^b	5.98±0.02 ^b	5.96±0.04 ^b	6.15±0.18 ^a	6.36±0.23 ^a

3. Actividad antioxidante de las mezclas de harina de maíz azul (HMA) y chíá (HCH) crudas y de las BEEO.

El contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) en las mezclas de harinas de maíz azul y chíá (crudas) y de las botanas extrudidas expandidas optimizadas de maíz azul y chíá (**BEEO**), fue de 519.5 – 620.1 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (bs) y 460.6 – 563.4 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (bs) respectivamente. En el **cuadro 13** se presenta la actividad antioxidante hidrofílica (suma de actividades antioxidantes de fitoquímicos ligados y libres) de mezclas de **HMA** y **HCH** y de las (**BEEO**), la cual se determinó empleando las metodologías de **ABTS** y **DPPH** obteniendo valores para las mezclas de harinas crudas de **ABTS**= 6270.1 – 10262 (63.66 %) y **DPPH**= 455.9 – 571.8 (25.42 %) μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100 g de muestra (bs), respectivamente. La actividad antioxidante hidrofílica (**AAox**) de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**), evaluada por las dos metodologías mencionadas anteriormente y cuantificada en μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100 g de muestra (bs) fue: **ABTS**= 7680.6 – 11774.5 (53.30 %) y **DPPH**= 428.8 – 611.6 (42.63 %). Los valores de **AAox** evaluada por los métodos de **ABTS** y **DPPH** mostraron un comportamiento similar tanto en las harinas crudas como en las botanas extrudidas. En las **HC** Y **BEEO** la mayor contribución de la **AAox** correspondió a los fitoquímicos ligados (**ABTS**= 94.20 %, **DPPH**= 16.29 %), independientemente de la metodología utilizada. Para las harinas crudas este incremento puede explicarse, debido al aumento del porcentaje de **HCH** en la mezcla con **HMA**; debido a que la chíá tiene alrededor de un 95 % mayor actividad antioxidante

Cuadro 13: Actividad antioxidante de harinas de maíz azul y chíá (mezclas optimizadas) y de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**)

Propiedad ¹	HC 0%	HC 10%	HC 20%	HC 30%	BEEO 0%	BEEO 10%	BEEO 20%	BEEO 30%
CFT¹								
Libres	167.4±2.9 ^c	178.2±3.2 ^b	188.2±4.2 ^a	204.5±7.4 ^c	153.3±8.3 ^b	154.0±4.6 ^a	180.0±19 ^b	196.1±8.2 ^a
Ligados	352.1±11.4 ^b	354.1±5.7 ^b	357.3±19.5 ^a	415.6±37.6 ^b	307.3±2.16 ^b	358.8±12.7 ^a	351.9±1.9 ^b	367.3±17.5 ^a
Total	519.5±13.9 ^c	532.4±2.9 ^b	545.6±15.2 ^a	620.1±44.3 ^c	460.6±6.2 ^b	512.9±9.1 ^a	532.0±19.0 ^b	563.4±10.3 ^a
(AAox)²								
ABTS								
Libres	1059.8±78.8 ^c	1163.9±23.4 ^b	1287.6±9.89 ^a	1343.1±24.2 ^c	645.6±6.1 ^b	842.3±2.05 ^c	1257.5±35.9 ^b	1655.9±3.5 ^a
Ligados	5210.2±91.6 ^b	8307.0±45.8 ^a	8789.0±115 ^c	8918.8±8.2 ^b	7035.0±21.7 ^a	7286.5±174 ^c	9370.4±62.1 ^a	10118.5±127 ^c
Total	6270.1±149 ^c	9471.0±61.8 ^a	10076.6±24 ^b	10262±27.8 ^c	7680.6±17.5 ^a	8128.8±174 ^b	10627.9±58 ^a	11774.5±130 ^b
DPPH								
Libres	140.4±12.8 ^c	190.6±1.5 ^b	267.9±23.9 ^a	333.7±26.3 ^c	79.8±5.6 ^b	124.3±4.6 ^a	171.0±8.2 ^b	244.7±8.9 ^a
Ligados	315.5±11.8 ^c	300.5±15.4 ^a	275.7±9.8 ^b	237.3±6.7 ^c	348.9±1.0 ^a	355.6±2.2 ^b	345.5±18.6 ^a	366.9±12.0 ^b
Total	455.9±22.2 ^c	491.1±14.2 ^a	543.7±28.7 ^b	571.8±31.8 ^c	428.8±6.6 ^a	480.0±2.5 ^b	516.6±14.5 ^a	611.6±19.1 ^b
CAT³								
Total	18.7±0.5 ^c	16.9±0.6 ^a	14.9±0.6 ^b	13.9±0.1 ^c	9.56±0.2 ^a	9.15±0.3 ^b	8.95±0.1 ^a	7.75±0.1 ^b

Los resultados se expresaron como promedio ± desviación estándar. Las medias se separaron por englones, aplicando la prueba de rangos múltiples de Duncan.
¹mg equivalentes de ácido Galico (EAG)/100 g, bs. ²μmol equivalentes de Trolox (ET)/100 g, bs. ³mg equivalentes de Cianidina-3-Glucosido (C3G)/100 g, bs.

que el maíz azul, por lo tanto, a mayor contenido de chíá en la mezcla dará como resultado un aumento en la **AAox**. Para el caso de las botanas extrudidas el aumento se puede explicar, debido a que durante el proceso de extrusión se produce la liberación de compuestos fenólicos lo cual da como resultado un aumento en la **AAox**.

Dewanto y col. (2002), reportaron que el procesamiento térmico puede liberar ácidos fenólicos ligados; ellos reportaron un incremento en la actividad antioxidante de maíz después de tratamientos térmicos.

Duenas y col. (2005), sugieren que durante el procesamiento térmico de leguminosas pueden formarse algunos compuestos como hidroximetilfulfuraldehído (**HMF**), producto de la reacción de maillard, que posee actividad antioxidante alta. El proceso de extrusión aumento en un 14.73 % el contenido de **AAox** de las **BEEO**.

Xuand-Chang (2008), evaluó el **AAox** (ensayo **ORAC**) de las garbanzos verdes, garbanzos y garbanzos extruidos extruidos y comparó los valores con los de las materias primas; el proceso de extrusión aumentó el **AAox** en 27–114, 12–67 y 25–40%, respectivamente. El aumento de **AAox** podría ser el resultado de: i) liberación de compuestos fenólicos antioxidantes durante el proceso de extrusión, ii) prevención de la oxidación de compuestos fenólicos en el producto extruido por inactivación enzimática durante el procesamiento, y iii) la presencia de Productos de reacción de Maillard con actividad antioxidante, generados durante la extrusión de materias primas que contienen aminoácidos y azúcares reductores, como el maíz y los frijoles (Nems y col, 2015).

Espinoza-Moreno y col. (2016), evaluaron el efecto del proceso de extrusión sobre la **AAox**. Observaron que se produjo un aumento en el contenido de fenólicos libres, ligados y totales en botanas expandidas optimizadas a base de maíz transgénico con

el gen amarantina y frijol negro común (**OES**), en 88.9, 74.0 y 74.3%, respectivamente, lo que explica una mejora en **AAox**. El aumento del contenido fenólico total durante el proceso de extrusión puede deberse a (i) la destrucción de las paredes celulares y la liberación de compuestos fenólicos, y ii) la formación de productos de reacción de Maillard que se cuantifican como compuestos fenólicos (Milan-Carrillo y col, 2012; Gazón-Tiznado y col, 2013).

El contenido de antocianinas totales (**CAT**) de las mezclas de harinas de maíz azul y chía (crudas) y de las botanas extrudidas expandidas optimizadas de maíz azul y chía (**BEEO**), fue de 18.7 – 13.9 (-34.53 %) mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (bs) y 9.56 – 7.75 (-23.35 %) mg equivalentes de Cianidina-3-Glucosido (C3G)/100 g, (bs), respectivamente (**Cuadro 13**).

Camacho-Hernández y col. (2014), reportaron resultados similares para el **CAT** de botanas extrudidas de tercera generación obtenidas de la mezcla de maíz azul y almidón de maíz. Los valores de **CAT** mínimo (41.16 mg / kg db) y máximo (82.3 mg / kg db) correspondieron a 105 ° C de **VT** / 22% de **HA** y 135 ° C de **VT** / 32% de **HA**, respectivamente. Estos datos indican una disminución de **CAT** en 70–85% en relación con la materia prima (248.67 ± 4.33 mg / kg). Se han reportado pérdidas de 64 a 90% para el **CAT** causado por la extrusión donde se incorporaron concentrados de arándanos y arándanos a los cereales extruidos de maíz para el desayuno (Camire Y col. 2003).

Aguayo-Rojas y col. (2012), encontraron una pérdida de **CAT** de 53.5% en tortillas elaboradas a partir de maíz azul extruido para cocción con cal. Debido a los tratamientos térmicos, la antocianina puede sufrir importantes cambios estructurales, como la conversión a calconas incoloras (Wrolstad y col, 2002), y debido a su

termolabilidad, las calconas pueden degradarse instantáneamente en ácidos fenólicos (Stintzing, 2007). Por otro lado, la polimerización y el oscurecimiento también conducen a una disminución en el **CAT** (Singh y col, 2007).

4. Propiedades físicas, morfométricas y de textura de las BEEO.

a. Dureza (Du)

Los valores de dureza mostraron diferencia estadística significativa ($p < 0,5$) para para cada una de las 4 BEEO. Los valores obtenidos de dureza de las botanas fueron de 2.03 – 5.59 N, a diferencia de nuestra **BC** que tuvo un valor de 2.45 N (**Cuadro 14**). Los valores más pequeños de dureza se obtuvieron en la **BEEO 0%** mientras que los valores máximos de dureza se obtuvieron en la **BEEO 30%**. Esto podría explicarse un menor esfuerzo a la penetración por una mayor cantidad de poros con aire formados en la **BEEO 0%**, los cuales presentan una menor resistencia al esfuerzo de penetración (Hernández-Díaz, Quintero-Ramos, Barnard, y Balandran-Quintana, 2007). La **BEEO 30%**, al contener una mayor cantidad de chíá, aumenta el contenido de fibra y aceite en la muestra, dando como resultado una muestra más compacta y con mayor resistencia al esfuerzo de penetración. Los valores de firmeza obtenidos para la **BEEO 0%** pudieran compararse con la textura de una botana elaborada comercialmente a partir de almidón de maíz la cual presentó una firmeza de 8,8 N (Noorakmar y col, 2012).

b. Índice de expansión

Los valores de **IE** de las botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**) variaron entre 2.37 y 3.23, donde el valor más alto se obtuvo en las muestra **BEEO 0%** (**Cuadro 14**). En la **figura 15** se puede observar el aumento del **IE** en las **BEEO**.

Cuadro 14. Propiedades físicas, morfométricas y de textura de botanas extrudidas expandidas optimizadas (**BEEO**) de maíz azul y chía.

	BEEO 0%	BEEO 10%	BEEO 20%	BEEO 30%	BC
Propiedad ¹					
Física					
Dureza (Du)	2.03±0.16 ^e	4.57±0.48 ^c	5.09±0.55 ^b	5.59±0.30 ^a	2.45±0.20 ^d
Índice de expansión (IE)	3.23±0.08 ^a	2.55±0.13 ^b	2.46±0.17 ^b	2.37±0.08 ^b	3.29±0.85 ^a
Densidad aparente (DA)	0.11±0.04 ^{bc}	0.19±0.02 ^b	0.21±0.02 ^b	0.21±0.01 ^b	0.27±0.21 ^a
Textura					
Crispness	5.40±3.36 ^d	28.82±19.56 ^a	14.14±6.36 ^b	15.14±5.56 ^b	8.46±6.56 ^c
Crunchiness	0.003±0.001 ^b	0.005±0.007 ^b	0.008±0.003 ^a	0.009±0.003 ^a	0.005±0.003 ^b
Morfométrica					
Entropía de imagen (Ent)	8.02±0.10 ^a	8.16±0.13 ^a	8.12±0.27 ^a	8.29±0.11 ^a	7.61±0.38 ^b
Dimension fractal de textura (Dft)	2.73±0.01 ^a	2.74±0.004 ^a	2.73±0.009 ^a	2.74±0.01 ^a	2.70±0.24 ^b
Lagunaridad de textura (Λ_t)	0.11±0.01 ^a	0.07±0.005 ^b	0.10±0.02 ^b	0.09±0.02 ^b	0.13±0.24 ^a

Las medias fueron separadas por renglones aplicando la prueba de rangos múltiples de Duncan. Medias de la misma letra no son diferentes ($p \leq 0.05$)

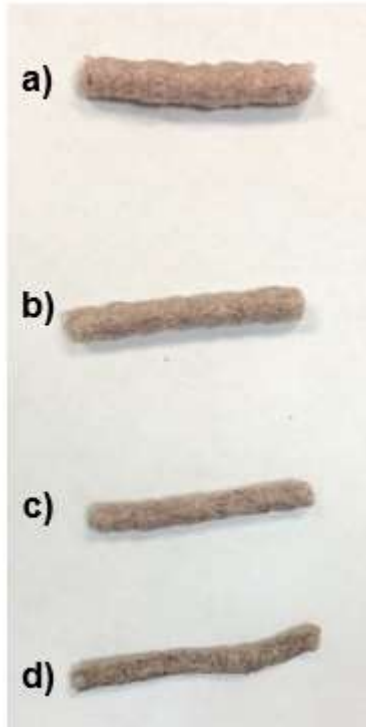


Figura 15: Índice de expansión de las **BEEO** a) **BEEO 0 %**, b) **BEEO 10 %**, c) **BEEO 20 %** y d) **BEEO 30 %**.

Esto pudiera deberse al mayor contenido de almidón, por efecto de la harina de maíz azul, ya que, durante la extrusión, el almidón genera estructuras con mayor número de poros y tamaño, lo que favorece la expansión. Así mismo, el tipo de almidón también puede influir en el **IE** de las **BEEO**, lo que puede afectar el grado de expansión de la botana (Camacho-Hernández y col, 2014). Los valores mínimos de **IE** se reportaron en la **BEEO 30%**, esto puede deberse al aumento del contenido de fibra y aceite en la muestra lo cual da como resultado una disminución en el **IE** de las botanas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por:

Ferreira y col. (2011) evaluaron extrudidos a base de maíz y salvado de trigo y reportaron que la expansión fue inhibida a medida que fue aumentado el contenido de salvado de trigo a la formulación (20%) y extrudida a altas temperaturas (superiores a 140 °C) en la última zona del extrusor.

Nascimento y col. (2011) elaboraron un extrudido a base de harina de sésamo parcialmente desgrasada (ajonjolí) en proporciones de 0 a 20% y harina de maíz. Estos autores reportaron que la adición de harina desgrasada de sésamo disminuyó el **IE**, al aumentar la velocidad del tornillo aumentó el cizallamiento y por lo tanto disminuyó la viscosidad favoreciendo el crecimiento de burbujas de aire que dieron lugar a productos con mayor expansión.

Gomez-Lopez y col. (2013) elaboraron botanas expandidas a base de chía (0 al 17 %) y almidón de maíz resistente. Estos autores reportaron valores de **IE** de 1.74 a 3.33, observando que al aumentar el contenido de harina de chía el **IE** de las botanas disminuía. Por lo tanto lograron concluir que a mayor porcentaje de harina de chía, menor sería índice de expansión.

c. Densidad aparente (DA)

Se encontraron valores para la **DA** en un rango de 0.11 a 0.21 g/cm³ (**Cuadro 14**). Estos valores fueron muy cercanos a los reportados para la BC la cual tuvo un valor de 0.27 g/cm³. Los valores más altos de **DA** fueron obtenidos por la **BEE0 30%** ya que podemos decir que la **DA** es inversamente proporcional al **IE**. La densidad aparente de un material es la relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo la presencia o ausencia de orificios y poros aparentes, que contenga el producto. La densidad consiste en medir la expansión de los extrudidos en todas direcciones (Wang y col, 2007), la medida de esta propiedad es importante debido a que se puede relacionar con el costo del producto y el llenado del empaque final. Esto concuerda con lo reportado por:

Norajit y col. (2011) investigaron las propiedades fisicoquímicas de un extrudido a base de harina desgrasada y no desgrasada de cáñamo en distintas proporciones (20%, 30% y 40%) junto con harina de arroz. Los autores reportaron valores de 190 a 350 kg/m³ para el caso de la harina desgrasada, la expansión se obtuvo cuando la harina de arroz fue mezclada con un bajo contenido de polvo de cáñamo, los extruidos con un bajo nivel de polvo de cáñamo mostraron un incremento en la expansión. En contraste, el valor más bajo de densidad aparente se obtuvo cuando harina de arroz fue mezclada con un bajo contenido de polvo de cáñamo. En general, la expansión del material extruido es inversamente proporcional a la densidad aparente.

Pastor-Cavada y col. (2011) elaboraron extrudidos a base de maíz y arroz integrales, adicionando leguminosas silvestres, las muestras fueron obtenidas con un extrusor Brabender 20 DN con las siguientes condiciones: compresión de tornillo 4:1; velocidad de tornillo 150 rpm, y temperatura de extrusión: 175 °C; estos autores

encontraron que la adición de leguminosas produce un aumento en la densidad aparente de los extrudidos.

Gomez-Lopez y col. (2013) elaboraron botanas expandidas a base de chíá (0 al 17 %) y almidón de maíz resistente. Estos autores reportaron valores de DA de 159.15 a 443.24 Kg/m³, observando que al aumentar el contenido de harina de chíá el IE de las botanas disminuía mientras la DA de las botanas aumentaba.

d. Crispness y Crunchiness

Los valores de **crispiness** (5.40 - 28.82) y **crunchiness** (0.003 – 0.009) (**Tabla 14**), estos valores fueron aumentando significativamente al adicionar un mayor contenido del **HCH** en la mezcla (0%, 10%, 20% y 30%) respectivamente.

Los valores mínimos de **Crispness y Crunchiness** fueron en la **BEE0 0%**, esto pudiera deberse al mayor contenido de almidón, por efecto de la harina de maíz azul, ya que, durante la extrusión, el almidón genera estructuras con mayor número de poros y tamaño, lo que favorece la expansión, lo cual hace que se requiera una menor fuerza para su ruptura. Los valores mínimos de **Crispness y Crunchiness** se reportaron en la **BEE0 30%**, esto puede deberse al aumento del contenido de fibra y aceite en la muestra lo cual da como resultado la formación de estructuras con un menor tamaño de poros, lo cual hace que se requiera un mayor esfuerzo para su ruptura. Estos resultados concuerdan con lo reportado por:

Valenzuela-Lagarda y col. (2017) obtuvieron valores de **crispiness** y **crunchiness** (0% 5711.2 y 613.7 N mm y 100% 5248.2 y 360.8 N mm), observaron que se redujeron significativamente al aumentar el contenido del manto de calamar, Tal reducción podría ocurrir porque la sustitución de la proteína del manto de calamar

por el almidón forma estructuras con mayor rigidez y resistencia en el alimento, de manera que la fuerza producida por el vapor de agua generado no puede formar cavidades en la matriz del alimento. Se informó un comportamiento similar en la extrusión de almidón modificado con diferentes concentraciones de proteína de soja (0, 6, 12 y 18%), ya que la incorporación de proteínas redujo la nitidez (Oliveira y col, 2017). De manera similar, en mezclas de maíz con fuentes de proteínas (por ejemplo, amaranto, quinoa y kaniwa), un aumento de proteína del 20 al 50% redujo los valores sensoriales de la nitidez (9–8) y la crujencia (7–6) (Ramos-Díaz y col, 2015). De manera similar, al extruir mezclas de sorgo-maíz y diferentes proteínas (p. Ej., Suero de leche, soja y leguminosas) en dos proporciones (1: 6 y 5: 2), la incorporación de proteínas redujo los valores de la nitidez, que se relaciona con una Tamaño de poro más pequeño de la extrusión (Devi y col, 2011).

e. Entropía de imagen (Ent)

La textura de la superficie de las BEEO fue asociado al parámetro entropía de imagen, el cual permitió determinar la aleatoriedad y uniformidad de los píxeles en nivel de gris, indicando su arreglo en cada una de las caras de la botana. Se encontraron valores para la entropía de imagen (**Ent**) en un rango de 8.02 a 8.29 (**Cuadro 14**). Estos valores fueron muy cercanos a los reportados para la **BC** la cual tuvo un valor de 7.61. Los valores obtenidos no presentaron una diferencia significativa entre las **BEEO**

f. Dimesion fractal de textura (D_f) y lagunaridad de textura (Λ_t)

La D_f es un parámetro que ha sido asociado a la rugosidad y la irregularidad de la superficie de objetos (**Figura 16**). Así mismo el parámetro Λ_t es considerado muy

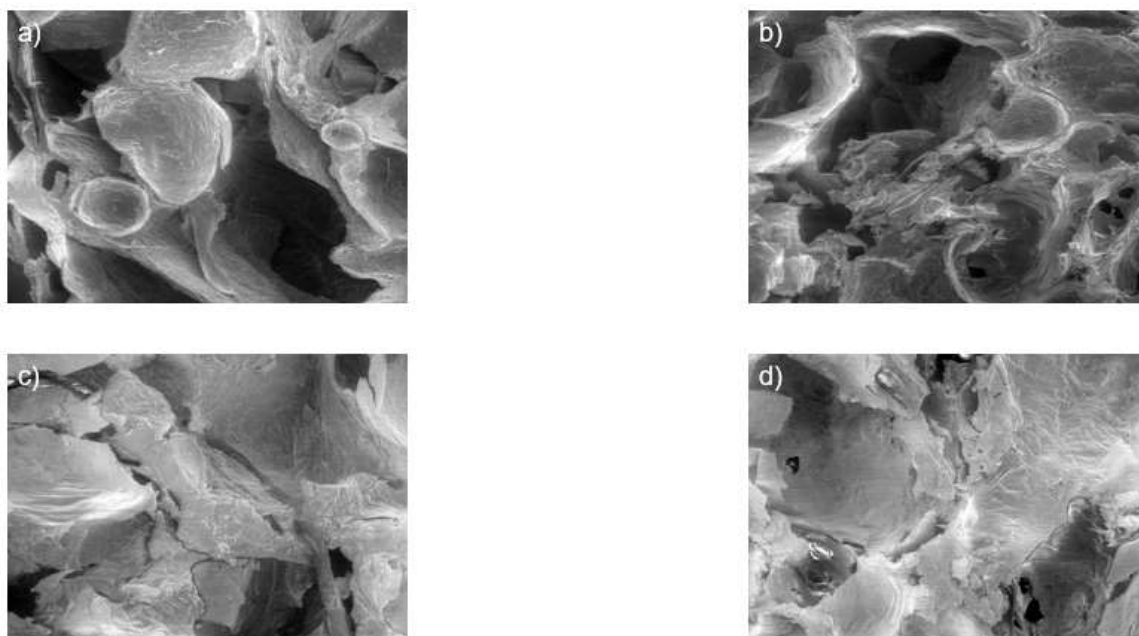


Figura 16: Microfotografías que muestran la estructura interna de las **BEEO**. a) **BEEO 0 %**, b) **BEEO 10 %**, c) **BEEO 20 %** y d) **BEEO 30 %**.

útil en la descripción de textura de imágenes que se han transformado a escala de grises, el cual se relaciona con la distribución de espacios vacíos y la simetría del conjunto de píxeles que integran la superficie de un objeto. La simetría de una imagen se puede describir mediante la lagunaridad, que es un parámetro de los patrones fractales. Es una medida de la distribución del conjunto de irregularidades y se describe mediante el parámetro de dimensión fractal (García-Armenta y col, 2016).

Se encontraron valores para la Df_t (2.73 – 2.74) y Λ_t (0.09 – 0.11) (**Cuadro 14**). Estos valores fueron muy cercanos a los reportados para la BC la cual tuvo valores de 2.70 y 0.13 respectivamente.

Valenzuela-Lagarda y col. (2017) obtuvieron valores para la Df_t (2.69 – 2.73) y Λ_t (0.06 – 0.14). La inclusión del manto de calamar tuvo un efecto positivo ($p < .05$) en la dimensión fractal y la lagunaridad. Observaron una dimensión fractal más alta en muestras con 100% de maíz y 100% de manto de calamar. A diferencia de los hechos con un manto de calamar al 60% tenían valores más bajos en la dimensión fractal, lo que se relacionaba con una estructura más regular y una superficie más lisa. Estas observaciones fueron atribuidas a la composición de los ingredientes: el maíz es rico en amilosa y proteína, y el calamar es rico en proteínas, que son componentes con estructuras moleculares lineales que generan estructuras densas y compactas.

g. Evaluación sensorial de la BEEO

La evaluación sensorial de las **BEEO** se llevó a cabo con un panel de 30 jueces no entrenados. Los miembros del panel fueron estudiantes de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, todos ellos familiarizados con el consumo cotidiano de botanas. La BEEO se evaluó empleando una escala hedónica

de 11 puntos (1=Máximo valor de desagrado imaginable, 11= Máximo valor de agrado imaginable) para el atributo de textura (**Figura 17**).

En dicho estudio se pudo apreciar que el 27% de los hombres y el 53% de las mujeres estaban en un intervalo de edad de 18 a 29 años, del 7 al 10% presentaron una edad entre 30-39 años y solo el 3% se encontraban en un intervalo de 40-49 años. En los primeros dos grupos de edad se concentraron más del 90% de los evaluadores.

La **Figura 18** muestra el resumen los principales resultados del estudio sensorial de textura de las **BEEO** (textura = aceptabilidad global), en términos de análisis de frecuencia (%). Los valores de % de frecuencia de textura de las botanas variaron de 66.27 – 52.11. La botana que obtuvo un mayor % de frecuencia fue la **BEEO 0%**, a diferencia de la **BEEO 30%** fue la que tuvo el menor porcentaje. Los valores de la **BEEO 0%** fueron cercanos a los obtenidos por la **BC** la cual tuvo un % de frecuencia del 76.90.

Estos resultados nos indican que a mayor contenido de **HCH** el % de frecuencia de textura disminuía, debido a que el IE de las botanas era menor. Dando como consecuencia una aceptabilidad global menor de las botanas.

Un estudio realizado por Hashempour-Baltork y col., (2017) evaluaron sensorialmente bajo una escala hedónica de 5 puntos (1= me disgusta

POSGRADO CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Fecha_____ Edad_____ Género: Masculino Femenino Muestra: _____

Prueba la botana que se te presente y evalúa los siguientes criterios (marca con una X tu respuesta en cualquier punto de la recta)

1. Apariencia y color de esta botana:



2. Sabor de la botana



3. Textura de esta botana



4. Considerando el sabor, textura y apariencia, ¿Qué tanto de agrada o desagrada esta botana (Aceptabilidad global)?



5. ¿Compraría esta botana?

Sí_____ No_____

Comentarios_____

¡Muchas gracias por tu participación!

Figura 17: Escala hedónica de 11 puntos (1=Máximo valor de desagrado imaginable, 11= Máximo valor de agrado imaginable) para el atributo de textura de las **BEOO**.

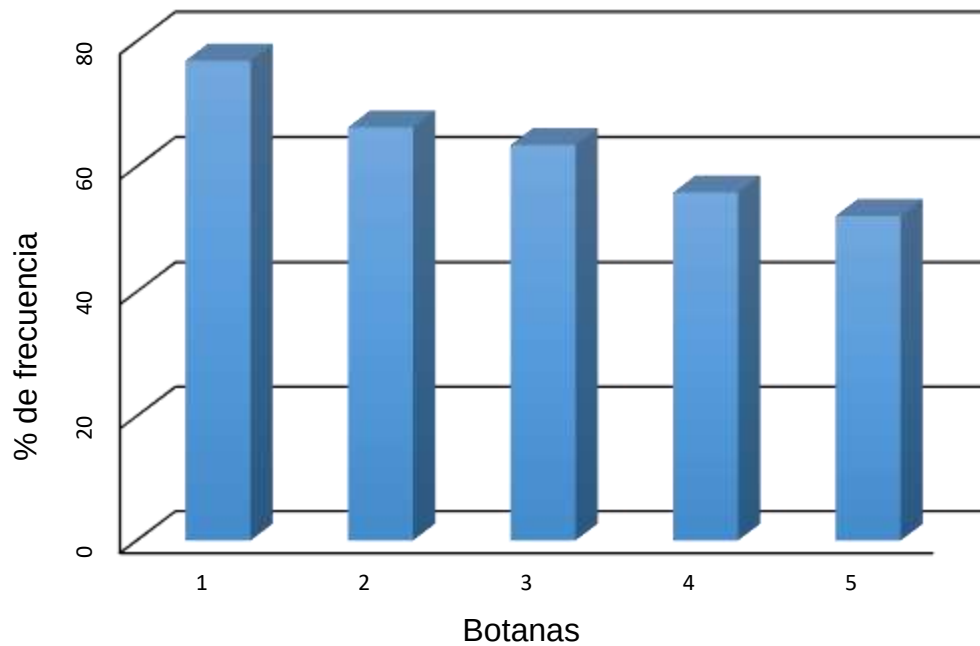


Figura 18. Análisis de frecuencia de la aceptabilidad global de los evaluadores, en el análisis sensorial de los productos extrudidos de maíz azul y chía (**BEE0**) y botana comercial (**BC**). (Escala: 1 = **BC**; 2= **BEE0 0%**; 3= **BEE0 10%**; 4= **BEE0 20%**; 5= **BEE0 30%**).

extremadamente y 5= me gusta extremadamente) botanas expandidas de maíz y harina de sésamo (0, 5, 10 y 15%) bajo condiciones de extrusión a las cuales. La evaluación sensorial demostró que las muestras con un 5% y un 10% de polvo de sésamo tuvieron la puntuación más alta desde el punto de vista del sabor y el aroma y, cuando se aumentó el contenido de polvo de sésamo, se redujo la aceptabilidad del producto.

Reddy y col., (2014) elaboraron botanas “listas para comer” (RTE) a partir de mezclas hechas con harina de maíz, harina de gramo, harinas de raíces y tubérculos (papa, ñame, batata, taro y raíz de remolacha) en una proporción de 60–80: 20: 20 respectivamente, evaluando la aceptación sensorial del producto. 30 panelistas participaron en el análisis sensorial el día 0 y el día 60 (después del almacenamiento). Indicaron el gusto por el color y la apariencia, la textura, el sabor, el sabor, la sensación bucal y la aceptabilidad general en una escala de hedónico cinco puntos. Los resultados demostraron que la aceptabilidad general de los productos extrudidos RTE hechos con papa y taro fue altamente aceptable en comparación con el ñame y la batata. La evaluación de sabor mostró que la botana a base de papa era la que más les gustaba, seguida del control (maíz), taro, ñame, batata y remolacha. Con respecto a la textura, los productos extrudidos RTE hechos con papa fueron los que más les gustaron, seguidos del control, el taro, el camote, el ñame y la remolacha, tanto antes como después del período de almacenamiento. Los productos estaban crujientes, pero no eran porosos debido a la baja relación de expansión de 3.4.

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 estudiadas (**IE**, **Du**, **AAox**, **CAT**).
- 2) La mejor combinación de variables de proceso de extrusión para la producción de **BEEO** con valores altos de **IE** ($IE = 2.59$) **AAox** [$DPPH = 612.94 \mu\text{mol ET}/100\text{g (bs)}$], **CAT** [$CAT = 6.50 \text{ mg de Cianidina-3-glucósido}/100\text{g (bs)}$] y valores mínimos de **Du** ($Du = 5.70 \text{ N}$) fue **HA** = 14.4 %, **TE** = 142 °C y **VT** = 240 rpm. Estos fueron similares a los valores predichos, lo que significa que las condiciones de extrusión optimizadas fueron adecuadas y reproducibles.
- 3) Los datos experimentales obtenidos para cada una de las variables de respuesta estudiadas fueron similares a los valores predichos arrojados por los modelos de predicción.
- 4) El análisis digital mostró que el contenido de harina de chía (**HCH**) en la mezcla optimizada determinó la irregularidad y la heterogeneidad de la matriz microestructural de la **BEEO**, que estaba directamente relacionada con los parámetros físicos [dureza (**Du**), índice de expansión (**IE**), densidad aparente (**DA**)] y de textura (crispness, crunchiness). Estos resultados muestran que es posible incorporar hasta el 30% de **HCH** en la preparación de la **BEEO** mientras se mantienen las propiedades de textura y morfológicas que son competitivas con las botanas disponibles en el mercado actualmente. Esto permite un aumento de proteína, fibra, minerales y compuestos con una alta actividad antioxidante, lo que genera un producto con valores nutricionales más altos, lo

cual es altamente relevante para la aceptación de estos productos en el mercado actualmente.

- 5) Los resultados de la evaluación sensorial mostraron que el procesamiento de maíz azul y chíá, a través de la tecnología de extrusión, genera botana expandidas aceptables en términos de textura y aceptación global. Por lo que este producto puede ser utilizado como vía de incorporación de compuestos bioactivos, pudiendo ser agregado al mercado de botanas, dando lugar a productos más saludables para los consumidores.

X. BIBLIOGRAFIA

- Adom KK, Sorrells ME, Liu RH. 2003.** Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 7825-7834
- Adom KK, Liu RH. 2002.** Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:6182-6187.
- Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochin, S., Cuevas-Rodriguez, E. O., Serna-Saldivar, S. O., Gutierrez-Irube, J. A., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2012).** Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented Mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67, 178–185.
- Alonso R, Rubio LA, Muzquiz M, Marzo F. 2001.** The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. *Animal Feed Science and Technology* 94:1–13
- Andersson Y, Hedlund B. 1990.** Extruded wheat flour: correlation between processing and product quality parameters. *Food Quality and Preference* 2: 201–216
- Andreasen MF, Kroon PA, Williamson G, Garcia-Conesa MT. 2001.** Intestinal release and uptake of phenolic antioxidant diferulic acids. *Free Radical Biology and Medicine* 31: 304–314.
- Anónimo. 2007.** http://www.fao.org/index_es.htm. 20 de Diciembre 2007
- Arroyo C. A. D., C. Fuentes H., M. Fuentes A., H. Hernández B., J. Hernández C., M. Rojas P., C. Soto M. 1999.** Elaboración de una botana extruida de harina de plátano. *Ingeniería en Alimentos*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, 8–15 pp.

- Ayerza R, Coates W (2005).** Chia. Rediscovering a Forgotten Crop of the Aztecs (1st ed.). The University of Arizona Press, Tucson, USA, 197 p
- Ayerza, R., & Coates, W. (2010).** Effects of Seed Color and Growing Locations on Fatty Acid Content and Composition of Two Chia (*Salvia Hispanica* L.) Genotypes. *NewCrops*, 56-62
- Bhandari B, D’Arcy B, Young G. 2001.** Flavour retention during high temperature short time extrusion cooking process: A review. *International Journal of Food Science and Technology* 36:453–461
- Bhattacharya S. 1997.** Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering* 32: 83–99.
- Blumenthal M, Goldberg A, Brinckmann J. 2000.** Herbal Medicine: Expanded Commission E Monographs. Integrative Medicine Communications, USA.
- Bressani R, Turcios JC, Reyes L, Mérida R. 2001.** Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América central. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 51:309- 313.
- Bressani R, Benavides V, Acevedo E, Ortiz MA. 1990.** Changes in selected nutrient content and in protein content and in protein quality of common and quality protein maize during rural tortilla preparation. *Cereal Chemistry* 67: 515-518.
- Bozan B, Temelli F (2008).** Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils. *Bio Tech* 99, 6354-6359
- Buckler ES, Gaut BS, McMullen MD. 2006.** Molecular and functional diversity of maize. *Plant Biology* 9:172-176.

- Bueno, M., Di Sapia, O., Barolo, M. B., & Quiroga, M. S. (2010).** *Análisis de la calidad de los frutos de Salvia hispanica L comercializados en la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina). Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 9 (3): 221-227.
- Burge RM, Duensing WJ. 1989.** Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran. *Cereal Foods World* 34:535-538.
- Bushway A. A., Belya P. R., and Bushway R. J. 1981.** Chia seed as a Source of Oil, Polysaccharide, and Protein. *Journal of Food Science* 46: 1349-1356.
- Bussilacchi, H., Quiroga, M., Bueno, M., Di Sapia, O., Voykos, F., & Severin, C. (2013).** Evaluación de Salvia Hispanica L cultivada en el sur de Santa Fe (República Argentina). *INCA. Cultivos Tropicales*, 34 (4): 55-59.
- Camire EM, Camire A, Krumhar K. 1990.** Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 29: 35-57.
- CANACINTRA. 2015.** Datos relevantes de la Industria de Botanas. (Disponible en línea en http://www.botanas.org.mx/botana/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=204) (Consulta: 10 de marzo de 2017)
- Casiraghi MC, Garsetti M, Testolin G, Brighenti F. 2006.** Post-prandial responses to cereal products enriched with barley beta-glucan. *Journal of the American College of Nutrition* 25:313-320.
- Cheftel J. C. 1989.** Extrusion cooking and food safety. *Extrusion Cooking*. C. Mercier, P. Linko, and J. M. Harper, eds. AACC International: St. Paul, MN, 435-464.

- Codex Mendoza (1542).** Ed. Francisco del Paso y Troncoso (1925). Museo Nacional de Arqueología, Historia y Etnografía, México DF, México
- Colonna P, Tayeb J, Mercier C, 1989.** Extrusión Cooking of Starch and Starchy Products. En. Mercier C, Linko P, Harper J, (editores). "Extrusion Cooking". Capítulo 10. American Association of Cereal Chemistry. St. Paul, MN, EUA, pp 247-319.
- Davidson VJ, Patun D, Diosady LL, La Rocque GJ. 1984.** Degradation of wheat starch in a single screw extruder: Characteristics of extruded starch polymers. Journal of Food Science 49:453-458.
- De la Parra C, Serna-Saldivar SO, Ruiz L 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 SR, Domínguez DJ. 2002.** Métodos de superficie de respuesta; un estudio comparativo. Revista de Matemáticas, Teoría y Aplicación 1:47-65
- Dewanto V, Wu X, Liu RH. 2002.** Processed sweet corn has higher antioxidant activity. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50:4959-4964.
- Ding, Q., Ainsworth P., G. Tucker and H. Marson. 2005.** The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of ricebased expanded snacks. Journal of Food Engineering 66(3): 283-289.
- Dykes L, LW Rooney. 2006.** Sorghum and millet phenols and antioxidants. Journal of Cereal Science 44:236-251.
- Dziezack DJ. 1989.** Single and twin extruders in food processing. Food Technology 43:163-174.

- Eckhoff SR, Paulsen MR, Yang SC. 2003.** Maize. En: Caballero B, Trugo LC y Finglas PM. (editores). "Enciclopedia of Food Sciences and Nutrition".6th ed. United Kingdom: Elsevier Science Ltd. pp. 3647-3653.
- Elleuch M, Besbes S, Roiseux O, Blecker C, Attia H (2007).** Quality characteristics of sesame seeds and by-products. Food Chem 103, 641-650
- Engel FA (1987).** De las begonias al maíz: vida y producción en el Perú antiguo. Centro de Investigaciones de Zonas Áridas. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú
- FAO. 1993.** El maíz en la nutrición humana. En "Colección FAO: Alimentación y Nutrición", N°25, Italia, Roma, www.fao.org, (Noviembre, 2009).
- FAOSTAT. 2015.** Disponible el 14 de marzo de 2017 en :<http://www.faostat.org/faostat>
- Fardet A, Rock E, Christian R 2008.** Is the in vitro antioxidant potential of whole-grain cereals and cereal products well reflected in vivo. Journal of Cereal Science 48:258-276.
- Fellows PG. 1990.** Extrusion, Food Processing and Technology En: Harwood DE (editores), Principles and Practice. Great Britain, p. 267-277.
- Gali-Muhtasib H, Hilan C, Khater C. 2000.** Traditional uses of *Salvia libanotica* (East Mediterranean sage) and the effects of its essential oils. Journal of Ethnopharmacology 71, 513-520.
- González RJ, Torres RL, De Greef DM. 2002.** Extrusión-cocción de cereales. Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos. 36: 104-115.

- Gujaska 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.
- Guiotto EN, Ixtaina VY, Tomás MC, Nolasco SM (2011).** Moisture-dependent physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Trans ASABE* 54 (2), 1-7
- Guy RCE. 2003.** Extrusion cooking. En: "Encyclopedia of Food Sciences and Nutritions". 2^a ed. New York: Academic Press.
- Guzman-Tello R, Cheftel JC. 1990.** Colour loss during extrusion cooking of betacarotene wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing. *International Journal of Food Science and Technology* 25:420-434.
- Hahn DH, Faubion JM, Rooney LW. 1983.** Sorghum phenolic acids, their high performance liquid chromatography separation and their relation to fungal resistance. *Cereal Chemistry* 60:255–259.
- Harper JM, Tribelhorn RE. 1992.** Expansion of native cereal starch extrudates. En: JL. Kokini, C Ho, MV Karwe, editores. *Food extrusion science and technology*. NY: Dekker Inc. p 653-67.
- Harper JM. 1981.** Food Extrusion. En: Harper JM editor. "Extrusion of Foods" Vol1. Boca Ratón, FL, EUA: CRC Press Inc. pp 1-6
- Hellin, J., Keleman, A., López, L., Donet, L., & Flores, D. (2013).** La importancia de los nichos de mercado. Un estudio de caso de maíz azul y del maíz para pozole en México. *Fitotec. Mex*, 36 (6): 315-328.

- Hentry H. S. M. M. and P. McCrohan R. 1990.** Introducción de la chía y la goma de tragacanto en los Estados Unidos. p. 252-256. En: J. Janick y J.E. Simon (eds.), Avances en Cosechas Nuevas. Prensa de la Madera, Portland.
- Hernández G. C. y B. Segoviano C. 2012.** Charritos Bioenergetica: de las botanas a la energía limpia. Revista Emprendedores. Pp 33-39.
- Hernández HE. 2005.** Influencia de la L-alfa lisofosfatidilcolina sobre las propiedades térmicas y estructurales del almidón de maíz nativo. Tesis de Licenciatura. Pachuca, Hidalgo, Mexico. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. p 02-43.
- Hicks S (1966).** Desert plants and people. Naylor Company, San Antonio, USA.
- Huber G. 2001.** Snack foods from cooking extruders. Pages 315-367 in: Snack Foods Processing. Ed. EW Lusas and LW Rooney. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company, Inc.
- Inglett GE. 1970.** Corn. En: Inglett GE, editor. Culture, Processing Products. Wesport, CT, EUA: AVI Publishing Co. p 123.
- Ixtaina VY (2010).** Caracterización de la semilla y el aceite de chía (*Salvia hispanica* L.) obtenido mediante distintos procesos. Aplicación en tecnología de alimentos. Tesis Doctoral. Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA). Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (FCE-UNLP)
- Ixtaina, V., Martínez, M., Sportorno, V., Mateo, C., Maestri, D., Diehl, B., . . . Tomás, M. (2011).** Characterization of chia seeds oils obtained by pressing and solvent extraction. *Journal of Food Comp. Anal.*, 24 (2): 166-174.

Jamboonsri W, Phillips TD, Geneve RL, Cahill JP, Hildebrand DF (2012).

Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. – a new ω 3 source.

Gen Res Crop Evol 59 (2) 171-178

Larmond E. 1977. Laboratory methods for sensory evaluation of foods. Publication No 1637. Department of Agriculture, Ottawa, Canada. p 74.

Limón V. V., M. Bustos F., A. Palazuelos E., C. Corrales J. J. and Z. Morales J. J.

2010. Physicochemical evaluation and optimization of enriched expanded pellets with milk protein concentrate. Cereal Chemistry 87(6): 612-618.

Limón V. V. 2006. Elaboración de una botana de tercera generación a partir de almidón de maíz, maíz de calidad proteínica y concentrado proteínico de leche por extrusión. Tesis Maestría en ciencia y tecnología de alimentos. Universidad Autónoma de Sinaloa.

Liu RH. 2007. Whole grain phytochemicals and health. Journal of Cereal Science 46:207–219.

Lloyd BJ, Siebenmorgen TJ, Brees KW. 2000. Effects of Commercial Processing on Antioxidants in Rice Bran. Cereal Chemistry 77:551-555.

Lopez-Martinez LX, Oliart-Ros RM, Valerio-Alfaro G, Lee CH, Parkin KL, Garcia

HS. 2009. Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of mexican maize. Food Science and Technology 42:1187-1192.

Loubes MA, Calzetta Resio AN, Tolaba MP, Suarez C (2012). Mechanical and termal characteristics of amaranth starch isolated by acid wet-milling procedure. LWT – Food Sci Tech 46, 519-524

- Maillard MN, Berset C. 1995.** Evolution of antioxidant activity during kilning, role of insoluble bound phenolic acids of barley and malt. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43:1789-1793
- Matson, K. 1982.** What goes on in the extruder barrel. *Cereal Foods World* 27: 207–210.
- Matsuoka Y, Vigouroux Y, Goodman MM, Sanchez GJ, Buckler ES, Doebley JF. 2002.** A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Science* 99: 6080-6084.
- Mercier C. 1993.** Nutritional appraisal of extruded foods. *International Journal of Food Science and Nutrition* 44: 545-553.
- Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Camacho-Hernández IL, Rouzaud-Sandez 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.
- Mora-Rochin S, Gutiérrez-Urbe JA, Serna-Saldívar SRO, Sanchez-Peña P, Reyes-Moreno C, Millan-Carrillo J. 2010.** Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented corns processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 52:502-508.
- Moore G. 1994.** Snack Food Extrusion. In N.D. Frame (ed.) *The Technology of Extrusion Cooking*, pp 110–143. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, Wester Cleddens Road, Glasgow, U.K.
- Nascimento C. E. M., P. Carvalho C. W., C. Takeiti Y., F. Castro D. G., A. Ramirez J.L. 2011.** Use of sesame oil cake (*Sesamum indicum* L.) on corn expanded extrudates. *Food Research International* 45: 434–443.

- Olmo N, Turnay J, Pérez-Ramos P, Lecona E, Barrasa JI, López de Silanes I, Lizarbe MA. 2007.** In vitro models for the study of the effect of butyrate on human colon adenocarcinoma cells. *Toxicology in vitro* 21:262-270.
- Ortiz de Montellano BR (1978).** Aztec cannibalism: An ecological necessity?. *Science* 200 (4342), 611-617
- Paliwal RL 2001.** El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. FAO. Departamento de Agricultura, Roma, Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s00.HTM>. (2013).
- Pandey S. 1998.** Varietal development conventional plant breeding. En: Morris ML editor. *Maize seed industries in developing countries*. Colorado: Rienner y CIMMYT. P
- Paredes-Lopez O, Guevara-Lara F, Bello-Pérez LA. 2006.** Los Alimentos Mágicos de las Culturas Mesoamericanas. México, DF, Mexico: Fondo de Cultura Económica
- Paredes-López O, Serna-Saldívar SO, Guzmán-Maldonado SH. 2000.** Los Alimentos Mágicos de las Culturas Indígenas de México – El Caso de la Tortilla. Sinaloa, México: El Colegio de Sinaloa. p 11-82.
- Paredes-López O, Saharópulos-Paredes ME. 1983.** Maize. A review of tortilla production technology. *Baker's Digest* 13:16-25.
- Park J, Rhee KS, Kim BK, Rhee KC. 1993.** Single-screw extrusion of defatted soy flour, corn starch and raw beef blends. *Journal of Food Science* 58:9-19.
- Paton A. 1991.** *Salvia lanceolata*, Labiateae: In the Kew Magazine Incorporating Curtis's Botanical Magazine. The Royal Botanic Gardens, Kew.

- Primo E. 1987.** Química Agrícola Alimentos. Madrid, España: Editorial Alhambra. P 683.
- Ren W, Qiao Z, Wang H, Zhu L, Zhang L. 2003.** Flavonoids: promising anticancer agents. Medical Research Reviews 23: 519–534.
- Reyes CP. 1990.** El maíz y su cultivo. 1^{ra} ed. México, DF: AGT Editor S.A.
- Reyes-Moreno C, Romero-Urías C, Milán-Carrillo J, Gómez-Garza RM. 2000a.** Composición química y calidad nutritiva de garbanzo (*Cicer arietinum* L) después de la fermentación en estado sólido. Food Science and Technology International 6:251-258.
- Riaz M. N. 2006.** New Technological Solutions – Extrusion Process. In: International Palm Oil Trade Fair & Seminar (PDTs). Malaysia, Kuala Lumpur, 21–24 Noviembre. Food Protein R&D Center, Texas A & M University.
- Riaz MN. 2000.** Extruders in Food Applications. Technomic Publishing Co. Inc. p 1-30,127-131.
- Rodríguez Vallejo J (1992).** Historia de la agricultura y de la fitopatología, con referencia especial a México. Colegio de Post-graduados en Ciencias Agrícolas, Ciudad de México, México
- Ruales J, Nair B (1992).** Nutritional quality of protein in quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) seeds. Plant Foods Hum Nutr 42, 1-11
- SAGARPA-SIAP. 2013.** Sistema Agropecuaria de Consulta, México, D.F.
- SAGARPA.SIAP (08 de Septiembre de 2018).** OEIDRUS Jalisco/SIAP. Obtenido de <http://www.oeidrus-jalisco.gob.mx/agricultura/chia/?id=Generalidades#Generalidades>

- Sahagún B (1579).** Historia general de las cosas de Nueva España (Codex Florentino). Eds. A.M. Garibay, 1989. Editorial Porrúa, DF, México
- Salganik RI, Albright CD, Rodgers J, Kim J, Zeisel SH, Sivashinskiy MS y Van Dyke TA. 2000.** Dietary antioxidant depletion: enhancement of tumor apoptosis and inhibition of brain tumor growth in transgenic mice. *Carcinogenesis*, 21:909–914
- S Pascual-Teresa, C Santos-Buelga, JC Rivas-Gonzalo. 2002.** LC-MS analysis of anthocyanins from purple corn cob. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82:1003-1006.
- Sandstead HH, Muñoz JM, Jacob RA, Kelvay LM, Reck SJ, Logan GM, Dintzis FR, Inglett GE, Shvey WC. 1978.** Influence of dietary fiber on trace element balance. *American Journal of Clinical Nutrition* 31:5180-5184.
- Serna-Saldivar SO, Gutiérrez-Urbe JA, Mora-Rochín S, García-Lara S. 2013.** Potencial nutraceutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 295-304.
- Shahidi F, Naczk M. 1995.** Phenolic Compunds in Grains. En: *Food Phenolics Sources, Chemistry, Effects, Applications*. Technomic Publishing Company Inc, Lancaster, PA, EUA. p 3-39.
- SIAP. 2014.** Servicio información agroalimentaria y pesquera. Mexico. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>. Marzo 2017
- jalisco.gob.mx/agricultura/chia/?id=Generalidades#Generalidades
- SIAP. (29 de Septiembre de 2018).** *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de Con los colores del maíz, México se pinta solo:

<https://www.gob.mx/siap/articulos/con-los-colores-del-maiz-mexico-se-pinta-solo?idiom=es>

- Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007).** Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 916–92
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuele-Raventós RM. 1999.** Analysis of total Phenols and other oxidation substrates and antioxidant by means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in enzymology* 299:152-165.
- Soustelle J (1955).** La vie quotidienne des aztèques à la veille de la conquête espagnole. Ed. Hachette, París, Francia
- Taga MS, Miller EE, Pratt DE (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *J Am Oil Chem Soc* 61, 928-931
- Stanley DW. 1998.** Protein reactions during extrusion processing. En: Mercier C, Linko P, Harper JM, editors. *Extrusion Cooking*. Cap 10. St. Paul, MN, EUA: American Association of Cereal Chemists. p 321-341.
- Taddei B.C. 2006.** Estrategias de Mercado en Firma Lideres de la Industria Alimentaria. *Estudios Sociales*, julio–diciembre, año/vol. XIV, número 028. Universidad de Sonora, pp. 68–106.
- Tecante A (2010).** Comunicación personal.
- Thompson DB. 2000.** On the non-random nature of amylopectin branching. *Carbohydrate Polymers* 43:223–239.
- Thompson LU. 1994.** Antioxidants and hormone-mediated health benefits of whole grains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 34:473-497.
- Truswell AS. 2002.** Cereal grains and coronary heart disease. *European Journal of Clinical Nutrition* 56:1-14.

- Ullah, R., Khalique, M., Imran, M., Mehmood, S., Javid, A., & Hussain, J. (2015).** Nutritional and therapeutic perspectives of Chía (*Salvia hispanica* L.). *J. Food Sci. Technology*, 53 (4): 1750-1758.
- Vasanthan T, Gaosong J, Yeung J, Li J. 2002.** Dietary fibre profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry* 77:35–40
- Wang W, Klopfenstein CF, 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.
- Watson SA. 1987.** Structure and composition corn, chemistry and technology. *Cereal Chemistry*. P 53-82.
- Whistler RL, Daniel JR. 1985.** Carbohydrates. En: Fennema OR, editor. *Food Chemistry*. New York, NY, EUA: Marcel Dekker Inc. p 69-137
- Wolf MJ, Buzan CL, MacMasters MM, Rist CE. 1952a.** Structure of the mature corn kernel.I Gross Anatomy and structural relationships.*Cereal Chemistry* 29:321-333.
- Wrolstad, R. E., Durst, R. W., Giusti, M. M., & Rodriguez-Saona, L. E. (2002).** Analysis of anthocyanins in nutraceuticals. In C. T. Ho & Q. Y. Zheng (Eds.), *Quality management of nutraceuticals*. Washington, DC: American Chemical Society.
- Xu BJ, Chang SKC. 2007.** Comparative studies on the antioxidant activities of nine common food legumes against copper-induced human low-density lipoprotein oxidantion in vitro. *Journal of Food Science* 72(7):S522-S527.

XI. ABREVIATURAS

AAE	Aminoácidos esenciales
AAox	Actividad antioxidante
Abs	Absorbancia
ADI	Análisis digital de imágenes
AOAC	Asociación Oficial de Químicos Analíticos
Ant	Antocianinas
A_w	Actividad acuosa
BEE	Botana extrudida expandida
BEEO	Botana extrudida expandida optimizada
bs	Base seca
CAox	capacidad antioxidante
CFT	Compuestos fenólicos totales
CAT	Contenido de antocianinas totales
Ch	Chía
cm	Centímetro (s)
CO₂	Dióxido de carbono
col	Colaboradores
C-PER	Relación de eficiencia proteínica calculada
DA	Densidad aparente
D_f	Dimensión fractal de textura
Du	Dureza (textura)
FAO	Organización de Alimentos y Agricultura de las Naciones Unidas

FCN	Frijol común negro
Fig	Figura (s)
g	Gramo (s)
FT	Flavonoides totales
H	Hora (s)
HA	Humedad de alimentación
HCl	Ácido clorhídrico
HMA	Harina cruda de maiz azul
HCH	Harina cruda de chía
hL	Hectolitro
HPLC	Cromatografía de líquidos de alta resolución fase reversa
IE	Índice de expansión
kg	Kilogramo (s)
Kg/hL	Kilogramo por hectolitro
L_g	Lagunaridad
Ma	Maíz azul
mg	Miligramo (s)
mm	Milímetro (s)
°C	Grado (s) centígrado (s)
ORAC	Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno
p/p	Peso/peso
pH	Potencial hidrógeno
PM	Peso de la muestra

rpm	Revoluciones por minuto
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
TC	Taninos condensados
TE	Temperatura de extrusión
ton	Toneladas
var	Variedad
WHO	Organización Mundial para la Salud
μL	Micro litro
μm	Micrómetro (s)
μM	Micro molar
VT	Velocidad de tornillo
P. ej.	Por ejemplo