



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Desarrollo y caracterización de un alimento tipo botana de segunda generación elaborado a partir de harina de maíz azul (*Zea mays* L.) con polvo de cálices de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.)

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

PEREZ SANDOVAL FRIDA

DIRECTOR DE TESIS

DR. RICARDO OMAR NAVARRO CORTEZ

TULANCINGO DE BRAVO, 2026.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 09 de julio de 2026

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UA EH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, **Frida Pérez Sandoval**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Desarrollo y caracterización de un alimento tipo botana de segunda generación elaborado a partir de harina de maíz azul (*Zea mays* L.) con polvo de calices de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.)”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE Dr. Juan Pablo Hernández Uribe
SECRETARIO Dra. Heidi María Palma Rodríguez
VOCAL 1 Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez
SUPLENTE 1 Dr. Apolonio Vargas Torres

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna
Coordinadora Ingeniería en Alimentos



“Amor, Orden y Progreso”



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

1	Introducción.....	1
2	Antecedentes del maíz (<i>Zea mays</i> L)	3
2.1	Generalidades del maíz	3
2.1.1	Origen del maíz.....	3
2.1.2	Producción de maíz azul en México	4
2.1.3	Estructura de la planta de maíz	5
2.1.4	Razas de maíz	6
2.1.5	Estructura del grano de maíz.....	9
2.1.6	Composición química del grano de maíz azul.....	10
2.1.7	Fitoquímicos del maíz	13
2.1.8	Propiedades funcionales del maíz azul.....	15
2.1.9	Usos del maíz.....	16
3	Generalidades de la jamaica.....	17
3.1	Definición	17
3.2	Producción en México	17
3.3	Morfología de la flor de jamaica.....	17
3.4	Composición química.....	18
3.5	Fitoquímicos de la jamaica	19
3.5.1	Fenoles de los cálices de jamaica.....	19
3.5.2	Antocianinas de los cálices de jamaica	20
3.6	Propiedades funcionales.....	21
4	Botanas	21
4.1	Aspectos generales	21
4.2	Clasificación.....	21

4.3	Producción y mercado	22
4.4	Alimentos funcionales.....	24
5	Extrusión.....	24
5.1	Extrusor	25
5.2	Clasificación de extrusores.....	26
5.2.1	Extrusores de un solo tornillo	26
5.2.2	Clasificación de los extrusores de doble tornillo.....	27
5.3	Ventajas del proceso de extrusión	27
6	Materiales y métodos	28
6.1	Materia prima	28
6.2	Caracterización del maíz azul	28
6.2.1	Impurezas.....	28
6.2.2	Granos quebrados.....	28
6.2.3	Dimensión de los granos de maíz azul	29
6.2.4	Peso de mil granos.....	29
6.2.5	Peso hectolítrico.....	29
6.2.6	Índice de flotación	29
6.2.7	Relación de componentes estructurales de los granos de maíz	30
6.3	Análisis químico proximal del maíz azul y de los cálices de jamaica	30
6.3.1	Obtención de la harina de maíz azul	30
6.3.2	Obtención de harina de jamaica	30
6.3.3	Humedad	31
6.3.4	Determinación de lípidos	31
6.3.5	Determinación de cenizas.....	32

6.3.6	Determinación de proteínas.....	32
6.3.7	Determinación de Fibra.....	33
6.4	Caracterización fisicoquímica de materias primas.	33
6.4.1	Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad (ISA)	33
6.4.2	Índice de absorción de aceite.....	34
6.4.3	Determinación de color.....	35
6.4.4	Determinación de pH.....	35
6.5	Caracterización funcional de materias primas	35
6.5.1	Obtención de extractos para fenoles	35
6.5.2	Determinación del contenido de fenoles totales	35
6.5.3	Determinación de antocianinas monoméricas mediante el método de diferencial de pH	36
7	Diseño de experimentos para la obtención de productos extruidos	37
7.1	Proceso de extrusión.....	37
8	Análisis de expandidos.....	39
8.1	Caracterización fisicoquímica.....	39
8.1.1	Índice de expansión	39
8.1.2	Densidad aparente.....	39
8.1.3	Diferencia total de color.....	40
8.1.4	Índice de solubilidad en agua e índice de adsorción de agua.....	40
8.1.5	Dureza	40
8.2	Determinación de las propiedades funcionales de productos extruidos.....	40
8.2.1	Determinación del contenido de fenoles.	40
8.2.2	Determinación del contenido de antocianinas.	40
9	Análisis Estadístico.....	40

10	Resultados y discusión.....	40
10.1	Caracterización de la materia prima.....	40
10.2	Caracterización de los extruidos	43
10.2.1	Índice de expansión (IE).....	43
10.2.2	Densidad Aparente (DA).....	46
10.2.3	Dureza	48
10.2.4	Índice de absorción de agua (IAA)	51
10.2.5	Índice de solubilidad de agua (ISA).....	53
10.2.6	Determinación de pH.....	55
10.2.7	Diferencial de color (ΔE)	56
10.2.8	Contenido de fenoles totales (CFT).....	59
10.2.9	Contenido total de antocianinas (CTA).....	61
10.3	Optimización del proceso de extrusión para la obtención de productos extruidos directamente expandidos a partir de maíz azul y polvo de cálices de jamaica.....	63
11	Conclusiones.....	64
12	Referencias	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química Hibiscus sabdariffa L.	18
Tabla 2. Composición fitoquímica de Hibiscus sabdariffa L.	18
Tabla 3. Diseño de experimentos central compuesto rotatable para la obtención de productos extruidos de maíz azul adicionados con polvo de cálices de jamaica (Hibiscus sabdariffa L.).	38
Tabla 4. Características físicas de los granos de maíz azul.	41
Tabla 5. Relación de componentes estructurales del grano de maíz azul.	42
Tabla 6. Análisis químico proximal, contenido de antocianinas y propiedades fisicoquímicas de los cálices de jamaica (Hibiscus sabdariffa L.) y maíz azul (Zea mays L.) utilizados en el desarrollo de productos extruidos directamente expandidos.	42
Tabla 7. Valores experimentales obtenidos de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz azul adicionados con polvo de cálices de jamaica obtenidos bajos las condiciones óptimas de procesamiento.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la concentración de polvo de cálices de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre el índice de expansión (IE) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.	45
Figura 2. Efecto de la concentración de polvo de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre la densidad aparente (DA Kg/m ³) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.	47
Figura 3. Efecto de la concentración de polvo de cálices de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre la dureza (N) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.	50
Figura 4. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el índice de solubilidad de agua IAA (g de agua absorbida/ g de muestra) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.	52
Figura 5. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el índice de solubilidad ISA (%) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.....	54
Figura 6. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el pH de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.....	56
Figura 7. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el diferencial de color ΔE de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.	58
Figura 8. Efecto de la concentración de cálices de jamaica (%) y la temperatura (°C) sobre el contenido de fenoles (mg EAG/g) en productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.....	60
Figura 9. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre la cuenta total de antocianinas CTA (mg/Kg) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.....	62

Resumen

Con el paso del tiempo en México el sobrepeso y la obesidad se convirtieron en una crisis de salud pública; sin embargo, las nuevas generaciones tienen más concientización sobre su salud y tienen una preferencia por alimentos más saludables o por aquellos que brindan un beneficio a su salud. Se tiene evidencia que el consumo de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) presenta ciertos beneficios para la salud por su alto contenido de fenoles. En el presente trabajo de investigación se obtuvieron alimentos tipo botana a base de harina de maíz azul y polvo de cálices de jamaica utilizando un diseño central compuesto rotatable, los factores probados fueron la concentración de polvo de cálices de jamaica de 0 a 30% y la temperatura del dado de salida de 120 a 160 °C. A los productos obtenidos se les evaluaron parámetros fisicoquímicos como el índice de expansión, densidad aparente, dureza, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, pH, diferencia de color; así como, parámetros funcionales como el contenido de fenoles totales y contenido de antocianinas. Se realizó una optimización del proceso mediante la sobreposición de superficie de respuesta y el método de mínimos y máximos, y la función de deseabilidad. Los resultados obtenidos mostraron un impacto significativo de los factores estudiados sobre las respuestas evaluadas. Las condiciones óptimas para la obtención de un alimento tipo botana fueron concentración de polvo de cálices de jamaica del 13.42% y temperatura del dado de salida de 124 °C.

1 Introducción

Con el paso de los años el consumo de botanas “saludables” ha aumentado, los consumidores tienen preferencia por alimentos más saludables o aquellos que le brinde un beneficio a la salud, sin tener que renunciar a su sabor característico y practicidad, pues el ritmo de vida es más acelerado, trayendo consigo enfermedades crónico-degenerativas que se asocian a los malos hábitos alimenticios, en México el consumo de botanas es elevado, pues son utilizadas comúnmente para cubrir necesidades.

La palabra botana proviene del idioma inglés que significa alimento ligero, son considerados como comida chatarra pues aportan poco o nada de valor nutricional, se considera saludable aquellos que cuya materia prima sean frutas y vegetales, pues no sufren una transformación química (Medina y otros, 2024). Este alimento puede estar considerado dentro de los alimentos funcionales pues estos se definen como aquellos que además de su valor nutritivo, contienen componentes biológicamente activos, aportando algún beneficio para la salud, se caracterizan por presentarse en forma de alimentos de consumo cotidiano (Hernández, 2020).

La flor de jamaica también conocida como rosa de Abisina, se ha utilizado desde hace varios años atrás, es consumida principalmente en infusiones, agua o platillos, los cálices de jamaica destacan como fuente de colorantes inclusive es utilizada para tratar padecimientos, es cultivada en regiones tropicales y subtropicales, dentro de su composición destacan los grupos fenólicos donde destacan los ácidos fenólicos y las antocianinas, a los cuales diferentes investigadores les atribuye beneficios a la salud como actividad antioxidante, antiinflamatoria, un alto valor nutracéutico, efectos hipoglucémicos, identificaron que reduce el daño celular e inhibe daños elementos cancerígenos (Montaño y otros, 2024)

Para la elaboración de botanas existen distintas formas donde destaca la extrusión, se lleva a cabo por medio de un extrusor, el cual es alimentado con la materia prima y esta es forzada a través de un cilindro con tornillo, el cual se encarga de mezclar y transportar los alimentos, dentro de este proceso se utilizan altas temperaturas en

tiempos relativamente cortos, una de sus ventajas es la amplia gama de materia prima que se puede utilizar para el desarrollo de alimentos funcionales (Guatemala y otros, 2020). El objetivo principal de la investigación fue desarrollar y evaluar una botana a base de maíz adicionada con cálices de jamaica, para determinar sus características fisicoquímicas y funcionales y así poder obtener un producto viable e innovador, y así mismo obtener diferentes formulaciones de maíz azul con cálices de jamaica para obtener la mezcla óptima para su desarrollo.

2 Antecedentes del maíz (*Zea mays* L)

2.1 Generalidades del maíz

En México el maíz representa uno de los principales cereales de la vida diaria, es uno de los cultivos agrícolas más importantes y uno de los tres granos básicos en la alimentación, constituyendo una de las principales bases de la transformación, ya que permite la elaboración de productos como proteínas, almidón, aceites, bebidas alcohólicas, endulzantes, entre otros.

Cuando la planta esta tierna es utilizada como forraje, teniendo éxito en las industrias lácteas y cárnicas. El grano, las hojas secas y la parte superior son utilizadas como forraje de buena calidad para la alimentación de rumiantes. En países como Estados Unidos, el maíz no solo se utiliza en la dieta de su población; si no, que también le dan usos industriales. Walton C. Galinat, agrónomo y etnobotánico decidió llamar al grano de maíz como **“el grano de la humanidad”**

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta monocotiledónea anual de la familia botánica Poaceae o Gramineae, comúnmente es de color blanco o amarillo; sin embargo, se pueden encontrar variedades de color negro, azul, rojo y jaspeado (CONABIO, 2020).

2.1.1 Origen del maíz

El maíz se siembra en diferentes regiones agroecológicas que van de altitudes de 0 hasta los 4,000 m sobre el nivel del mar, se cultiva desde el ecuador hasta los hemisferios, se siembra en regiones de precipitación pluvial desde menos de 400 mm hasta los 3000 mm en suelos y climas muy variados; la mejor producción se logra en climas en donde las temperaturas varían entre los 21 y 27 °C con un periodo libre de heladas en el ciclo agrícola variable de 120 a 180 días (Kato y otros, 2009).

Se tienen diversas teorías sobre el origen de esta planta; sin embargo, la más aceptada y conocida es la teoría multicéntrica del origen del maíz; la cual propone, que el maíz se originó y domesticó en varias regiones de México y Guatemala (Mesoamérica). A finales de los años 80s se aceptó la teoría del origen del maíz con base en la evolución del teocintle (Kato y otros, 2009).

El maíz fue uno de los alimentos más importantes de las culturas maya, azteca, zapoteca y mixteca; además, con un papel importante en sus creencias religiosas. Se tenía la creencia que la sangre y la carne estaban formadas por maíz, no solo fue un alimento; si no, que fue la base de su desarrollo económico, social y cultural. A finales del siglo XV después del descubrimiento del continente americano, el grano se introdujo a Europa a través de España (FAO, 2019).

La domesticación del maíz tuvo inicio hace aproximadamente 10,000 años, con los antiguos habitantes de Mesoamérica a partir de los teocintles, gramíneas con características similares al maíz que crecen de manera silvestre principalmente en México y Centroamérica (CONABIO, 2020). Las mazorcas de los teocintles se diferenciaban notoriamente de las actuales; ya que, estas median entre 3 y 4 cm de longitud y tenían escasa cantidad de granos (Mendoza, 2010). Mediante la selección y cultivo de los "teocintles" (gramíneas silvestres), crearon el maíz que se conoce en la actualidad.

2.1.2 Producción de maíz azul en México

En 2023, la producción de maíz en México alcanzó las 27,549,918 toneladas, lo que es igual al 87.8% de la producción nacional de granos. A nivel mundial, México se posiciona como el sexto productor de este grano (Gob, 2024).

De acuerdo al SIAP (2016) en México se sembraron 7.7 millones de hectáreas de maíz, del cual el 91.5% corresponde a maíz blanco, 8% amarillo y el resto a otros colores, de los cuales el maíz azul destaca por su importancia. Los principales estados de la Mesa Central donde se cultiva maíz azul son Puebla, Tlaxcala, Estado de México e Hidalgo (Díaz, 2017).

En el ciclo otoño-invierno las regiones Noroeste y Norte son las que aportan los volúmenes más significativos de maíz en México, produciendo en forma conjunta el 77.8% del total nacional. Los contribuyentes mayoritarios son Sinaloa, Durango, Zacatecas, Sonora, San Luis Potosí, Tamaulipas y Coahuila (Gob, 2023). El rendimiento por hectárea varía de acuerdo con el sistema de producción. En el ciclo otoño-invierno el rendimiento promedio es de 3.6 toneladas por hectárea cosechada. En el ciclo primavera-verano el rendimiento promedio es de 2.08

toneladas por hectárea. La producción de maíces pigmentados en México representa menos del 5%, lo cual indica bajo aprovechamiento; su contenido nutricional y propiedades nutraceuticas representan una gran oportunidad para el desarrollo de nuevos productos (García y otros, 2022).

2.1.3 Estructura de la planta de maíz

Es una planta de porte robusto y de hábito anual; las partes principales de la planta del maíz son;

- a) **Hojas:** nacen en los nudos de manera alterna a lo largo del tallo y se encuentran abrazadas al tallo mediante la vaina que envuelve al entrenudo, tienden a ser largas, grandes, lanceoladas, alternas y paralelinervias, presentan vellosidades; sus extremos son afilados y cortantes (Calvo y Mendoza, 2010). Una característica fisiológica particular de las hojas de la planta del maíz es su estructura anatómica, en ellas existen dos tipos de células epidérmicas y estomáticas con diferente organización bioquímica y estructural, durante la fotosíntesis le permite capturar el CO₂ (Calvo y Mendoza, 2010)
- b) **Raíces:** son fasciculadas y su objetivo es aportar anclaje a la planta, las raíces primarias son fibrosas y presentan raíces adventicias, las cuales nacen en los primeros nudos y en algunos casos emergen por encima de la superficie del suelo y su función es sostener la planta en posición vertical (Calvo y Mendoza, 2010).
- c) **Tallo:** erecto, robusto y pocas ramificaciones, con una elevada longitud que puede alcanzar de 1 a 5 m de altura, tiene parecido a una caña (Calvo y Mendoza, 2010).
- d) **Inflorescencia:** el maíz es una especie monoica, caracterizada por presentar inflorescencias masculinas y femeninas separadas dentro de la misma planta. En la inflorescencia masculina presenta una panícula, también conocida como espigón o penacho, consta de un eje central y ramas laterales, se distribuyen a lo largo del eje central y están protegidas por dos brácteas o glumas, y a su vez contienen flores estaminadas (contienen

únicamente órganos reproductivos masculino), en cada florecilla que componen la panícula se encuentran tres estambres donde se desarrolla el polen. Su color depende de la tonalidad de las glumas y anteras, estas pueden ser de coloración verde, amarilla, rojiza o morada. La inflorescencia femenina mejor conocida como mazorca se localiza en las yemas axilares de las hojas, las espigas son de forma cilíndrica las cuales se componen de un olote donde se insertan las espiguillas, cada una con dos flores pistiladas una fértil y otra abortiva, estas flores se arreglan en hileras paralelas, estas tienen un ovario con un pedicelo unido al raquis, con un estilo largo donde germina el polen, puede formar alrededor de 400 a 1000 granos formados en promedio de 8 a 24 hileras por mazorca, están encerradas en brácteas o vainas de las hojas, se le conoce como pelo de elote a los estilos largos que salen de la punta del raquis como una masa de hilo sedoso y se le conoce como jilote al olote tierno.

Por lo mencionado anteriormente el maíz es una planta de polinización abierta (anemófila), en la mazorca cada semilla es un fruto independiente llamado cariósipide que esta insertado en el olote (Calvo y Mendoza, 2010).

2.1.4 Razas de maíz

De acuerdo con CONABIO (2020), los agricultores han logrado adaptar y mantener una extensa diversidad de razas de maíces. El término raza se ha utilizado para agrupar individuos o poblaciones que comparten características del orden morfológico, ecológico y genético, estas razas a su vez se agrupan en grupos los cuales están relacionados con una distribución geográfica y condiciones climáticas. Cada raza puede tener numerosas variantes diferenciadas en formas de mazorca, color y textura del grano. En América Latina se han reportado y descrito cerca de 220 razas de maíz, de las cuales 64 se han identificado en México, estas razas de acuerdo con sus caracteres morfológicos de adaptación y genéticos se han agrupado en siete grupos (Biodiversidad mexicana,2025).

- a) Grupo cónico:** mazorcas con forma cónica o piramidal, se cultiva principalmente en el Estado de México, Puebla, Michoacán, Oaxaca e

Hidalgo, su característica principal es una mazorca de forma cónica o piramidal, cuentan con grano grande semi-cristalino, harinoso, puntiagudo, de hileras numerosas, en algunos casos su grano es dulce y se pueden ver en color amarillo, blanco, negro, rosa, azul, rojo o morado; se utiliza principalmente para la elaboración de tortillas, pinole, harinas, forrajes y botanas, por mencionar algunos. Dentro de esta clasificación destacan variedades como, el Arrocillo, Cacahuacintle, Chalqueño, Cónico, Cónico norteño, Dulce, Elotes Cónicos, Mixteco, Mushito, Mushito Michoacán, Negrito, Palomero de Jalisco, Palomero Toluqueño, Uruapeño, Palomero de Chihuahua (CONABIO,2010).

- b) Grupo sierra de Chihuahua:** mazorca cónica, cilíndrica o semielíptica larga y delgada con granos redondeados de textura dura o harinosa, de semicristalino a cristalino. Es muy común en los estados de Chihuahua, Sonora, Durango, Sinaloa y Jalisco, entre otros. Los principales colores de estas razas son amarillo, blanco, rosado, azul, violeta, anaranjado; se utilizan comúnmente en la elaboración de pinole, atole y botanas. Las razas que entran en esta clasificación son Apachito, Azul, Complejo Serrano de Jalisco, Cristalino de Chihuahua, Gordo, Mountain Yellow (CONABIO, 2010).
- c) Grupo ocho hileras:** mazorca larga y delgada de 8 a 12 hileras con granos dentados harinosos, suaves, excepto el de bolita, los colores más comunes en estas razas son el jaspeado, blanco, rosado, morado, rojo, amarillo y anaranjado. Los principales estados donde están presentes estas razas son Oaxaca, Puebla, Hidalgo, Guerrero, Durango, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Sinaloa, Chihuahua, Zacatecas y Aguascalientes; en esta clasificación destacan las razas Blando, Onaveño, Harinoso de ocho, Tabloncillo, Tabloncillo perla, Bofo, Elotes Occidentales, Tablilla de ocho, Jala, Zamorano Amarillo, Ancho, Bolita (CONABIO, 2010).
- d) Grupo chapalote:** se caracteriza por ser mazorcas alargadas y delgadas, con granos pequeños de textura cristalina, harinosa y dulce tienden a ser de color café, rosa, amarillo, azul y rojo, se utilizan en la elaboración de palomitas o pinole. Los principales lugares donde se cultiva son Nayarit,

Sonora, Sierra Madre Occidental, Sinaloa, Guerrero y Michoacán. Las razas incluidas dentro de esta clasificación son Chapalote, Dulcillo del Noroeste, Elotero de Sinaloa y Reventador (CONABIO, 2010).

e) Grupo tropicales precoces: mazorca delgada semicilíndrica con grano cristalino, semi dentado y dentado en algunos casos son cortas de bajo número de hileras con grano semi-harinoso, pueden ser de color blanco, amarillo y azul oscuro, se ocupa comúnmente en la elaboración de atoles, totopos, dulces y tortillas. Se cultiva principalmente en los estados de Yucatán, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Nuevo León, Tamaulipas. Las razas que entran dentro de esta clasificación son; Conejo, Nal-Tel, Ratón y Zapalote Chico (CONABIO, 2010)

f) Grupo Dentados tropicales: son maíces de mazorcas medianas o grandes comúnmente largas, cilíndricas y cónicas de 12 a 16 hileras con granos dentados de blando a semiduro, algunos de ellos con punta alargada y puntiaguda. Algunas de estas razas cuentan con un olote grueso, pueden tener colores blancos, amarillos, anaranjados, azules y en algunos casos rojos. Las razas que entran en esta clasificación son; Celaya, Tepecintle, Tuxpeño, Tuxpeño Norteño, Vandeño, Zapalote Grande, Nal-Tel de Altura, Pepitilla, Chiquito, Choapaneco, Cubano Amarillo, estas razas son comúnmente usadas en programas de mejoramiento genético a nivel mundial, sin embargo, igual se les da uso en la elaboración de alimentos. Algunos de los estados donde se cultivan estas razas son Jalisco, Michoacán, Guerrero, Coahuila, Tamaulipas, Oaxaca, Chiapas, entre otros. (CONABIO, 2010)

g) Grupo maduración tardía: se caracterizan principalmente por poseer una mazorca larga, delgada, grande semicilíndrica en algunos casos son de base abultada, comúnmente llega a tener de 12 a 14 hileras de granos, la mayoría de las razas pertenecientes a esta clasificación poseen un olote flexible y granos pequeños que pueden ser dentados, semicristalinos, semi harinosos

y ocasionalmente redondos, destacan en estas razas los colores amarillos, blancos, azul, negro, morado y rojo. Se usan comúnmente en la elaboración de aceites, botanas, tortillas, atoles, tamales, forrajes y algunos de ellos en combustibles. Se cultiva principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Yucatán, Quintana Roo, Veracruz, Puebla, Chiapas, San Luis Potosí, Hidalgo, Guerrero. Dentro de esta clasificación destacan las siguientes razas: Dzit-Baca, Comiteco, Coscomatepec, Motozinteco, Olotillo, Olotón, Tehua, Quicheño, Serrano, Mixeño, Serrano Mixe. (CONABIO, 2010).

2.1.5 Estructura del grano de maíz

La estructura de los granos de maíz se compone de 4 partes fundamentales: pedicelo, pericarpio, endospermo, embrión o también conocido como germen.

- a) **Pedicelo:** estructura celular que une el grano al olote, representa el 0.8% del peso total del grano, conformado de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, al igual consta de una capa exterior de abscisión que tiene como función sellar la punta del grano maduro. Cuenta con una serie de células parenquimatosas en forma de estrella unidas entre sí por sus puntas, formando así una estructura frágil y porosa (Watson, 1987; Wolf, 1952)
- b) **Pericarpio:** capa exterior del grano de maíz dura y fibrosa que encierra al grano, comprende el pericarpio, testa y la cofia en un pequeño casquete que cubre la punta del grano y protege al embrión. Su función principal es la de proteger el grano y las sustancias de reserva. En el peso total del grano representa del 5 al 7%. Es la cubierta botánica de la semilla y se compone por varias capas ricas en celulosa y hemicelulosa. La epidermis es la capa externa cubierta con cutina que ayuda a evitar la entrada de agua y otros líquidos o gases, le sigue el mesocarpio y este está compuesto de 12 a 25 capas de células que están conectadas por ductos donde pueden circular líquidos y gases, las 4 capas restantes se conforman de células cruzadas y tubulares (Eckhoff y otros, 2003).

- c) **Endospermo:** en la mayoría de las variedades del maíz representa aproximadamente del 80 al 84% del peso total del grano. Su función principal es la reserva energética de la planta durante su crecimiento, químicamente está compuesto de 90% de almidón y 67% de proteínas (Watson, 1987; Wolf, 1952)
- d) **Embrión o Germen:** Representa del 9.5 al 12% de peso total del grano y es necesario para el proceso de reproducción pues posee la estructura necesaria para dar origen a una nueva planta, contiene al escutelo que es el encargado de la alimentación del embrión durante la germinación y constituye el 90% del embrión. El germen se localiza en la parte inferior y posee de un 35 a 40% del contenido total de lípidos presentes en el grano. (Nuñez y otros, 2005).

2.1.6 Composición química del grano de maíz azul.

El grano del maíz es el órgano de almacenamiento de la planta el cual contiene almidones, proteínas y micronutrientes, su calidad nutricional se ve influenciada por algunos factores como son la genética, el medio ambiente y el procesamiento del grano. La composición química y morfología de los gránulos de almidón, ayudan a definir la calidad nutritiva y el uso en la elaboración de alimentos (Hoyos, 2018).

El maíz azul se caracteriza por tener una menor cantidad de almidón y un índice glucémico inferior al del maíz blanco; además, el maíz azul contiene aminoácidos esenciales como la fenilalanina, la leucina y la histidina, que nuestro cuerpo no puede sintetizar por sí solo (Simón y Golik, 2022).

El contenido de carbohidratos en el maíz se encuentra en un rango entre 44 a 69.9%, la humedad de 11.6 a 20%, la proteína de 4.5 a 9.8%, el contenido de grasa de 2.1 a 4.43%, fibra de 2.1 a 26.77% y cenizas de 1.1 a 2.95% (Hoyos, 2018).

2.1.6.1 Carbohidratos (Almidón).

De acuerdo con la FAO (2026), los carbohidratos son el principal componente del grano de maíz, que va desde 72 a 73% del peso del grano. Uno de los principales carbohidratos es el almidón, el cual está formado por dos polímeros de glucosa; amilosa y amilopectina, organizados en anillos concéntricos para dar origen a la

estructura granular. La distribución de la amilosa dentro de los anillos concéntricos difiere entre el centro y la periferia del gránulo, solo ocupa los lugares que deja la amilopectina después de sintetizarse. La relación amilosa-amilopectina es 25:75 en almidones normales. La amilosa es un carbohidrato con una estructura helicoidal y unida a través de enlaces α -1,4; mientras que, la amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa unidas por enlaces α 1-4 y α 1-6, esta es parcialmente soluble en agua caliente. El almidón se forma en los cloroplastos y amiloplastos (Serna, 2010).

El almidón en el maíz se encuentra en el endospermo; a menor contenido de almidón en el endospermo hay mayor contenido de proteínas y esto a su vez se asocia al tipo de endospermo (vítreo y harinoso), los endospermos vítreos contienen más proteína que el harinoso, y el endospermo de tipo harinoso presenta más almidón que el vítreo (Serna, 2010).

La relación de amilosa-amilopectina determina la textura y la calidad de los alimentos que se conforman de almidón, se controla principalmente por el estado de desorganización granular del almidón como la gelatinización y la hinchazón. La hinchazón influye en las propiedades funcionales importantes de almidón tales como retención de agua y espesamiento (Martínez, 2017).

Por el tamaño y la complejidad, el gránulo de almidón crudo no es digerible por el organismo debido a su estructura semicristalina; por lo cual se utilizan procesos de calor y humedad para transformarlo, la gelatinización es la transición más importante de orden-desorden que sufren los polímeros de almidón sometidos a procesos de calentamiento y tiene un gran impacto en la calidad y estabilidad de los productos de almidón (Serna, 2010).

Los maíces pigmentados se caracterizan por contener en su endospermo mayor cantidad de almidón que la reportada en maíces blancos de 0.78 a 0.84g/g de maíz (Utrilla y otros, 2009)

2.1.6.2 Proteínas

Las proteínas son las macromoléculas más importantes desde el punto de vista nutricional, sin embargo constituyen el segundo componente por orden de importancia del grano de maíz, representan aproximadamente el 10% del grano, por lo que el maíz presenta déficit en cuanto a proteína, el endospermo de este cereal está compuesto por un 9% de proteína que se considera de baja calidad, la fracción nitrogenada del grano tiene una baja proporción de proteínas metabólicas; las cuales se dividen de acuerdo a su solubilidad en albuminas y globulinas 6%, glutelina 40% y prolaminas (zeínas) 54% (Serna-Saldivar, 2010). El grano de maíz azul presenta un bajo contenido de triptófano; aun así, la albuminas contienen un adecuado balance de aminoácidos esenciales, las albúminas, las globulinas y el nitrógeno no proteico totalizan aproximadamente el 8% del total de nitrógeno (FAO, 2026).

2.1.6.3 Lípidos

Dentro de estos destacan los ácidos grasos poliinsaturados, ácido linoleico y vitamina E, se encuentran en menor proporción en los cereales en comparación con las oleaginosas. Los lípidos de los cereales se almacenan en el germen, en menor cantidad en el endospermo, los triglicéridos son los lípidos dominantes en el germen y la capa de aleurona, los fosfolípidos y glucolípidos están presentes en el endospermo (FAO,2026).

2.1.6.4 Fibra

El contenido de fibra es mayor que el de muchos otros cereales, contiene carbohidratos de fácil digestión y es rico en minerales como el fósforo, calcio y magnesio; además, contiene vitamina A, E, C, B1 y B3, y antioxidantes. Como en todas las variedades de maíz, el maíz azul contiene fibra dietética insoluble, y se encuentra mayormente en el pericarpio y en las paredes celulares del endospermo y se ve afectada por factores como la genética, clima y altura (Castañeda y Cáceres, 2014).

De acuerdo con el (Codex, 2009a) un alimento se considera alto en fibra cuando contiene al menos 6 g de fibra por cada 100 g de ración o 3 g de fibra por cada 100 kcal de ración.

2.1.6.5 Vitaminas

El grano de maíz azul contiene vitaminas tanto hidrosolubles como liposolubles, dentro de estas últimas destacan dos, que se encuentran en cantidades significativas, vitamina A con 2.5 mg/Kg y vitamina E con 36 mg/Kg. En menor cantidad se encuentran la piridoxina, niacina, vitamina B1 y la vitamina C. Las vitaminas hidrosolubles se localizan en la aleurona, el germen y el endospermo, su concentración varía según factores como el ambiente, la genética de la planta y las prácticas de cultivo (FAO, 2026).

2.1.6.6 Minerales

El maíz presenta bajos niveles de sodio, microminerales, calcio, y vitaminas hidrosolubles, sin embargo, su contenido de fósforo es adecuado (0.25%), la mayor parte de este se encuentra en forma de fitatos (FAO, 2026).

2.1.7 Fitoquímicos del maíz

El maíz azul posee una elevada cantidad de pigmentos con actividad antioxidante y una calidad nutricional superior en comparación con otras variedades de maíz, como el maíz blanco. Los maíces de colores presentan una amplia diversidad de antocianinas, fenoles y flavonoides, los cuales poseen propiedades particulares y diferenciadas; sin embargo, a pesar de su actividad biológica son sensibles a factores como el oxígeno, pH, altas temperaturas y la luz (Castañeda, 2011).

Los fitoquímicos del maíz son compuestos bioactivos no nutritivos presentes en plantas, frutas, verduras y cereales, son capaces de disminuir el riesgo de enfermedades crónicas. Su composición varía entre los distintos tipos de maíz; por ejemplo, en el maíz amarillo predominan los carotenoides, mientras que en el maíz rojo, azul, morado y negro las antocianinas (Tepixtle y otros, 2025).

2.1.7.1 Fenoles

Los compuestos fenólicos también conocidos como polifenoles agrupan más de 8000 sustancias diferentes, no obstante, los más importantes son los flavonoides y ácidos fenólicos (Quiñones y otros, 2012). La principal actividad biológica de los fitoquímicos es su capacidad antioxidante y antimicrobiana la cual resulta relevante por su habilidad para neutralizar radicales libres y combatir bacterias. Las plantas producen compuestos fenólicos en sus diferentes estructuras como mecanismo de defensa, el maíz es uno de los cereales que contiene una mayor cantidad de compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos poseen múltiples actividades biológicas, donde las más estudiadas han sido su poder antioxidante, anticancerígena y antiinfecciosa (Salinas y otros, 2023).

El contenido total de fenoles varía entre las diferentes variedades de maíz y va desde 243.8 ± 4.6 a 320.1 ± 7.6 mg equivalentes de ácido gálico /100 g de peso seco; en maíz azul se ha reportado un contenido de fenoles totales de 266.2 ± 0.7 mg equivalentes de ácido gálico /100 g de peso seco (Sheng y otros, 2018).

2.1.7.2 Flavonoides

Son compuestos hidrosolubles con actividad antiinflamatoria, previenen algunos tipos de cáncer (Cerón y otros, 2019). Son el grupo más grande de los compuestos fenólicos, hay estudios epidemiológicos donde se demuestra que un alto consumo de estos reduce el riesgo de enfermedades crónicas, diabetes y cáncer, su estructura está conformada por 2 anillos aromáticos unidos por un anillo heterocíclico oxigenado, conocido como anillo C, las posibles estructuras de este anillo los clasifican en flavanoles, flavonoles, flavonas, antocianinas, flavavonas e isoflavonoides (Sheng y otros, 2018).

2.1.7.3 Antocianinas

Los maíces de granos pigmentados (azul, rojo y negro) contienen un alto nivel de antocianinas, las cuales están relacionadas con la prevención de enfermedades crónico degenerativas. Estos pigmentos suelen localizarse en el pericarpio, la aleurona o en ambas estructuras, cuando la concentración de antocianinas es mayor, los granos pueden adquirir una apariencia negra (Beltrán y otros, 2001). El

término antocianina proviene de las palabras griegas anthos (flor) y kyaneas (azul), y se asocia con la pigmentación azul, roja y púrpura en las plantas y en partes comestibles principalmente en cereales y frutas. Estos compuestos presentan propiedades antioxidantes ayudan atacar los radicales libres presentes en el organismo (Escalante, 2013).

Las antocianinas son compuestos fenólicos pertenecientes al grupo de los flavonoides formados por dos anillos aromáticos unidos mediante una cadena de tres carbonos, su concentración de antocianinas varía según la raza, los niveles más bajos se encuentran en maíces amarillos y rosas, y le siguen los maíces azules. Los maíces de color morado y negro presentan los valores más altos de antocianinas (Bello y otros, 2016).

Estas moléculas presentan un esqueleto carbonado en forma C-6-C-3-C-6 cuya estructura forma un anillo cromado unido a un anillo cromático en la posición dos, el tipo de antocianina depende del grado o nivel de hidroxilación o metoxilación presente en el anillo de la molécula, el color que producen la antocianina está determinado por el número y ubicación de los grupos sustituyentes, un incremento de grupos hidroxilos genera tonalidades azules; mientras que, la predominancia de grupos metoxilos origina colores rojos (Escalante, 2013); su estabilidad depende de diversos factores como el oxígeno, pH, la luz, la presencia de iones metálicos (Ca^{2+}); en medios ácidos presentan mayor estabilidad, donde la forma predominante es la del ion flavilio el cual produce una coloración roja, en cambio en pH básicos, el ion flavilio es susceptible a un ataque nucleofílico por parte del agua dando lugar a formas incoloras (González, 2013).

En el maíz azul se encuentran compuestos como la peonidina, malvidina, cianidina y los glucósidos de las antocianidinas (Bello y otros, 2016).

2.1.8 Propiedades funcionales del maíz azul

El maíz azul es rico en antocianinas responsables de la coloración distintiva y con efectos benéficos para la salud, estos compuestos están relacionados con la prevención de enfermedades como el cáncer debido a su capacidad antioxidante; ya que, contribuyen a neutralizar los radicales libres presentes en el torrente

sanguíneo. Así mismo, las interacciones entre los compuestos bioactivos y carbohidratos son relevantes pues favorecen o limitan su bioaccesibilidad; además de influir disminuir la digestibilidad del almidón. Tienen una acción protectora hacia las nefropatías que se desarrollan en pacientes con diabetes tipo 2, sin embargo, estas propiedades se pierden durante los tratamientos térmicos (Bello y otros, 2016).

Los polisacáridos no amiláceos tienen una función en la salud intestinal y están asociados con la reducción del colesterol y la respuesta glucémica, además de proteger contra el daño oxidativo; así mismo, los compuestos fenólicos afectan la digestibilidad del almidón, el contenido de almidón resistente aumenta cuando hay una gran cantidad de fenoles, esto ocasiona que el almidón digerible disminuya al igual que la velocidad de digestión (Bello y otros, 2016).

2.1.9 Usos del maíz

Desde los antiguos pobladores, el teocintle se consumía de diversas maneras, una de ellas era calentarlo hasta que la semilla explotara para formar la palomita de maíz, posiblemente también se molía para producir harina, al igual se realizaba el proceso de nixtamalización para la elaboración de masa para tortillas y tamales, en la época anterior a la conquista, los habitantes de Mesoamérica efectuaban un aprovechamiento integral del maíz, era una de las principales plantas en su alimentación, era el cultivo fundamental de América (Vargas , 2007).

Todas las partes de la planta de maíz, sirven como abono o combustible; la caña se utiliza en la construcción o elaboración de figuras, ha tenido varios usos desde envoltura, fertilizante, fuente de energía, preparación de bebidas refrescantes o alcohólicas; así mismo, las hojas se emplean como envoltorio para tamales, en la elaboración de utensilios ceremoniales y artesanales. Actualmente, el grano de maíz se utiliza en el forraje, obtención de compuestos químicos que son comercializados; tales como, miel de maíz, azúcar de maíz, dextrosa, almidón o fécula, aceite, color caramelo, dextrina, malto dextrina, ácido láctico, sorbitol y etanol. Se le considera recurso energético renovable, pues de este proviene el etanol, que se utiliza como combustible (Kato y otros, 2009)

3 Generalidades de la jamaica

3.1 Definición

La jamaica, rosa de jamaica o rosa de abisina conocida científicamente como *Hibiscus sabdariffa* L es un hibisco perteneciente a la familia de las malváceas, originaria de África; sin embargo, es cultivada en regiones como América central, América del sur y en el Sudeste Asiático que tienen una climatología que la favorecen. En regiones áridas y semiáridas la siembra puede iniciarse en mayo o en junio para así poder cosecharse en octubre. Los cálices se comercializan previamente deshidratados con el fin de elaborar bebidas (Fosado y otros, 2021). Fue introducida a México en el siglo XVI a través de embarcaciones españolas que cruzaron el océano Pacífico desde Filipinas e igual por el Atlántico en cargueros que transportaban esclavos desde África (Fosado y otros, 2021). Debido a sus componentes funcionales los cálices de jamaica son recomendadas y utilizadas como alternativa para tratar el sistema circulatorio, alta presión sanguínea, niveles altos de grasa en la sangre, diabetes, obesidad y por sus propiedades antioxidantes, en el desarrollo de anticancerígenos, del mismo modo contienen varios compuestos antioxidantes naturales que actúan contra diversos virus y bacterias (Fosado y otros, 2021).

3.2 Producción en México

En el mundo se producen anualmente 100000 toneladas de flor, China y Tailandia son los principales países productores. En el continente americano, México es el principal productor con 27.76% en México se siembran alrededor de 18654.09 hectáreas y se producen 7889.66 toneladas con un rendimiento de 0.43 toneladas por hectárea, provenientes de 11 estados Campeche, Colima, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla y Sinaloa (SIAP, 2019), de los cuales Guerrero es el principal productor con 73. 64% (SIAP, 2019).

3.3 Morfología de la flor de jamaica

Planta anual erecta, arbustiva, cubierta de ramas, generalmente sus tallos cilíndricos casi lisos, rojos pueden alcanzar hasta 2.4 m de alto, sus hojas son verdes aserradas y agudas con venas rojizas y peciolo de 7.5 a 12.5 cm de longitud, sus flores son de color amarillo con centro color rosa a rojo marrón que cambia a rosado a medida que se marchitan, pueden llegar a medir hasta 12.5 cm

de largo y 4 cm de ancho, el cáliz consta de 4 a 5 pétalos, este crece hasta la madurez y el fruto se vuelve carnoso. Su reproducción es por autofecundación, cada válvula contiene de 3 a 4 semillas afelpadas de color café y en forma de riñón que miden de 3 a 4 mm de longitud, cuando la cápsula está madura y seca, cambia a color café rojizo y se separa (Carvajal, 2006). Los cálices, tallos y hojas poseen un sabor ácido comparable al del arándano rojo (Da Costa, 2014).

3.4 Composición química

Estudios han reportado que *Hibiscus sabdariffa* L. contiene proteínas (1.9 g/100 g), lípidos (0.1 g/100 g), carbohidratos (12.3 g/100 g), fibra cruda (2.3 g/100 g), vitamina C (14 mg /100 g), calcio (1,72 mg/100 g) y hierro (57 mg/100 g) (Da Costa, 2014). Se ha reportado que las flores de *Hibiscus sabdariffa* L. presentan capacidad elevada de antioxidantes (Ariza y otros, 2017). La composición puede cambiar dependiendo de la variedad genética y tipo de suelo. Así mismo, la jamaica es una fuente importante de calcio, magnesio y oligoelementos (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química *Hibiscus sabdariffa* L.

Datos expresados en g por cada 100.	
Cenizas	11.29
Proteínas	8.11
Lípidos	10.99
Carbohidratos Totales	0.82
Fibra dietética Soluble	34.81
Polisacáridos	8.76

Fuente: (Zamora y otros,2018).

Tabla 2. Composición fitoquímica de *Hibiscus sabdariffa* L.

Datos expresados en mg equivalentes de ácido gálico/g
--

Polifenoles extraíbles	38.29
Polifenoles hidrosolubles	11.6
Taninos condensados	3.3

Fuente: (Zamora y otros, 2018).

3.5 Fitoquímicos de la jamaica

En los cálices de *Hibiscus sabdariffa* L. se pueden identificar compuestos bioactivos (Tabla 2). Los compuestos bioactivos son minoritarios en alimentos y son considerados no nutrientes, están parcialmente biodisponibles en el organismo y han demostrado tener efectos positivos en la salud del consumidor.

Los componentes de esta planta como vitaminas (E y C), ácidos polifenólicos, flavonoides y antocianinas ejercen acción antioxidante, secuestro de radicales libres y su actividad cardioprotectora, ayudan a reducir enfermedades crónicas como la hipertensión, las dislipidemias y la diabetes mellitus. La capacidad antioxidante de los cálices de jamaica se encuentra determinada por la estabilidad luego de la ruptura de la cadena de los radicales libres (López y otros, 2019).

3.5.1 Fenoles de los cálices de jamaica

Son un grupo de compuestos naturales que se derivan del metabolismo secundario en los vegetales y frutas, su característica principal es el potencial antioxidante; además de, proporcionar sabor, color y aroma. Son un grupo importante de compuestos, se encuentran en forma libre o conjugada (Silva, 2018). Se caracterizan por la presencia de un anillo aromático del grupo hidroxilo que favorece la actividad fenólica (Jiménez y otros, 2022).

Una parte importante de los compuestos fenólicos son los taninos condensados y taninos hidrolizados, son polímeros de elevado peso molecular que poseen una alta concentración de grupos hidroxilo lo que les permite formar complejos insolubles con proteínas y carbohidratos (Rodríguez, 2019). Los ácidos fenólicos son relativamente estables, y son transformados por algunos microorganismos que tienen la capacidad de utilizarlos como fuente de carbono (Flores, 2021). Para la

extracción de los metabolitos de la jamaica se utilizan normalmente etanol, metanol, éter de petróleo y acetato de etilo, con ayuda del etanol en las extracciones en plantas se puede recuperar una mayor concentración de compuestos químicos (De León y otros, 2016).

El compuesto fenólico más abundante en los cálices de jamaica es el ácido clorogénico, reconocido por sus actividades biológicas asociadas con beneficios a la salud, el contenido de los compuestos fenólicos varía ampliamente dependiendo de los cálices (Piovensa, 2019).

3.5.2 Antocianinas de los cálices de jamaica

Las antocianinas reportadas en *Hibiscus sabdariffa* L. son la delfinidina-3-glucósido y cianidina-3-sambubiosido, que presenta en promedio el 65 y 30%, respectivamente, el color varía según el color de los cálices, pueden ser blancos, rojos oscuro o claro. La intensidad de coloración de los cálices de jamaica está relacionada con la concentración de antocianinas, siendo más abundantes en aquellos que tienen tonos más oscuros. La conservación de estos pigmentos y de su color característico puede verse afectada por diversas condiciones como es el contenido de agua, el grado de acidez y la exposición a la luz (Piovensa y otros, 2019). La cantidad de hidroxilo y metoxilo son responsables del color característico en los cálices de jamaica, si existe el enrojecimiento en el extracto este se compone por grupos metoxilos, si su color es azul tiene mayor cantidad de hidroxilos (Valdez y otros, 2019).

Para la extracción de antocianinas se ha reportado que el tipo de solvente desempeña un papel importante; así como, la polaridad del solvente impacta en la solubilidad y estabilidad influyendo en el rendimiento y calidad del extracto, se sabe que en el caso de las antocianinas un pH inferior a 2 permite una mayor estabilidad de ion flavilio; mientras que, con un pH de 7, hay una formación de otras estructuras como cis y trans chalcona (Maciel y otros, 2018).

Estos compuestos han destacado como una alternativa para los alimentos funcionales, pues tienen como propósito reemplazar los pigmentos sintéticos en la industria alimentaria (López y otros, 2019).

3.6 Propiedades funcionales

La utilización más frecuente de los cálices de jamaica es para la preparación de infusiones o bebidas; en la actualidad se ha innovado con estos cálices, obteniendo polvo para pigmento, salsas y mermeladas, debido a su gran contenido de fibra. Del mismo modo se ha usado como medicina alternativa con la finalidad de tratar enfermedades cardiovasculares, niveles elevados de lípidos específicamente en sangre por sus propiedades antioxidantes (Fosfado , 2021)

4 Botanas

4.1 Aspectos generales

De acuerdo a la NOM-187-SSA1/SCF1-2002 se entiende por botana a los productos obtenidos a partir de harinas de cereales, leguminosas, tubérculos o féculas; así como, de granos, frutas, frutos, semillas o leguminosas con o sin cáscara o cutícula; productos de nixtamalización y piel de cerdo, que pueden estar fritos, horneados, explotados, cubiertos, extruidos o tostados; adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales y aditivos alimentarios.

De acuerdo con la PROFECO (2013), en México el consumo de botanas por persona es de aproximadamente de 4 Kg al año, donde destacan las frituras de maíz (58%), papas fritas (29%), botanas de harina de trigo (4%), y el resto lo integran los chocolates, caramelos y gomitas.

Una botana llamado también refrigerio es un tipo de alimento que no se consume como comida principal, su objetivo es saciar el hambre entre comidas, proporcionando una pequeña cantidad de energía al cuerpo, también puede hacer referencia a un alimento que se consume entre comidas por simple placer, puede considerarse una comida ligera (Neeraj y otros, 2016)

4.2 Clasificación

Existen distintas maneras de clasificar las botanas, sin embargo, los fabricantes de dichas botanas utilizan la siguiente clasificación para identificarlas

- a) **Botanas de primera generación:** dentro de esta clasificación entran todos los productos naturales utilizados para botanas, como frutos secos, papas fritas, palomitas de maíz. Son elaboradas a partir del grano entero utilizando combinaciones de humedad, temperatura, tiene el inconveniente de estar

elaboradas con materia prima perecedera y tener un periodo de vida útil corta de 1 a 3 meses (Neeraj y otros, 2016)

- b) **Botanas de segunda generación:** son productos extruidos expandidos, que se moldean y expanden en la matriz del extrusor con humedades de 7 a 12%, normalmente no requieren un tratamiento adicional para ser consumidos, salvo un deshidratado. Estos productos consiguen ciertas características mediante una relación temperatura/humedad que provoca la expansión del producto una vez que llega a la salida de la boquilla del extrusor. Dentro de esta clasificación se incluyen aquellas botanas de un solo ingrediente con formas sencillas, totopos de maíz, espirales de maíz inflados, aros de cebolla, la mayoría se extruyen a través de orificios redondos, donde la velocidad de cortadora determinará si es una esfera, varilla o un espiral, la mayoría de estos son elaborados a partir de harina de maíz, son ricos en fibra, proteína y bajos en calorías. (Neeraj y otros, 2016)
- c) **Botanas de tercera generación:** Productos indirectamente expandidos o semiproductos terminados, en esta clasificación entran las botanas y pellets de múltiples ingredientes, la presentación final es después de un freído con aceite u otras alternativas para la expansión como el calentamiento por radiación infrarroja, microondas o por expansión con aire. Representa un alto interés en el mercado debido a su estabilidad al almacenamiento y su alta densidad aparente, al ser un material con baja humedad puede conservarse durante al menos un año después de su producción. Los pellets obtienen su forma mediante un dado a bajas presiones para así evitar su expansión, generalmente contienen al menos 60% de almidón para así poder alcanzar la expansión máxima. Se trata de productos semiacabados y no expandidos que tras su expansión se convierten en botanas (Neeraj y otros, 2016).

4.3 Producción y mercado

De acuerdo con el periódico el Financiero, (2025) el consumo de botanas saladas en México alcanzó un promedio de 10.9 kilos por persona. El mundo de las botanas está sufriendo una transformación acelerada, gracias a las preferencias de los consumidores y por la constante innovación de la industria alimentaria, actualmente

los jóvenes entre 15 y 29 años, priorizan la salud y el bienestar, buscan productos bajos en azúcar y calorías, esto ha obligado a las marcas a innovar nuevos productos responsables y accesibles, en la actualidad existe una tendencia hacia el consumo de productos que integran atributos sensoriales y nutricionales. Esta preferencia está asociada a la calidad de los ingredientes y a la elección de opciones más naturales y mínimamente procesados.

La popularidad de las botanas se debe al ritmo de vida acelerado que lleva a las personas al incremento de los malos hábitos alimenticios (Medina y otros, 2024).

El tamaño del mercado de botanas extruidas en México alcanza 667 millones de dólares en México, se espera que para 2034 alcance 1,026.8 millones de dólares, el mercado está impulsado por la creciente urbanización, aumento de la demanda y la evolución de las preferencias. Los fabricantes botanas extruidas en México están incorporando sabores tradicionales para satisfacer preferencias de sabor, gracias a que las marcas internacionales entran en el mercado, las empresas nacionales aprovechan para conservar su mercado. La creciente concientización sobre la salud de los consumidores mexicanos está provocando un mayor interés por las botanas extruidas ricas en proteína, bajas en grasa o enriquecidas con vitaminas y fibra, los fabricantes están incorporando nuevas materias primas para mejorar el atractivo del producto sin comprometer su sabor o textura (imarc , 2025). Las botanas extruidas a base de maíz tienen la mayor participación en el mercado, por su sabor favorable, textura crujiente y propiedades de expansión. La extrusión se ha utilizado ampliamente en la producción de botanas a base de cereales listos para consumo, debido a su facilidad de preparación y capacidad para producir texturas y formas variadas. Hoy en día para los consumidores buscan alimentos sin gluten, veganos y sin alérgenos (INSIGHTS, 2026).

Las botanas a base de maíz ocupan un mercado importante, es el ingrediente principal en de una gran variedad de snacks extruidos. El mercado de América Latina generó 4,880 millones de dólares en 2025, representando el 7.82% del panorama del mercado global y se espera que alcance los 5,100 millones de dólares en 2026.

4.4 Alimentos funcionales

Se le conoce como alimento funcional aquellos que contienen alguna propiedad natural o añadida que influya de manera positiva a la salud por encima del valor nutrimental del producto (Coria y otros, 2022).

El desarrollo de los alimentos funcionales comenzó con vitaminas y minerales, más tarde se le añadieron micronutrientes como ácidos grasos y fibras solubles, estudios sugieren numerosos efectos positivos en la salud gracias a los alimentos funcionales como la reducción de riesgo de cáncer, reducción de enfermedades cardiovasculares, mejora de la salud gastrointestinal, efectos antiinflamatorios, reducción de la presión arterial, actividades antibacterianas y antivirales y la reducción de la osteoporosis. En los últimos años el interés hacia los alimentos funcionales ha incrementado gracias a los diversos beneficios que aporta la ingesta de alimentos enriquecidos en compuestos bioactivos (Coria y otros, 2022).

Con el paso del tiempo los consumidores en México prefieren las alternativas de botanas más saludables, ahora los consumidores priorizan la nutrición y el bienestar, esto ha sido consecuencia de la tendencia de las botanas orgánicas, los cuales van dirigidos a consumidores que se preocupan por su salud, las semillas de chía, amaranto y linaza, aparecen con más frecuencia (Coria y otros, 2022). Los únicos alimentos funcionales que son aceptados y reconocidos como saludables son aquellos cuya materia prima son frutas y vegetales pues se cree que estas botanas se elaboran con procesos que no provocan una transformación química de sus componentes (Medina y otros, 2024)

5 Extrusión

Se define como extrusión a la operación de moldeado de material parecido a una pasta, forzándola a través de un troquel; los materiales pasan por una serie de cambios físicos y químicos irreversibles (Riaz, 2004), de tal manera que la mezcla que entra es completamente diferente a la que sale. La extrusión implica que un material se fuerza a través de un orificio (matriz de salida), lo que significa que el material es capaz de fluir, pues tiene propiedades parecidas a las de un líquido

cuando se encuentra en el extrusor, aunque las materias primas y el producto final son sólidos, durante una parte del proceso el material se comporta como un fluido (Forte y Young, 2021). Rossen y Miller (1973) han definido la extrusión de alimentos como un proceso donde un material alimentario es forzado a fluir, bajo una o varias condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, a través de un troquel que está diseñado para deshidratar y expandir las materias primas, texturizar productos alimentarios bajo condiciones que favorecen la calidad del alimento. El objetivo general de la extrusión puede ser variado, lograr la cocción, pasteurización, expansión, reducción de humedad, homogeneización de materiales y restauración. De acuerdo con (Nadeem, 2004) un extrusor de alimentos facilita el proceso de moldeado y reestructuración para los ingredientes alimentarios.

La extrusión es una operación unitaria versátil que se puede aplicar a un gran número de alimentos, las diferentes condiciones permiten realizar muchas funciones algunas de ellas son; cizallamiento, moldeado, aglomeración, desgasificación, deshidratación, cocción, expansión, gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, trituración, homogeneización, mezclado, pasteurización y esterilización (Nadeem, 2004).

5.1 Extrusor

Un extrusor consta de varios componentes; sin embargo, los extrusores se conforman principalmente de tres zonas:

a) Zona de alimentación: En esta zona se encuentra una tolva con un cilindro, donde se introduce la materia prima cruda, en algunos casos cuentan con un preacondicionador, a medida que la masa avanza la presión aumenta de forma gradual el flujo de la alimentación afecta la transferencia de calor y el contenido de humedad, el índice de absorción de agua y solubilidad de agua disminuyen cuando la alimentación aumenta, tiene un sistema de enfriamiento en diferentes zonas a lo largo del cilindro y en la parte final del dado para dar la forma al producto (Gómez, 2013).

Su función es trasladar el material hacia abajo del tornillo.

b) Zona de compresión: La materia prima se comprime por el efecto del tornillo, esta se calienta por la fricción y se produce una fusión, la materia

prima cambia de un estado sólido a viscoso, pierde su textura granular y su densidad empieza a ser mayor conforme a la presión en el interior del cilindro, en algunos casos se puede inyectar vapor para ayudar a la cocción. La compresión se ejerce en los canales de flujo del extrusor. (Nadeem, 2004)

- c) Zona de fusión:** Aquí se logra una alta homogenización, la temperatura y la presión aumenta de manera rápida debido al dado y a lo pequeño del tornillo, aquí ocurre la transformación final de la materia prima, se ve afectada su densidad, color y propiedades funcionales del producto final, se comprime y se homogeniza a través de la boquilla de presión constante (Nadeem, 2004).

5.2 Clasificación de extrusores

En la industria alimentaria el extrusor es una máquina que tiene de característica un tornillo de Arquímedes (un tornillo roscado girando que se ajusta suficientemente en un cilindro para transportar el fluido) que opera de manera continua. Existen diferentes clasificaciones para los extrusores basadas en la humedad, la cantidad de tornillos y en las características funcionales o termodinámicas del proceso. Con relación al tipo de extrusores y su clasificación por tornillo que se utiliza en la industria alimentaria destacan dos tipos: extrusores de tornillo simple y extrusores de doble tornillo (Nadeem, 2004).

5.2.1 Extrusores de un solo tornillo

Son los más utilizados en la industria alimentaria, producen más tonelaje de productos extruidos que de otro tipo de procesado, los productos obtenidos de estos extrusores tienen una densidad baja o alta, el canal del tornillo no está dividido, es continuo y largo, el producto es arrastrado por el canal del tornillo, debido al movimiento relativo del mismo y la superficie del barril (Nadeem, 2004).

En el tornillo, la materia prima es comprimida y transportada con el fin de transformar la estructura granular en una masa semisólida, esta es extruida a través de una boquilla, en la salida el producto final es cortado por una cuchilla rotatoria o guillotina, que da lugar a distintas formas. Algunos ejemplos de ellos son los extrusores para elaborar pastas, tiene instalado un cilindro con una pared lisa y la geometría del tornillo es constante; otro ejemplo, sería el extrusor de alta presión que es utilizado para comprimir y dar forma a una masa pregelatinizada, cuenta con

un cilindro con ranuras donde se presenta una fricción a través del tornillo (Nadeem, 2004).

5.2.2 Clasificación de los extrusores de doble tornillo

Estos extrusores se utilizan comúnmente en alimentos que requieren alta humedad, en productos que contienen altas cantidades de fibras, grasas o productos más sofisticados. Con los años los requerimientos de nuevos productos y de calidad han aumentado ya que los extrusores de un solo tornillo no son muy adecuados, para estos requerimientos es necesario ocupar la tecnología de tornillo doble. Estos extrusores incluyen una variedad de máquinas con características y capacidades de procesado y mecánicas ampliamente diferentes. Los extrusores de doble tornillo se pueden clasificar de acuerdo a la dirección de rotación del tornillo en dos categorías (Nadeem, 2004).

- a) **Extrusores de doble tornillo contra rotatorios:** no son muy comunes en la industria de los alimentos; sin embargo, son excelentes transportadores, son buenos para el procesado de materiales relativamente no viscosos que requieren velocidades bajas y grandes tiempos de residencia, como los son gomas, jaleas y dulces de regaliz.
- b) **Extrusores de doble tornillo co-rotatorios:** son los más utilizados en la industria alimentaria y en aperitivos alimentarios, los extrusores de doble tornillo co-rotatorios proporcionan altos grados de transmisión de calor, pero no un medio de transporte forzado. Entre sus ventajas esta su eficiencia en bombeo, buen control sobre la distribución de tiempos de residencia, mecanismo de auto limpieza y uniformidad de proceso.

5.3 Ventajas del proceso de extrusión

Los productos extruidos presentan varias ventajas en cuanto a sus características sensoriales como la textura, color, aroma y sabor, y en propiedades nutricionales como el incremento en el contenido de proteína y perfil de aminoácidos balanceados, entre otras (Nadeem, 2004).

El proceso de extrusión, es un proceso continuo con el que se pueden obtener productos con diversas formas, texturas, colores, apariencias, que no son factibles con otros métodos de producción; algunos procesos operan a baja humedad por lo

que, el tiempo de secado posterior es menor. Presenta un coste más bajo que otros procesos de cocción y moldeado, el ahorro de materia prima (19%), mano de obra (14%), inversión del capital (44%), de igual manera requiere de menos espacio por unidad de operación de los sistemas tradicionales de cocción. El proceso de extrusión es continuo favoreciendo una elevada producción, puede ser automatizado, minimiza la degradación de nutrientes, mientras que se mejora la digestibilidad de las proteínas (desnaturalización) y de los almidones (gelatinización); las altas temperaturas también provocan la destrucción de componentes antinutricionales como inhibidores de tripsina y enzimas no deseables como lipasas, lipoxidasas y microorganismos; así como, compuestos alérgenos que se encuentran en la materia prima; se generan pocos o nulos efluentes y es un proceso que se puede escalar fácilmente a nivel industrial.

6 Materiales y métodos

6.1 Materia prima

Se utilizó maíz azul obtenido de un productor local de Tizayuca, Hidalgo. Los cálices de jamaica se obtuvieron de la central de abastos de Tulancingo, Hidalgo.

6.2 Caracterización del maíz azul

6.2.1 Impurezas

De acuerdo a la norma NMX-FF-034/1SCFI-2002 se determinó el número de impurezas. En un tamiz de orificios circulares de 4.76 mm sobre una de 2.38 mm con una charola en el fondo, se vaciaron 1000g de muestra, se agitó con movimientos oscilatorios y circulares durante 1 min aproximadamente, posteriormente se separó la materia que no atravesó y que era diferente al grano. Se pesó el contenido de la charola de fondo y se determinó el número de impurezas.

$$\% \text{Impurezas} = \frac{\text{Masa de las impurezas}}{1000 \text{ g}} * 100$$

6.2.2 Granos quebrados

Los granos que fueron retenidos en la criba de 2.38 mm de diámetro, se pesaron y con ayuda de la siguiente fórmula se determinó el porcentaje.

$$\% \text{Granos quebrados} = \frac{\text{Masa de granos quebrados}}{1000\text{g}} * 100$$

6.2.3 Dimensión de los granos de maíz azul

El total de los granos se dividió en 3 partes iguales de cada parte se tomaron aleatoriamente 30 granos y con ayuda de un vernier se determinaron las dimensiones de largo, ancho y espesor del grano de maíz azul.

6.2.4 Peso de mil granos

Se eligieron 1000 semillas al azar de un lote limpio, posteriormente se pesaron en una balanza analítica y se reportó su peso, este procedimiento se realizó por triplicado.

6.2.5 Peso hectolítrico

Se conoce como peso hectolítrico a la masa en Kg de grano que ocupa un volumen de 100 litros. La determinación se realizó utilizando un densímetro de granos y un recipiente metálico de volumen conocido, la muestra del grano limpio se dejó caer sobre el recipiente de volumen conocido hasta que se derramara, posteriormente con ayuda de una regla metálica y en forma de zigzag se enrazó el recipiente y se pesó, con ayuda de la siguiente fórmula se calculó el peso hectolítrico el cual fue reportado en Kg/hL. La determinación se realizó por triplicado.

$$PH \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hL}} \right) = \left(\frac{\text{Peso recipiente con grano (g)} - \text{peso del recipiente vacío (g)}}{\text{Volumen (L)}} \right) * 100$$

6.2.6 Índice de flotación

Se pesaron 100 g de maíz azul, los cuales se colocaron en un vaso de precipitado de 500 mL con agua destilada a temperatura ambiente, se agitaron ligeramente con ayuda de una varilla de vidrio durante 1 min y se dejaron reposar durante 5 min, los granos flotantes se separaron y posteriormente se pesaron. El porcentaje de flotabilidad se calculó con ayuda de la siguiente fórmula:

$$\% \text{de flotación} = \frac{\text{Peso de granos flotantes}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.2.7 Relación de componentes estructurales de los granos de maíz

Se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por (Aragón y otros 2012). Se pesaron 5 g de maíz azul estos se colocaron en un vaso de precipitado de 250 mL con 100 mL de agua destilada a 85 °C, se dejaron remojar durante 15 min para facilitar la disección de estos. Con ayuda de un bisturí se realizó un corte del pedicelo (parte del grano que mantiene unido al grano con la mazorca), posteriormente se realizó un corte longitudinal sobre los granos de maíz azul y con ayuda de unas pinzas de disección se retiró el pericarpio (cáscara), el endospermo se separó del germen con ayuda de un bisturí (parte central); todos los componentes se colocaron en capsulas de porcelana previamente llevadas a peso constante, las cápsulas con los componentes se colocaron en un horno de secado a una temperatura de 130 °C por 1 h, transcurrido el tiempo de secado las cápsulas se colocaron en un desecador hasta que llegaran a temperatura ambiente y por último fueron pesadas. Con ayuda de las siguientes ecuaciones se calculó el porcentaje de cada uno de los componentes del grano.

$$\text{Porcentaje} = \left(\frac{\text{Peso de la fracción}}{\text{Peso total del grano}} \right) * 100$$

6.3 Análisis químico proximal del maíz azul y de los cálices de jamaica

6.3.1 Obtención de la harina de maíz azul

Para la obtención de la harina de maíz azul, 4.0 Kg de grano se limpiaron y pesaron, los granos se trituraron con ayuda de un molino manual para granos; posteriormente se molieron en un molino pulverizador hasta un tamaño de partícula de 250 µm.

6.3.2 Obtención de harina de jamaica

Para la obtención de polvo de cálices de jamaica, los cálices se deshidrataron en un horno de secado por 5 h a 50 °C, transcurrido el tiempo de secado se sometieron a molienda en un molino pulverizador hasta obtener un polvo fino (250 µm), los restos

que no pasaron por el tamiz se molieron con ayuda de un molino Udy, el polvo resultante se tamizó nuevamente, se almacenó en bolsas ziploc y en oscuridad.

6.3.3 Humedad

La determinación se realizó de acuerdo al método de la AOAC (930.15, 2000), el cual consiste en evaporar el agua contenida en la muestra por medio de secado. En una cápsula de porcelana previamente llevada a peso constante se colocaron 3 g de muestra molida, la cual se colocó dentro de una estufa por 3 h a una temperatura de 130 ± 3 °C y posteriormente se dejó en el desecador hasta que se enfrió y se pesó, con ayuda de la siguiente fórmula se obtuvo la humedad.

$$\% \text{Humedad} \left(\frac{\text{g agua}}{100 \text{ g}} \right) = \frac{(P1-P2)}{m} * 100$$
$$\% \text{SS} = 100\% - \% \text{Agua}$$

Donde:

P1: Peso de la cápsula con muestra húmeda

P2: Peso de la cápsula con muestra seca

m: Peso de la muestra

6.3.4 Determinación de lípidos

El contenido de lípidos se determinó mediante el método de extracción Goldfish utilizando el equipo BÜCHI E-816 HE. Se pesaron 5 g de muestra en cartuchos de celulosa, los cuales se colocaron dentro del equipo extractor. Posteriormente se añadieron 50 mL de éter de petróleo como solvente de extracción en los vasos recolectores, el proceso de extracción tuvo una duración de 4h. Una vez finalizada la extracción los matraces Goldfish con los lípidos extraídos se colocaron en un horno de convección a 105 °C hasta evaporar por completo el disolvente, posteriormente se colocaron en un desecador por 30 min y se pesaron. El peso de la grasa se calculó restando el peso del vaso final menos el peso del vaso inicial.

$$\text{Grasa}\% = \frac{(P1-P2)}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Donde:

P1= peso del vaso con el extracto etéreo o residuo de grasa la muestra.

P2= peso del vaso vacío

P= peso de la muestra empleada

6.3.5 Determinación de cenizas

Para la determinación de cenizas se utilizó el método 934.01 de AOAC. En un crisol de porcelana a peso constante se colocó 3 g de muestra, la muestra se llevó a combustión en una parrilla de calentamiento a 325 °C hasta que la muestra tomo un color negro, posteriormente se llevó a una mufla a 550 °C hasta que se calcinó y las cenizas estuvieron grises y/o blancas. Se dejaron enfriar los crisoles en un desecador y se pesaron, este procedimiento se realizó por triplicado. El total de cenizas se calculó con ayuda de la siguiente formula.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{\text{Peso del crisol con cenizas} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.3.6 Determinación de proteínas

Se determinó de acuerdo a la metodología de la AOAC (984.13). Se pesaron 0.5 g de muestra y 5 g de mezcla digestora (compuesta por sulfato cúprico y sulfato de potasio en una relación 1:10 p/p) se colocaron en el tubo digestor Kjeldahl, posteriormente se añadieron 15 mL de ácido sulfúrico concentrado, los tubos se colocaron en el digestor hasta obtener un color turquesa, se dejaron enfriar las muestras y se le adicionaron 15 mL de agua destilada; los tubos se sometieron a una destilación y el producto de la destilación se colectó en un matraz Erlenmeyer de 250mL el cual contenía una solución preparada de ácido bórico al 2% y 3 gotas de indicador rojo de metilo, la solución se tituló con la solución normalizada de H₂SO₄ 0.1 N hasta que se tornó rojo claro, se registró la cantidad y la concentración de la solución normalizada necesaria para titular la muestra y con ayuda de las siguientes ecuaciones se calculó el porcentaje de nitrógeno y proteína.

$$\% \text{nitrógeno} = \frac{[(\text{mL HCl})(\text{N HCl})(14.007)(100)]}{\text{mg de muestra seca}}$$

$$\% \text{Proteína cruda} = (\% \text{nitrógeno}) (\text{factor de corrección})$$

El factor de corrección utilizado fue de 6.25

6.3.7 Determinación de Fibra

Se realizó de acuerdo con el método de la AOAC (962.09). Se pesó 1 g de muestra desengrasada en un vaso de Berzelius, a este se le agregaron 200 mL de ácido sulfúrico, la muestra se colocó a calentamiento en el aparato digestor durante 30 min, concluida la digestión ácida la muestra se filtró con ayuda de un papel filtro y un embudo büchner, al residuo retenido en el papel filtro se le realizaron lavados con agua destilada caliente tres veces y se sometió a una digestión alcalina con NaOH al 1.25%, la mezcla se dejó hervir por 30 min, transcurrido el tiempo la mezcla se filtró y se realizaron nuevamente 3 lavados con agua caliente y uno más con 25 mL de etanol. Se retiraron los sólidos del filtro y se colocaron crisoles previamente llevados a peso constante, los crisoles se colocaron en una estufa para retirar el sobrante de alcohol, una vez seco se llevó a una mufla a 550 °C por 4 h, pasado el tiempo se colocó en un desecador durante 40 min y se pesó. El contenido de fibra se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{Fibracruda (\%)} = \frac{W1-W2}{PM} \cdot 100$$

Donde:

W1: Peso del crisol más residuo seco

W2: Peso del crisol más cenizas

PM: Peso inicial de la muestra desgrasada

6.4 Caracterización fisicoquímica de materias primas.

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

Para la determinación del índice de absorción de agua se ocupó la metodología descrita por (Anderson y otros, 1969). El cual se basa en la capacidad de la muestra para absorber agua. Este procedimiento se realizó por triplicado, en tubos de 50 mL se pesó 1g de muestra y se le agregaron 10 mL de agua destilada, la suspensión se mantuvo en agitación en un vórtex por 1 min y durante 30 min a temperatura

ambiente en un baño de agitación a temperatura ambiente, transcurrido el tiempo de agitación la suspensión se centrifugó a 3500 g por 15 min. El sobrenadante se decantó, colocándolo en una cápsula de aluminio previamente llevada a peso constante.

Los tubos que contenían el residuo sólido se pesaron, y con ayuda de la siguiente fórmula se calculó el IAA:

$$IAA = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}}$$

Para calcular el índice de solubilidad en agua, la cápsula de aluminio que contenía el sobrenadante se colocó en una estufa a 105 °C hasta llegar a sequedad, posteriormente las charolas con el residuo seco se colocaron en un desecador hasta que llegaron a temperatura ambiente y se pesaron. Para calcular el ISA se ocupó la siguiente fórmula:

$$ISA = \frac{\text{Peso de sólidos solubles (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 100$$

6.4.2 Índice de absorción de aceite

En tubos para centrífuga se pesó 1 g de muestra, posteriormente se adicionaron 10 mL de aceite vegetal puro de soya, se agitó en el vórtex por 1 min y posteriormente en un baño de agitación a temperatura ambiente por 30 min, se colocaron en la centrifuga durante 15 min a 3500 g, el sobrenadante se recuperó y el tubo con el sedimento se pesó. La capacidad absorción de aceite se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$IAAc = \frac{(m_2 - m_1)}{m}$$

Donde:

m_1 = masa del tubo vacío o masa inicial antes de la absorción (g).

m_2 = masa del tubo con la muestra y el aceite retenido

m = masa de la muestra seca (g)

6.4.3 Determinación de color

Para determinar el color de la muestra se basó en método de la AACC 14-22. Para lo cual, 50 g de harina se tamizaron a un tamaño de partícula de 250 μm , posteriormente la harina tamizada se colocó en portamuestras de plástico circular de 31 mm de diámetro y 7 mm de profundidad; las muestras se compactaron con ayuda de una regla, la muestra se cubrió con plástico transparente para que no tuviera contacto directo la muestra con el colorímetro y se obtuvieron los parámetros de color L, a y b.

6.4.4 Determinación de pH

Para la determinación del pH se utilizó un potenciómetro previamente calibrado; 1 g de muestra se colocó en un vaso de precipitado de 50 mL se agregaron 10 mL de agua destilada, la suspensión se mantuvo en agitación en una parrilla de agitación con ayuda de un agitador magnético hasta que la lectura de pH se mantuviera constante, la determinación se realizó por triplicado.

6.5 Caracterización funcional de materias primas

6.5.1 Obtención de extractos para fenoles

Par la obtención de los extractos, en un tubo eppendorf de 2 mL forrados con papel aluminio se pesaron 2 mg de muestra y se adicionaron 2 mL de etanol al 80%, la suspensión se llevó a agitación en un agitador vortex por 2 min; posteriormente se centrifugó por 15 min a 4500 g. Este procedimiento se realizó por triplicado, los sobrenadantes se colectaron y guardaron hasta su uso.

6.5.2 Determinación del contenido de fenoles totales

En tubos de ensaye se hicieron reaccionar 125 μL de extracto, 500 μL de agua destilada y 125 μL de Folin (1:10), se agitaron en el vortex y se dejaron reposar por 6 min posteriormente se añadieron 1250 μL de Na_2CO_3 al 7% y se le agregó 1mL de agua destilada, se dejó reposar durante 1 h, transcurrido el tiempo se determinó la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro, realizando tres determinaciones por muestra. La concentración de fenoles totales se calculó con ayuda de una curva patrón de ácido gálico de 0 a 100 ppm, una vez obtenidas las absorbancias se graficó cada una de las concentraciones contra su absorbancia, a los datos se les

realizó una regresión lineal para obtener a través de la ecuación de la recta la concentración en las muestras. Los resultados fueron expresados como mg equivalente de ácido gálico por gramo de muestra.

$$y=mx+b$$

$$y=\text{Absorbancia a 765 nm}$$

$$m=\text{Pendiente de la curva}$$

$$b=\text{Intercepto (normalmente cercano a 0)}$$

$$x=\text{Concentración de fenoles}$$

6.5.3 Determinación de antocianinas monoméricas mediante el método de diferencial de pH

Para la extracción de antocianinas de las muestras, en un tubo para centrífuga se colocó 1 g de muestra y 10 mL de etanol acidificado (85:15 v/v), los tubos se mantuvieron en agitación en un vortex por 1 min.; posteriormente en un tubo de ensaye se colocó 1 mL de extracto y 9 mL de solución buffer de cloruro de potasio pH 1, en un espectrofotómetro se determinó la absorbancia a 515nm y a 700nm; mismo procedimiento se realizó con el buffer de acetato de sodio pH 4.5. Una vez obtenidas las absorbancias a las diferentes longitudes de onda se obtuvo una sola absorbancia utilizando la siguiente ecuación:

$$A = (A_{\lambda_{\text{vis-max}}} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{\lambda_{\text{vis-max}}} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}$$

$$CA \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A * MW * DF * 1000)}{(E * 1)}$$

Donde:

CA: contenido de antocianinas

MW: peso molecular de la cianida-3-glucosido (449.2 g/mol)

ξ : coeficiente de absortividad molar de la cianida-3-glucosido (26,900)

DF: factor de dilución

7 Diseño de experimentos para la obtención de productos extruidos

Para el desarrollo de los productos extruidos y optimización del proceso se utilizó la metodología de superficie de respuesta mediante un diseño central compuesto rotatable. La metodología de superficie de respuesta analiza eficazmente múltiples procesos y optimiza parámetros para minimizar la experimentación (Pravitha y otros, 2021). Los factores probados fueron temperatura de la matriz de salida y concentración de polvo de jamaica. Las variables de respuesta en este estudio fueron el índice de expansión, densidad aparente, diferencia total de color, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), dureza, contenido de fenoles totales y contenido de antocianinas monoméricas. La temperatura del dado de salida vario de 120 a 160 °C; mientras que, la concentración de jamaica vario de 0 a 30%. La combinación de los niveles de los diferentes factores dio como resultado 8 tratamientos experimentales no centrales y 5 tratamientos centrales (Tabla 3).

7.1 Proceso de extrusión

Se utilizó un extrusor de laboratorio de un solo tornillo marca Brabender, modelo KE, con una relación L/D 19:25. El extrusor fue operado con una plasticorder Lab Station. El barril del extrusor estaba estriado y dividido en tres zonas de calentamiento mediante resistencia eléctricas con control de temperatura independiente. La temperatura del barril se mantuvo constante (zona 1: 70 °C, zona 2: 90 °C, zona 3: 110 °C); la temperatura del dado de salida varió de acuerdo al diseño de experimentos (**Tabla 3**). Las mezclas se ajustaron a una humedad del 18%, la velocidad de alimentación de las mezclas fue constante a 2.1 Kg/h, se utilizó un tornillo con una relación de compresión 1:3 a una velocidad de 160 rpm. Los productos extruidos obtenidos se dejaron enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se almacenaron en bolsas de polietileno para su posterior análisis.

Tabla 3. Diseño de experimentos central compuesto rotatable para la obtención de productos extruidos de maíz azul adicionados con polvo de cálices de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.).

Tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X1	X2	Temperatura (°C)	PCJ (%)
1	-1	-1	126	4.4
2	1	-1	154	25.6
3	-1	1	126	25.6
4	1	1	154	25.6
5	-1.414	0	120	15.0
6	1.414	0	160	15.0
7	0	-1.414	140	0.0
8	0	1.414	140	30.0
9	0	0	140	15.0
10	0	0	140	15.0
11	0	0	140	15.0
12	0	0	140	15.0
13	0	0	140	15.0

PCJ: polvo de cálices de jamaica.

8 Análisis de expandidos

8.1 Caracterización fisicoquímica

8.1.1 Índice de expansión

Para la determinación del IE los productos extruidos se cortaron en trozos de 3 cm de longitud, a los trozos se les determinó el diámetro en 3 puntos con ayuda de un vernier digital, el diámetro promedio se dividió entre el diámetro de interior del dado de salida del extrusor, se realizaron 20 determinaciones por tratamiento.

$$IE = \frac{\text{Diámetro del producto extruido (mm)}}{\text{Diámetro interior del dado de salida del extrusor (mm)}}$$

8.1.2 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente se ocupó la metodología de Wang y Col (1993). Se cortaron 20 piezas de aproximadamente 3 cm de largo (L), las muestras fueron pesadas (Pm), posteriormente se determinó su volumen. Con ayuda de la siguiente ecuación se calculó la DA.

$$DA = \frac{Pm}{\pi * (0.5D)^2 * (L)}$$

8.1.3 Diferencia total de color

Se determinó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 2.4.3

8.1.4 Índice de solubilidad en agua e índice de adsorción de agua

Se determinó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 2.4.1

8.1.5 Dureza

La dureza de los productos extruidos se determinó de acuerdo al método de la AACC (74-09.01, 2000), se basa en la medición de la dureza de alimentos utilizando una prueba de corte. La dureza se determinó con ayuda de un texturómetro universal TA instrument, modelo TA-TX-2 plus en modo de compresión provisto de una sonda de corte Warner Bratzler con ranura en V; la velocidad de descenso de la sonda fue a una velocidad de 3 mm/s. La prueba se realizó en 20 muestras por tratamiento. Los resultados se expresaron en N.

8.2 Determinación de las propiedades funcionales de productos extruidos

8.2.1 Determinación del contenido de fenoles.

Se determinó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 3.2.1

8.2.2 Determinación del contenido de antocianinas.

Se determinó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 3.2.1

9 Análisis Estadístico

Los datos obtenidos de cada corrida experimental se analizaron en el software design expert versión 13 (StatSoft Ease, Minneapolis) mediante un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar el efecto de los factores sobre las respuestas evaluadas; así como, su significancia. Los datos obtenidos se ajustaron a un modelo polinomial de segundo orden y mediante un análisis de regresión lineal múltiple se obtuvieron los coeficientes de regresión para cada una de las respuestas evaluadas y por último se obtuvieron gráficos de superficie de respuesta.

10 Resultados y discusión

10.1 Caracterización de la materia prima

En la tabla 4 se presentan los valores promedio y desviación estándar del largo, ancho, espesor, peso de 1000 granos, peso hectolítrico, flotabilidad, impurezas y granos quebrados del maíz azul. Las características físicas de los granos brindan información de la calidad de los mismos y su posible uso. Los valores del peso

hectolítrico, largo, ancho y espesor son similares a los reportados por (Reyes, 2023), los cuales fueron utilizados para la elaboración de una botana de tercera generación. De acuerdo a los valores obtenidos del peso hectolítrico y a la NMX-FF-034-SCFI-2020, los granos del maíz azul utilizados en el presente estudio son de tamaño mediano. De acuerdo al análisis físico de los granos de maíz azul pueden ser utilizados en elaboración de tortillas (Jiménez y otros, 2012).

En la tabla 5 se presenta la relación de componentes estructurales de los granos de maíz azul en porcentaje; los datos muestran que el endospermo del grano de maíz representa el mayor porcentaje del peso del grano; mientras que, el pedicelo es el componente minoritario, lo cual concuerda con lo reportado por (Reyes, 2023), (Arriaga, 2019) y la FAO.

En la tabla 6 se presenta el análisis químico proximal del maíz azul y de los cálices de jamaica, en la tabla se observa que el maíz azul presenta el mayor contenido de lípidos y proteínas, pero el menor contenido de fibra y cenizas, (García y otros, 2020) reporta valores para cenizas en maíz de 1.29%, los cuales están por encima de encontrado en el presente trabajo. Ortiz (2006), reporta valores de 9.73 ± 0.72 para proteína, los cuales están por debajo por los reportados en el presente trabajo. En el caso de lípidos (Chan y otros 2020) reportan valores de 5.01 ± 0.04 a 7.07 ± 0.15 y para fibra (Gámez y otros 2021) reportan valores de 0.72 ± 0.04 para fibra soluble en Maseca azul. Ortiz (2006) menciona que las diferencias en la composición química proximal pueden deberse a la variedad de maíz con la que se trabaja; ya que algunas variedades presentan un endospermo harinoso y contiene menor contenido proteico.

Tabla 4. Características físicas de los granos de maíz azul.

Parámetros	Media
Largo (mm)	14.0 ± 1.26
Ancho (mm)	8.3 ± 1.56
Espesor (mm)	5.5 ± 1.13

Peso de 1000 granos (g)	301.1 ± 21.77
Peso hectolítrico (Kg/hL)	69.3 ± 2.01
Flotabilidad %	2.9 ± 0.12
Impurezas (g)	5.4 ± 0.31
Granos quebrados (g)	14.5 ± 0.37

Tabla 5. Relación de componentes estructurales del grano de maíz azul.

Componente	Media (%)
Endospermo	81.5 ± 1.67
Germen	6.6 ± 2.68
Pericarpio	5.0 ± 1.03
Pedicelo	1.7 ± 0.23

Tabla 6. Análisis químico proximal, contenido de antocianinas y propiedades fisicoquímicas de los cálices de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) y maíz azul (*Zea mays* L.) utilizados en el desarrollo de productos extruidos directamente expandidos.

	Jamaica	Maíz azul
Humedad (%)	8.9 ± 0.17	10.3 ± 0.54
Cenizas (%)	7.1 ± 0.13	1.1 ± 0.12
Grasa (%)	1.5 ± 0.60	7.8 ± 1.50
Proteína (%)	2.8 ± 0.15	11.0 ± 1.38
Fibra (%)	8.4 ± 0.78	0.9 ± 0.07
Antocianinas (mg/L)	420.2 ± 4.56	129.8 ± 0.63

IAA (g.a.a. /g muestra)	2.5 ± 0.17	1.8 ± 0.11
ISA (%)	37.3 ± 3.68	6.7 ± 0.11
pH	1.9 ± 0.01	6.6 ± 0.04

g.a.a: gramos de agua absorbida.

Los cálices de jamaica presentaron el mayor contenido de antocianinas; así como, mayor valor de IAA e ISA y menor valor de pH, esto puede deberse a que tiene un mayor contenido de fibra, en especial pectinas, entre otros polisacáridos hidrofílicos, los cuales son capaces de formar puentes de hidrógeno, aumentando su capacidad de retención (Duarte y otros, 2016). En cuanto a los valores de pH, la jamaica tiene un pH bajo gracias a su mayor contenido de ácidos orgánicos (Da Costa y otros, 2014), mientras que el maíz azul presenta uno mayor debido a alto contenido de almidón (Serna, 2010).

10.2 Caracterización de los extruidos

10.2.1 Índice de expansión (IE)

El índice de expansión es la medida de cuánto se expande un material después de pasar por el dado de un extrusor, es uno de los indicadores claves para determinar la calidad de una botana, se expresa como la relación entre el diámetro de la sección transversal del extruido y el diámetro de la matriz. La temperatura, presión, contenido de humedad, composición de la materia prima y fuerza de cizalla son factores que pueden afectar significativamente la expansión (Mäkilä y otros, 2014). La ecuación cuadrática obtenida del modelo cuadrático $IE = -0.618 + 0.056X_1 - 0.067X_2 + 0.0007X_{1,2} - 0.0003X_1^2 - 0.001X_2^2$, el modelo presentó una R^2 ajustada de 0.71, la prueba de falta de ajuste fue no significativa y una precisión de adecuación de 7.1.

Los valores de índice de expansión de los productos extruidos obtenidos se encuentran en un rango de 1.84 a 2.36. (Rivera y otros, 2024) reportaron valores de índice de expansión entre 1.40 a 2.64 en botanas extruidas a base de maíz morado y residuos de cálices de jamaica.

En la **Figura 1** se presenta el gráfico del IE, el gráfico muestra que el mayor IE se obtiene a concentraciones de jamaica entre 0 y 15%, y temperaturas entre 120 y 133 °C. En concentraciones superiores de cálices de jamaica al 15% hay una disminución en el IE, la disminución en el IE al incrementar la concentración de cálices de jamaica, se atribuye a que el polvo de jamaica aporta fibra, inhibiendo la expansión debido a rupturas en las paredes celulares y a un efecto de dilución; ya que al incrementar la concentración de polvo de jamaica disminuye la proporción de harina de maíz azul y por tanto hay menor contenido de almidón (Jin y otros, 2018). Cuando el contenido de almidón es menor y el de fibra mayor los productos obtenidos tienden a ser duros, debido a una ruptura de paredes celulares, evitando que las burbujas de aire se expandan al máximo (Pérez y otros, 2017). La reducción de la expansión es ocasionada por la presencia de fibra insoluble; ya que, tiende a retener agua durante la extrusión, ocasionando una reducción del vapor. Cuando incrementan los niveles de almidón, contribuyen a la unión y durabilidad del producto extruido, por encima de 65% de este se pueden producir extruidos pegajosos (Pérez y otros, 2017).

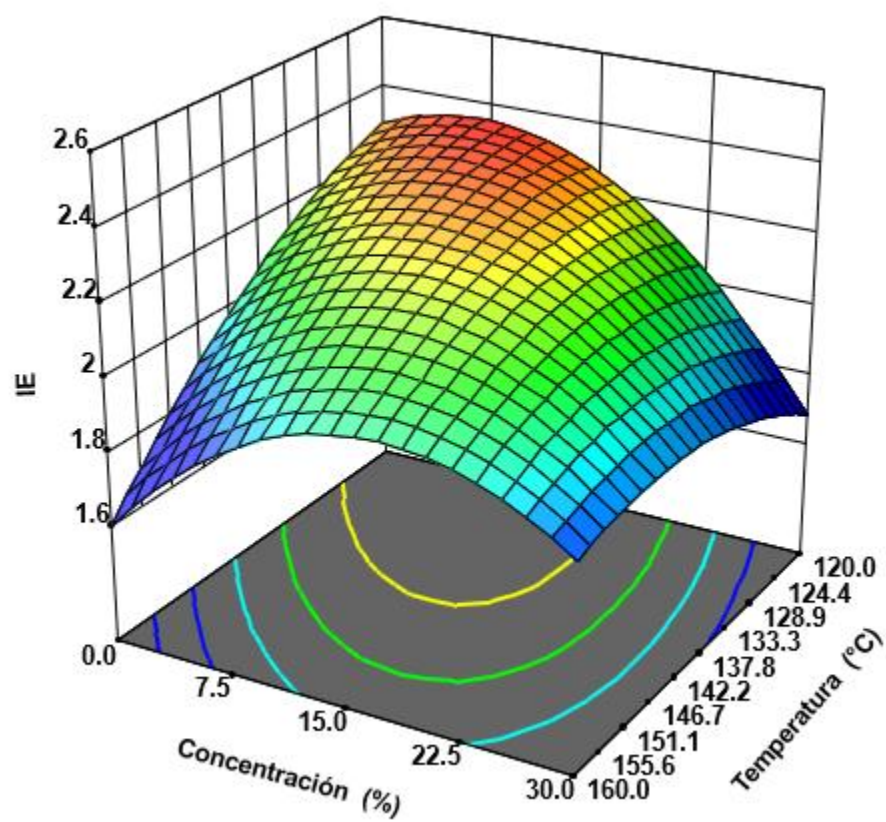


Figura 1. Efecto de la concentración de polvo de cálices de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre el índice de expansión (IE) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.2 Densidad Aparente (DA)

En la **Figura 2** se muestra el gráfico de superficie de respuesta para la DA, en el gráfico se puede observar un comportamiento inverso al índice de expansión. Este comportamiento se debe a que la densidad aparente es inversamente proporcional al índice de expansión. La menor DA se obtuvo en productos extruidos con mayor IE.

Los datos experimentales de DA se analizaron mediante regresión lineal múltiple y se ajustaron a un modelo de segundo orden obteniendo el siguiente modelo $DA = 3234.43 - 45.53X_1 + 27.10X_2 - 0.42X_{1,2} + 0.19X_1^2 + 0.84X_2^2$, el modelo ajustado presentó un valor de R^2 ajustada de 0.66 y una precisión adecuada de 26.68. En el caso de las botanas la densidad se considera un parámetro importante para determinar su calidad, la densidad está inversamente relacionada con el grado de expansión, cuando el IE es bajo, la DA es alta (Neder y otros, 2023). Los valores de DA se encuentran en un rango de 155.19 a 666.25 Kg/m³. Carvajal (2018) reportó valores de densidad aparente en un rango de 260 a 580 Kg/m³ en una botana extruida de maíz, frijol y camote; mientras que, (Neder y otros 2023) reportan valores de densidad aparente de 1282.06 a 1329.4 Kg/m³ en botanas extruidas de maíz azul con diferentes concentraciones de frijol. El incremento en la densidad aparente se atribuye a la presencia de fibra. Se ha reportado que la fibra absorbe humedad y por consecuencia afecta la expansión y la densidad aparente (Pérez y otros, 2017). Al comparar los resultados IE y DA, podemos observar que los valores de densidad aparente son mayores, por lo tanto, el índice de expansión es menor. Barrera (2018) reportó que botanas extruidas de maíz con cebada presentaron densidad aparente más baja que las de este trabajo de investigación.

De acuerdo con (Cuj, 2017) cuando un producto tiene un bajo IE su DA es mayor, debido a que su estructura es más compacta, (Tokarczyk y otros, 2025) reportaron que la DA está inversamente relacionada con la temperatura, declara que en botanas fritas a temperaturas altas la DA es significativamente menor en comparación con las temperaturas bajas, valores bajos de DA se relaciona con una mayor crocancia, el producto se vuelve menos compacto y más poroso, la

temperatura aumenta el sobrecalentamiento del agua en el proceso de extrusión, provocando la formación de burbujas, una menor viscosidad y una menor DA.

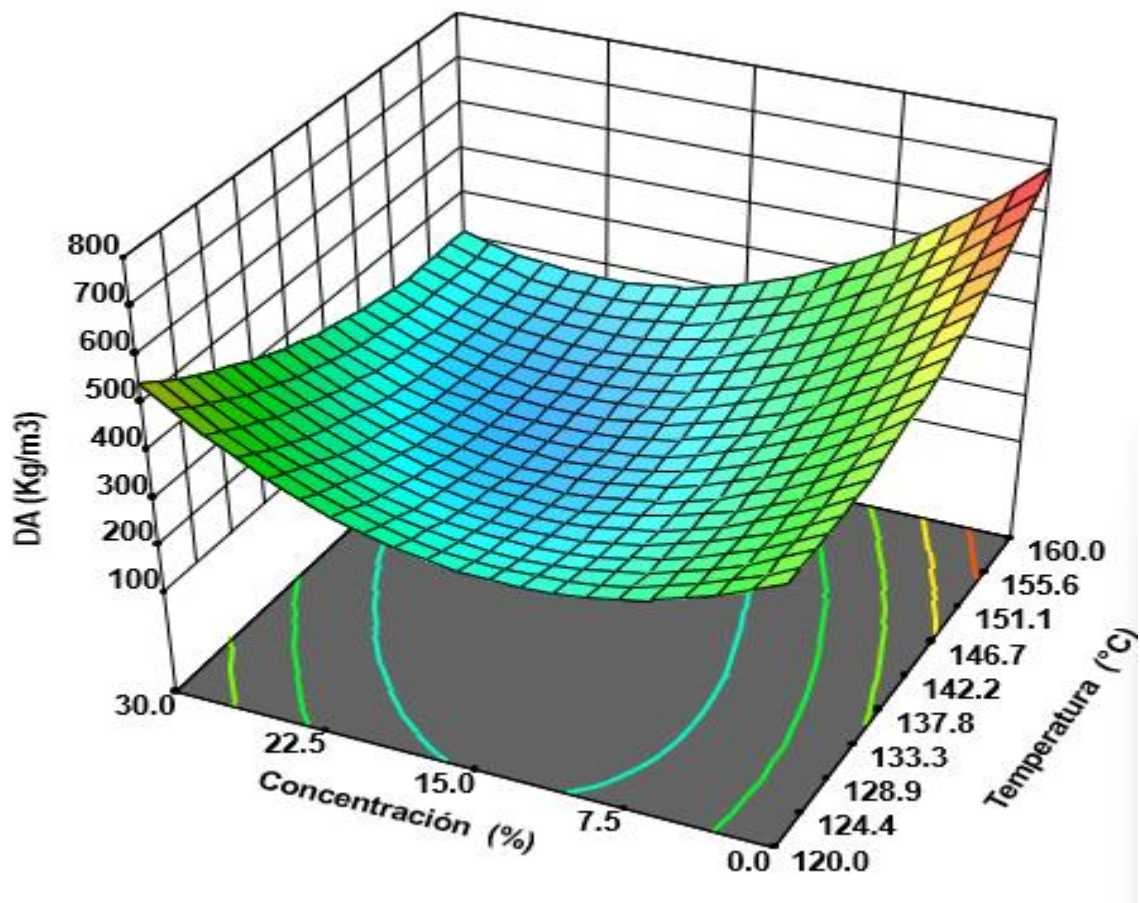


Figura 2. Efecto de la concentración de polvo de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre la densidad aparente (DA Kg/m³) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.3 Dureza

La dureza se puede definir como la fuerza máxima que soporta el extruido antes de romperse, es considerada uno de los parámetros más importantes en el sentido de la calidad y aceptabilidad, la dureza esta inversamente relacionada con la expansión y directamente relacionada con la DA, valores mayores de índice de expansión genera bajos valores de dureza (Neder y otros, 2023). Un alimento crujiente se caracteriza por poseer una estructura rígida no deformable (Meza, 2011).

El modelo cuadrático ajustado para la dureza presentó un valor de R^2 ajustada= 0.71 y una precisión adecuada de 23.16. El modelo explica el comportamiento del 71% de los datos experimentales, el modelo de regresión para la dureza es descrito por la siguiente ecuación; $D = -3.46381 + 0.570202X_1 - 3.49828X_2 + 0.003708X_{1,2} - 0.002198X^2 + 0.073743X^2$.

En la **Figura 3** se muestra el efecto de la temperatura del dado de salida (°C) y concentración de cálices de jamaica sobre la dureza, en el gráfico se observa que cuando disminuye la concentración de polvo de cálices de jamaica, la dureza aumenta y no hay un cambio significativo con respecto a la temperatura.

Los valores de dureza obtenidos en los productos extruidos se encuentran en un rango de 2.3 a 60.0 N, se observa que los productos con mayor fuerza de fractura son los que tiene concentraciones de polvo de cálices de jamaica bajos o nulos, la dureza y el carácter crujiente de un extruido se relaciona con la expansión, el tamaño y número de poros en la matriz del almidón (Castro, 2018).

Rivera y otros (2024) reportaron que a elevadas concentraciones de cálices de jamaica disminuyen la firmeza, este efecto se atribuye al contenido de jamaica, pues hay una retención mayor de humedad, (Barrera, 2018) reportó valores de dureza en un rango de 22.26 a 63.71 N en una botana expandida adicionada con cebada con valores similares de dureza a los reportados en el presente trabajo. La dureza esta inversamente relacionada con la expansión del mismo, varios autores reportan que al aumentar el contenido de fibra la dureza aumenta; sin embargo, podemos observar que en este caso sucede lo contrario, esto se le puede atribuir a los compuestos que tiene la jamaica, pues este parámetro no solo depende de la fibra. La extrusión aumenta la solubilidad y disponibilidad de la fibra al romper paredes

celulares, esta fibra es rica en pectina y tiende a formar geles, actuando como plastificante y reduciendo la rigidez estructural (Mohammed y otros, 2024)

Durante la extrusión al aumentar la temperatura puede afectar la reología de la fusión, la presión y vaporización, el almidón extruido a temperaturas altas (mayores a 120 °C) da origen a estructuras celulares más gruesas (Nikinmaa y otros, 2023). Una temperatura elevada conduce a la reducción en la viscosidad, favoreciendo la expansión (Nyström y otros, 2023); sin embargo, una mayor humedad reduce la viscosidad o puede aumentar el colapso de las burbujas después de la expansión.

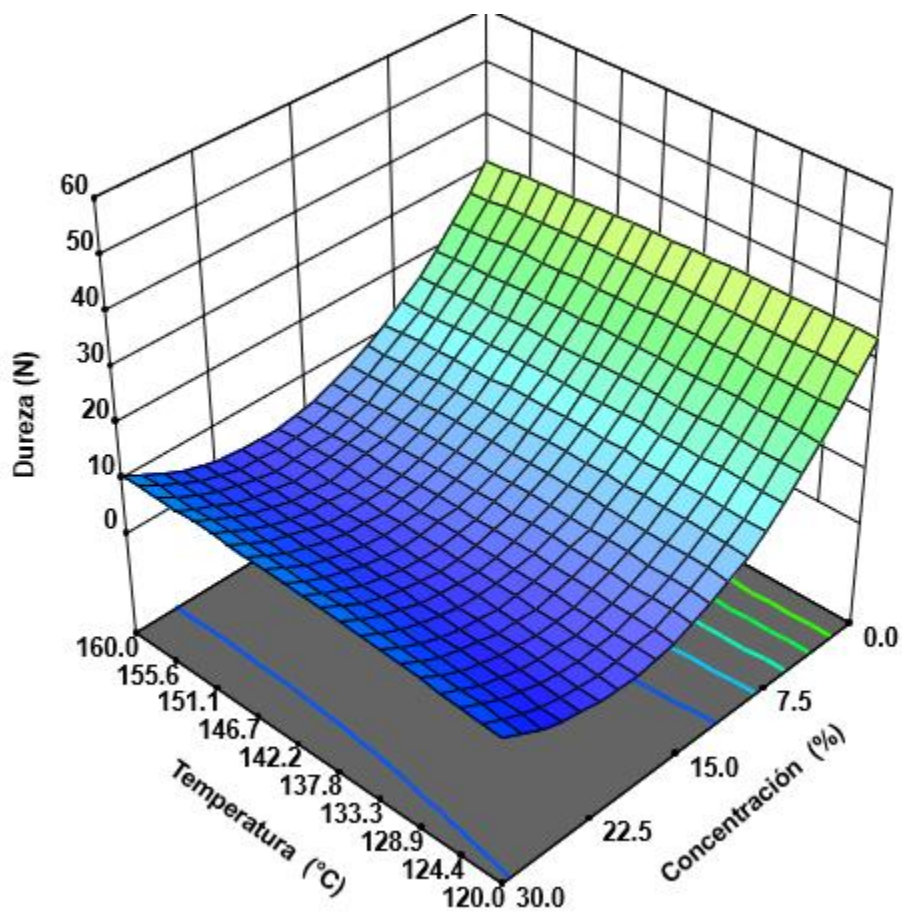


Figura 3. Efecto de la concentración de polvo de cálices de jamaica (%) y temperatura (°C) del dado de salida sobre la dureza (N) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.4 Índice de absorción de agua (IAA)

El Índice de absorción de agua es cuando moléculas de agua hidratan proteínas; así como, almidón gelatinizado y otros ingredientes. El proceso de hidratación se lleva cabo cuando el almidón gelatinizado y las proteínas crean interacciones hidrofílicas y puentes de hidrogeno con las moléculas de agua (Awuchi y otros, 2019). Durante la extrusión el almidón es sometido a esfuerzos de corte, humedad y temperatura destruyendo la estructura granular del mismo, por los que se exponen grupos hidrofílicos favoreciendo la interacción con el agua (Ipiales, 2024).

En el caso del IAA el modelo de regresión ajustado, está determinado por el siguiente modelo polinomial de segundo orden; $IAA = -10.494 + 0.211X_1 + 0.089X_2 - 0.001X_{1,2} - 0.0007X_1^2 + 0.000739X_2^2$

donde X_1 es la temperatura de la matriz de salida y X_2 es la concentración de cálices de jamaica. De acuerdo al análisis de varianza (ANDEVA), el modelo de regresión ajustado para el índice de absorción de agua es significativo con un valor del coeficiente de determinación ajustado de $R^2=0.81$ y precisión adecuada de 18.95, el modelo no presenta falta de ajuste; lo que indica que el modelo seleccionado es válido para predecir el IAA.

Los valores experimentales obtenidos para los diferentes tratamientos probados se encuentran entre 3.3 a 5.2 g de agua absorbida/g de muestra. El gráfico de superficie de respuesta (**Figura 4**) para la capacidad de absorción de agua muestra que los valores disminuyen conforme incrementa la concentración de cálices de jamaica; siendo el tratamiento con 0% de cálices de jamaica el que presentó el mayor valor de absorción de agua, esto se debe a que su contenido es solo maíz, por lo que hay una mayor cantidad de grupos hidrofílicos (almidón y proteína) que puedan interaccionar con el agua; en el gráfico se muestra un incremento en la capacidad de absorción de agua conforme incrementa la temperatura de 120 a 140 °C, aproximadamente; un incremento en la temperatura del dado de salida pudo favorecer la pérdida de estructuras nativas, provocando una mayor gelatinización y desnaturalización de proteínas, y por lo tanto un mayor IAA.

Ipiales (2024) y Barrera (2018) reportaron valores de IAA de 3.91 a 5.01 para bocadillos extruidos a base maíz, lenteja y yuca, y de 2.06 a 7.25 g gel/g muestra

en una botana expandida por extrusión adicional con cebada, respectivamente. Los valores reportados por los autores mencionados anteriormente son similares a los obtenidos en el presente trabajo de investigación. Ruiz-Rubio (2019) menciona una relación entre el IAA, el nivel de gelatinización y dextrinización del almidón durante el proceso de extrusión; cuando la gelatinización incrementa aumenta la capacidad de absorción de agua. Este parámetro se ve afectado por diversos factores de procesamiento y formulación; así mismo, juega un papel importante en la calidad del producto.

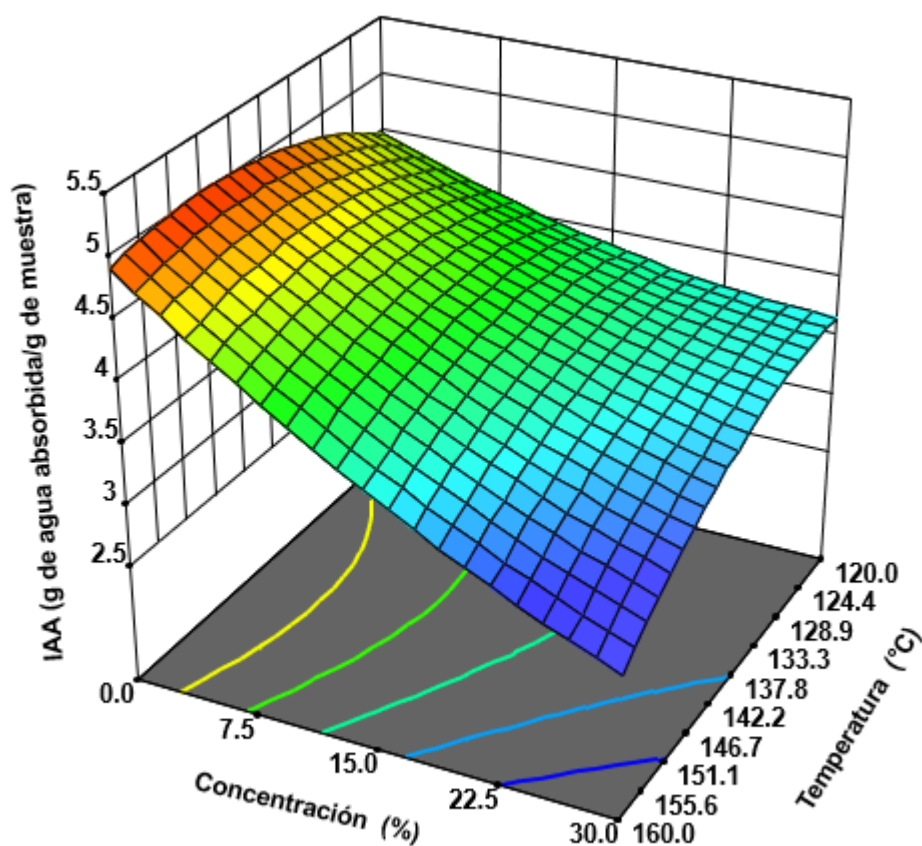


Figura 4. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el índice de solubilidad de agua IAA (g de agua absorbida/ g de muestra) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.5 Índice de solubilidad de agua (ISA)

El ISA es un indicador del nivel del daño ocurrido en el almidón durante la extrusión, se ha relacionado con la cantidad de sustancias solubles presentes en los alimentos, indica el grado de asociación entre los polímeros de almidón amilosa y amilopectina (Meza, 2011). Una solubilidad elevada de un alimento podría estar relacionada con una mayor digestibilidad, y podría ser excelente para alimentos o fórmulas infantiles (Awuchi y otros, 2019). El modelo de regresión de segundo orden ajustado al IAA fue significativo con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9392$ y precisión adecuada de 32.20. La ecuación de regresión para el IAA fue la siguiente; **ISA = -21.506 + 0.432X₁ + 2.48X₂ - 0.004X_{1,2} - 0.002X₁² - 0.05X₂².**

Los valores de ISA de los diferentes tratamientos experimentales se encuentran en un rango de 6.16 a 26.17%. El gráfico de superficie de respuesta para el ISA (**Figura 5**), muestra que a mayor concentración de cálices de jamaica entre 15 a 30% y temperaturas de extrusión entre 120 a 133 °C hay un mayor índice de solubilidad en agua. Gutiérrez y otros (2017) reportaron valores de 11.31 a 12.98% en una botana extruida obtenida a partir de harina de maíz morado, harina de chícharo y salvado de avena, los cuales son menores a los reportados en el presente trabajo. De igual manera mencionan que los valores de ISA pueden variar entre 16 a 46% en productos extruidos con alto contenido de almidón y de 11.8 a 35% en extruidos donde el contenido de almidón es bajo y el contenido de proteína es elevado. Suarez y otros (2016) reportaron que a mayor temperatura hay menor degradación del almidón; lo que significa, que hay un menor número de moléculas solubles a altas temperaturas. Durante la extrusión el almidón absorbe agua, se hincha, se rompen los enlaces de hidrógeno y se libera amilosa ocasionando la pérdida de su estructura cristalina, estos fenómenos favorecen la solubilidad en agua, pues el almidón gelatinizado es más soluble; sin embargo, igual puede ocurrir la dextrinización y generación de péptidos donde se generan moléculas pequeñas y provoca que aumente aún más el ISA (Ipiates, 2024).

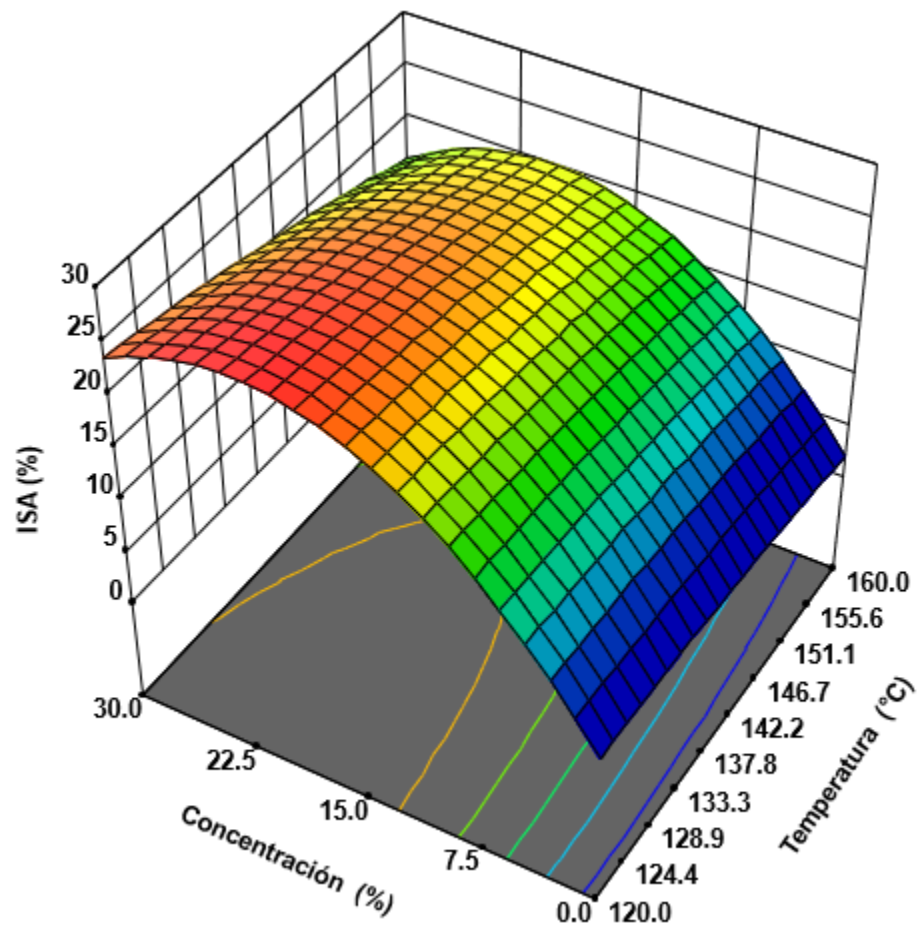


Figura 5. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el índice de solubilidad ISA (%) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.6 Determinación de pH.

El modelo de regresión cuadrático ajustado a los datos experimentales de pH fue significativo lo que indica que la ecuación generada es válida para predecir la respuesta. El valor del coeficiente de determinación ajustado fue de $R^2=0.9357$ y la precisión adecuada de 32.19. La ecuación de regresión para el pH bajo las condiciones de temperatura y la concentración de cálices de jamaica probados está dada por la siguiente ecuación de regresión; $\text{pH} = -4.990 + 0.154X_1 - 0.356X_2 + 0.0007X_{1,2} - 0.0006X_1^2 + 0.006X_2^2$.

Los valores de pH obtenidos en los diferentes tratamientos experimentales se encuentran en un rango de 2.62 a 6.09. En el gráfico de superficie de respuesta para el pH (**Figura 6**) se observa que conforme incrementa la concentración de cálices de jamaica el pH disminuye; es decir se obtienen productos más ácidos, mientras que se aprecia que la temperatura no presenta efecto sobre el pH. En el caso del maíz azul Anaya y otros (2024) reportaron valores de pH entre 6.32 a 6.34 en harinas de maíz; mientras que, para jamaica Galicia y otros (2008) reportaron valores que van de 2.15 a 3.03 en extractos de Jamaica. La disminución de pH al incrementar la concentración de cálices de jamaica se debe a la presencia de ácidos orgánicos y antocianinas (Hirth y otros, 2014).

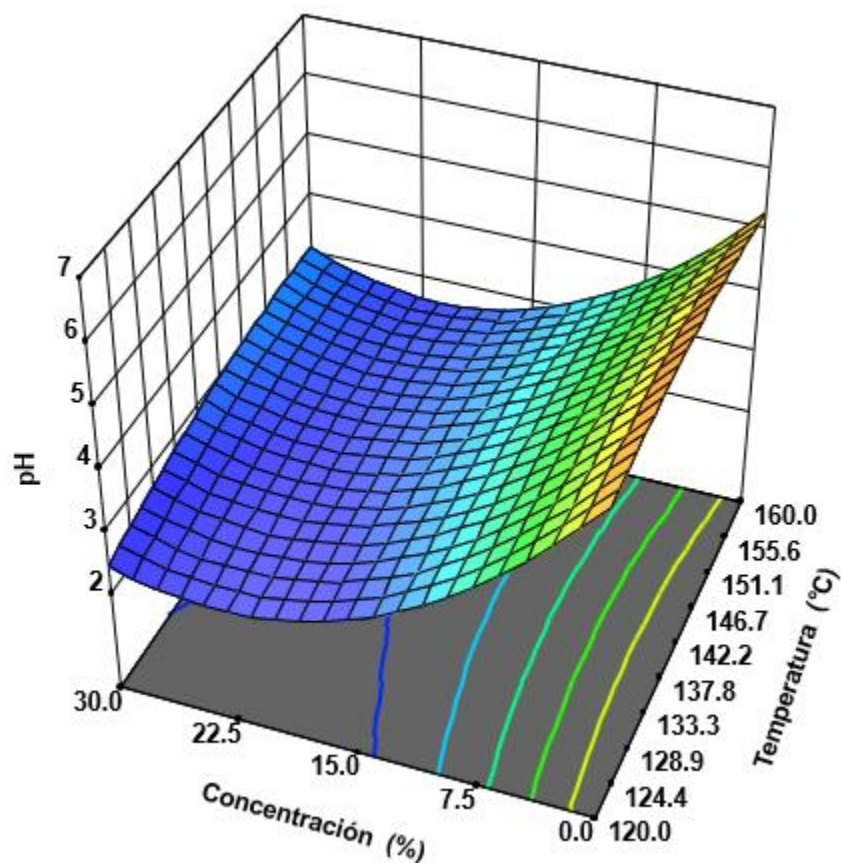


Figura 6. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el pH de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.7 Diferencial de color (ΔE)

La diferencia total de color indica el grado de cambio de color general de una muestra en comparación con los valores iniciales de L, a y b antes del procesamiento (Chakraborty y otros, 2014), en este caso los valores de las mezclas antes de ser extruidas. Los consumidores tienen una preferencia por los productos de apariencia atractiva, el color es considerado un parámetro de calidad (Badui, 2006).

En la Figura 7 se puede observar que el color se ve afectado por la temperatura de extrusión, la humedad, dado que las proteínas y los compuestos fenólicos experimentan degradación térmica y reacciones de Maillard durante la extrusión (Hernández y otros, 2025).

El modelo cuadrático ajustado para esta respuesta fue significativo, con un coeficiente de determinación $R^2=0.38$ y una precisión adecuada de 7.20. Aunque el modelo ajustado es significativo, la R^2 de 0.38 indica que la curvatura de segundo grado no logra explicar la mayor parte de la variabilidad de los datos, por lo que al utilizar este modelo para realizar predicciones se tendrá un elevado margen de error.

El modelo de regresión para la diferencia de color es descrito por la siguiente ecuación; $\Delta E = -183.999 + 3.363X_1 - 2.804X_2 + 0.015X_{1,2} - 0.013X^2 + 0.013X^2$.

Los valores experimentales de ΔE se encuentran en el rango de 7.14 a 38.50. En el gráfico de superficie de respuesta se observa que conforme incrementa el contenido de cálices de jamaica el diferencial de color disminuye. Hernández y otros (2025) menciona que el color del producto final depende de la formulación y parámetros de procesamiento, debido a que los azúcares y proteínas pueden reaccionar a altas temperaturas y promover el pardeamiento enzimático, dando como resultado un oscurecimiento en el producto terminado (Mathad y otros, 2025).

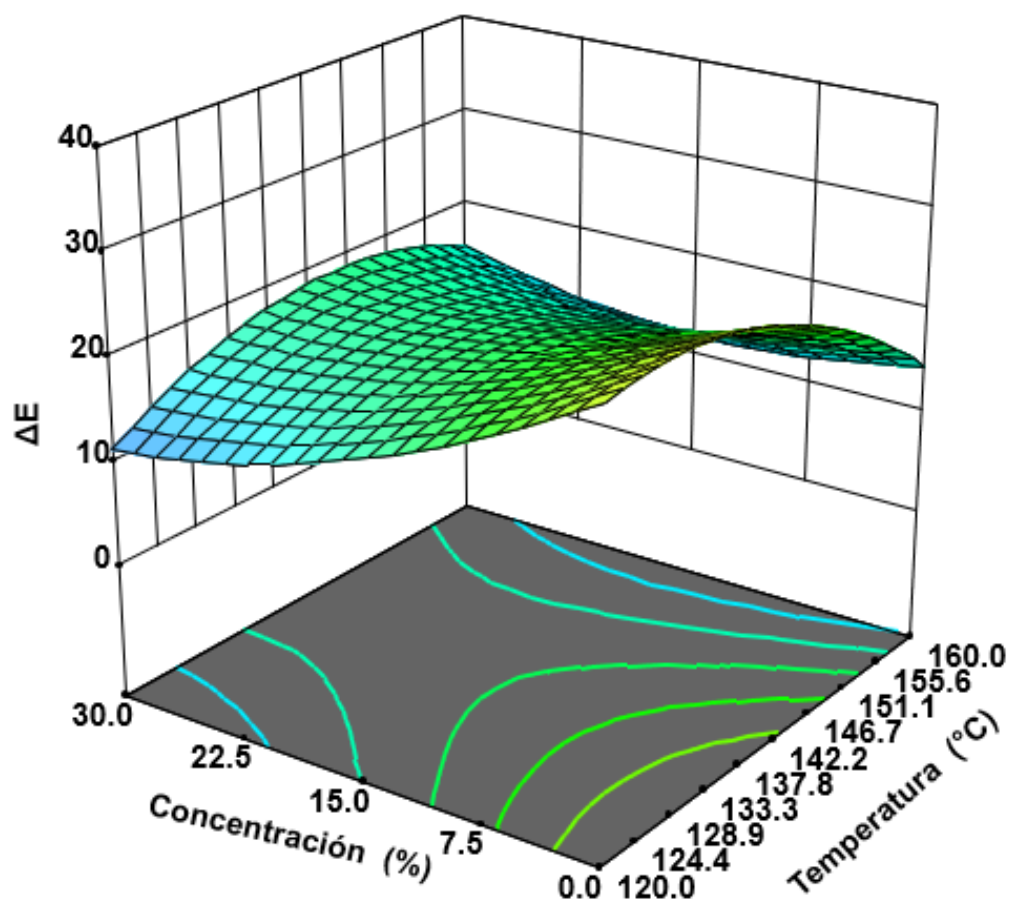


Figura 7. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre el diferencial de color ΔE de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.8 Contenido de fenoles totales (CFT)

En la **Figura 8** podemos observar que el contenido de fenoles es mayor en concentraciones intermedias de cálices de jamaica (15-22.5%) en el rango de temperaturas probadas. El modelo cuadrático ajustado para el contenido de fenoles totales es significativo con una $R^2=0.8632$, una precisión adecuada de 18.89 y no presenta falta de ajuste, por lo cual puede utilizarse para navegar en el espacio.

Los valores de fenoles totales se encuentran en un rango de 427.26 a 984.09 mg EAG/g. La ecuación de regresión está dada por la siguiente ecuación; **CFT**= - 5345.708 + 81.831 X_1 + **54.174** X_2 - 0.027 $X_{1,2}$ - **0.289** X_1^2 - **1.382** X_2^2 .

El contenido fenólico en los alimentos y la actividad antioxidante son afectados por procesos térmicos, disminuyendo hasta en un 50% durante el proceso de extrusión (Bravo, 2021). El contenido de fenoles totales disminuye por la polimerización y descomposición de compuestos fenólicos termolábiles, el contenido de fenoles totales en el presente estudio está directamente influenciado por la concentración de cálices de jamaica.

Torres (2016) reporta que la gelatinización del almidón debido a la temperatura impide la difusión de los compuestos al exterior, protegiendo a los compuestos sensibles al calor. A altas temperaturas muchos compuestos fenólicos se hidrolizan y oxidan fácilmente, el uso de altas temperaturas incrementa la probabilidad de oxidación de los fenoles (Korkerd y otros, 2015). Durante el proceso de extrusión se ha reportado un incremento en el contenido de compuestos fenólicos debido a una liberación por efecto de la temperatura de extrusión y velocidad de cizallamiento del tornillo (Saheed y otros, 2023).

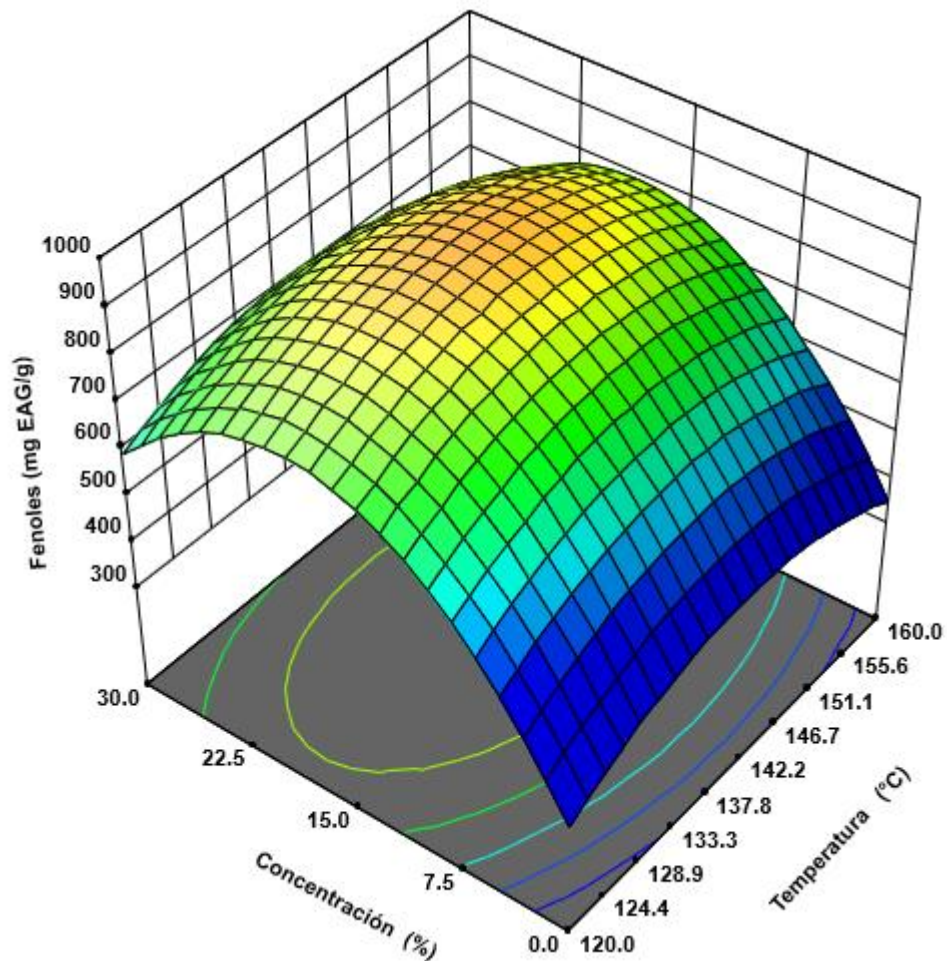


Figura 8. Efecto de la concentración de cálices de jamaica (%) y la temperatura (°C) sobre el contenido de fenoles (mg EAG/g) en productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.2.9 Contenido total de antocianinas (CTA)

El modelo de regresión cuadrático ajustado al contenido total de antocianinas es significativo con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$ y una precisión adecuada de 17.98. La ecuación de regresión para la cuantificación de antocianinas bajo las condiciones de temperatura y concentración de cálices de jamaica probadas fue la siguiente; **CTA**= $-4613.840 + 71.368X_1 - 16.818X_2 + 0.127X_{1,2} - 0.263X_1^2 + 0.168X_2^2$.

En la **Figura 9** se puede observar que conforme aumenta la concentración de cálices de jamaica incrementa el contenido de antocianinas. El contenido de antocianinas es mayor en la jamaica que en el maíz, el rango de estas va de 126.35-381.29 mg/Kg, la mayor cuantificación de estas se puede ver que fue a temperaturas de 130-150 °C y concentración de cálices de jamaica de 30%. Las antocianinas son compuestos sensibles a luz, oxígeno, pH, temperatura, actividad de agua, entre otros, estos daños pueden ser causados por la fuerza de cizallamiento y calor durante el proceso de extrusión (Neder y otros, 2023). Los procesos térmicos son métodos pueden afectar la estabilidad de las antocianinas y causar la polimerización de las mismas, produciendo un oscurecimiento indeseable (Sinela, y otros, 2016). Durante el procesamiento térmico las antocianinas son destruidas por efecto del calor, cuando la temperatura aumenta se pierde una molécula de azúcar en la posición 3 y como consecuencia la ruptura de un anillo y se forman chalconas incoloras (Rafael y otros, 2023).

Las harinas, frutos secos, con mayor concentración de antocianinas presentan una pérdida aparente aproximadamente del 90% de los pigmentos durante la extrusión, la alta velocidad y la temperatura del tornillo son los factores de extrusión que afectan los polifenoles y antocianinas de los alimentos extruidos descaboxilación. (Bravo, 2021).

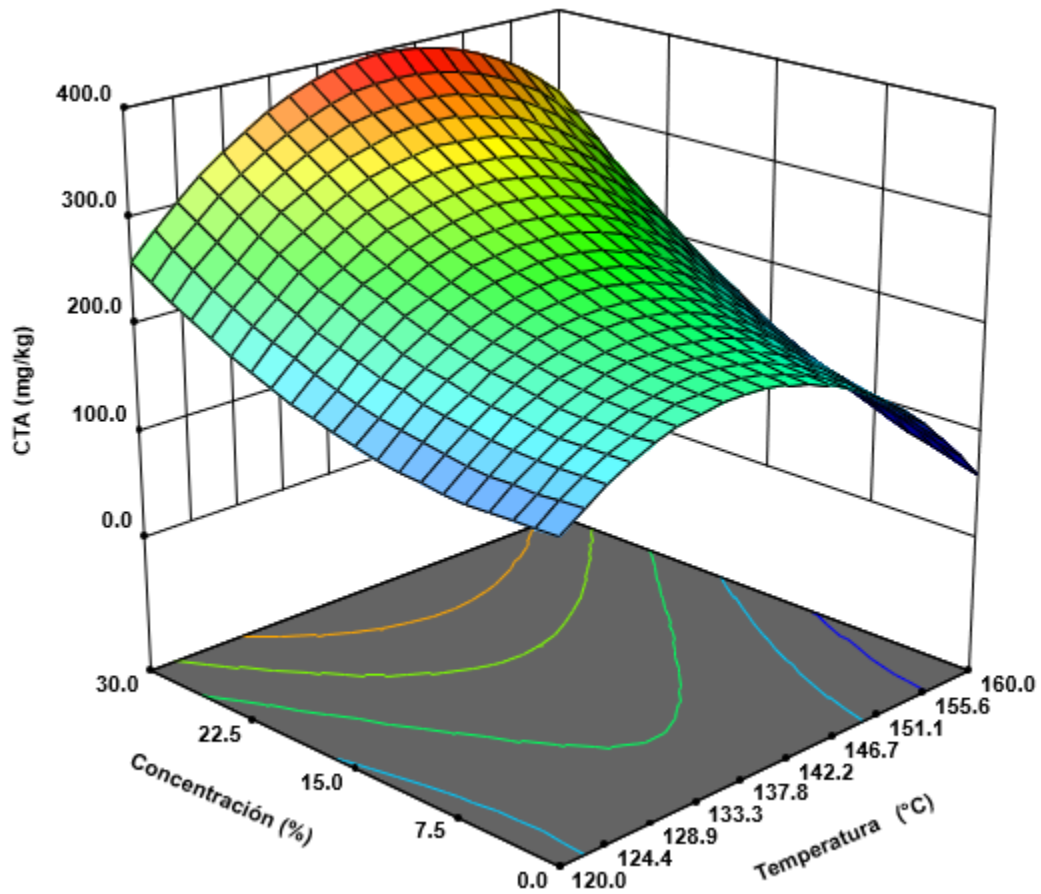


Figura 9. Efecto de la concentración (%) y la temperatura (°C), sobre la cuenta total de antocianinas CTA (mg/Kg) de productos extruidos directamente expandidos utilizando harina de maíz azul.

10.3 Optimización del proceso de extrusión para la obtención de productos extruidos directamente expandidos a partir de maíz azul y polvo de cálices de jamaica

La optimización fue realizada mediante el método de mínimos y máximos utilizando la función de deseabilidad basada en modelos matemáticos derivados de un diseño de experimentos. El programa transforma múltiples metas en una solo función objetivo y busca la combinación ideal de los factores probados. Cuando se utilizan múltiples respuestas para la optimización el software combina las deseabilidades individuales de cada respuesta en una deseabilidad global.

Para encontrar las mejores temperaturas del dado de salida y concentraciones de polvo de cálices de jamaica para la obtención de productos extruidos a base de maíz azul se utilizaron las respuestas contenido de fenoles totales, contenido de antocianinas e índice de expansión. La optimización se realizó con el programa estadístico Design Expert 13.0. Las condiciones de procesamiento predichas por el programa fueron 124 °C de temperatura del dado de salida y 13% de concentración de polvo de cálices de jamaica con una deseabilidad de 0.82. Los valores predichos para las condiciones óptimas fueron IE=2.31, CFT=789.6 mg EAG/g y CTA=200 mg/Kg. Las condiciones óptimas predichas por el modelo se validaron experimentalmente, los datos experimentales obtenidos se presentan en la tabla siguiente. Se realizó una comparación de medias mediante el método de Fisher LSD no encontrando diferencias estadísticas significativas entre el valor predicho y el valor experimental para el IE.

Tabla 7. Valores experimentales obtenidos de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz azul adicionados con polvo de cálices de jamaica obtenidos bajos las condiciones óptimas de procesamiento.

N°	IE	Fenoles	Antocianinas
1	2.385	136.416	171.364
2	2.169	122.079	156.78
3	2.230	146.452	169.49

11 Conclusiones

Se obtuvo un extruido tipo botana utilizando como materia prima polvo de cálices *Hibiscus sabdariffa* L. y harina de maíz azul, que de acuerdo con su caracterización fisicoquímica son aptos para el desarrollo de una botana. La concentración de cálices de jamaica tuvo un efecto importante sobre todas las respuestas evaluadas. La adición de polvo de cálices de jamaica en la elaboración de una botana por extrusión es una buena alternativa, incrementando el contenido de compuestos con actividad antioxidante, lo que podría tener un impacto positivo a la salud del consumidor.

La presente investigación aporta información relevante sobre las condiciones de procesamiento óptimas para la elaboración de un producto extruido directamente expandido a partir de harina de maíz azul y polvo de cálices de jamaica.

12 Referencias

1. Ariza Flores , R., Serrano Altamirano , V., Michel Aceves , A. C., Barrios Ayala , A., Otero Sánchez , M. A., Avendaño Arrazate , C. H., & Noriega Cantú , D. H. (2017). Características bioquímicas y calidad nutracéutica de cinco variedades de jamaica cultivadas en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* .
2. Arriaga Pérez , W. E. (2019). Medición de la dureza del grano de maíz mediante una metodología alternativa de procesamiento de imágenes. *Universidad Autónoma de Querétaro*.
3. Avila de la Cruz , F. M. (2017). Efecto de la ingesta de una bebida de jamaica y de una botana funcional a base de naranja y maíz azul en ratones Wistar inducidas a diabetes tipo II . *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo* .
4. Awuchi, C. G., Igwe, V. S., & Echeta, C. K. (2019). The functional properties of foods and flours. *International Journal Advanced Academic Research*, 5(11), 139-160.
5. Badui Dergal , S. (2006). *Química de los alimentos* . México : Pearson.
6. Balbuena Chávez , A. (2012). Evaluación de antocianinas, fenoles totales y capacidad antioxidante en productos derivados de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Puebla : Secretaria de Educación publica* .
7. Barrera Barrera , D. I. (2018). CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y NUTRICIONAL DE UNA BOTANA EXPANDIDA POR EXTRUSIÓN ADICIONADA CON CEBADA. *HIDALGO : UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO* .
8. Bello Pérez , A., Camelo Méndez, G., Agama Acevedo , E., & Utrilla Coello , R. (2016). Aspectos nutracéuticos de los maíces pigmentados: digestibilidad de los carbohidratos y antocianinas. *Agrociencia* .
9. Bo Ding , Q., Ainsworth , P., Trucker , G., & Marson , H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks . *JOURNAL OF FOOD ENGINEERING* , 283-289.
10. Bravo Romaina , J. M. (2021). Elaboración de alimento extruido empleando harina de papa morada (*Solanum tuberosum* i.var.vitelotte) y concentrado de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) con características antioxidantes . *Perú: Universidad Agraria de la Selva* .
11. Calvo Carrillo, M. D., & Mendoza Martínez , E. (2010). *Bromatología. Composición y propiedades de los alimentos*. México: McGrawHill.

12. Capcha Espinal , B. E., Gamboa Huayra, L. C., Rivas Quinto , A., Rosales Ventura , S., Rosales Orihuela , A., & Mergildo Orihuela , A. (2025). Cuantificación de Antocianinas en Jamaica. Perú: Universidad Nacional del centro de Perú.
13. Carvajal Basantes , S. P. (2018). Efecto de los parámetros de extrusión sobre la calidad nutricional y textura de la mezcla de maíz Zea mays, frejol Phaseolus vulgaris y camote Ipomoea batata en el snack. Ecuador: Universidad Técnica del Norte.
14. Carvajal Zarrabal, O., Barradas Dermitz, D. M., Orta Flores , Z., Hayward Jones , P. M., Nolasco Hipólito , C., Aguilar Uscanga, M. G., . . . Bin Bujang, K. (2012). Hibiscus sabdariffa L., roselle calyx, from ethnobotany to pharmacology. National Library of Medicine .
15. Castañeda Sánchez , A. (2011). Propiedades nutricionales y antioxidantes del maíz azul (Zea mays L.) . Temas selectos , 75-83.
16. Castro Mendoza , M. (2018). Evaluación fisicoquímica y nutricional de un extruido tipo cereal para desayuno a base de harina de Oxalis tuberosa adicionada con fibra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
17. Catañeda , R., & Cáceres , A. (2014). Compuestos bioactivos y propiedades terapéuticas de los cálices de rosa de Jamaica (Hibiscus sabdariffa Linn). Revista científica .
18. Cerón , G., Cerón , A., Hinojosa , J., Salinas , F., Chávez , L., & San Martin , E. (2019). PURIFICACION DE FLAVONOIDES DEL MAIZ AZUL POR CROMATOGRAFIA FRONTAL CON RESINA SP-207. XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
19. Chakraborty, S. K., Singh, D. S., & Kumbhar, B. K. (2014). Influence of extrusion conditions on the. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 53, 65-74.
20. Chan Chan , M., Moguel Ordoñez , Y., Gallegos Tintoré, S., Chel Guerrero , L., & Bentacur Ancona , D. (2020). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (Zea mays L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán México . Biotecnía , 11-21.
21. Chinedum Ezegbe , C., G Nkhata , S., Sunday Ukpang, E., Chikodili Ezech, M., Sunday Okocha , K., & Femi Pedro , B. (2025). Physicochemical and sensory quality of breakfast cereals produced from flour blends of maize and pigeon pea. National Library of medicine .
22. Cid Ortega , S., & Guerrero Beltran , J. A. (2012). Propiedades funcionales de la jamaica (Hibiscus sabdariffa L.). Temas selectos Ingeniería de Alimentos , 47-63.

23. Coria Páez , A. L., Galicia Haro, E. F., & Ortega Moreno , I. C. (2022). Los alimentos funcionales como alternativa a las tendencias de consumo de alimentos rápidos . Red Internacional de investigadores en Competitividad .
24. Cornejo Villegas , M. D., Gutiérrez Cortez , E., Zambrano Zaragoza , L., Real López , A., Rojas Molina , I., Mendoza Avila, M., & Rodríguez García , M. (202). ALMIDÓN RESISTENTE Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS HARINAS Y DE TORTILLA DE MAÍZ REFRIGERADAS A DIFERENTES TIEMPOS DE ALMACENAMIENTO . Memorias del Congreso Nacional de Tecnología .
25. Cuj Laines , R. (2017). Obtención de una botana extruida a base de maíz (*Zea mays*) adicionada con harina de chapulín (*Sphenarium purpurascens* CH). Oaxaca: Instituto Tecnológico de Tuxtepec.
26. Da-Costa-Rocha , I., Bonnlaender , B., Sievers , H., Pischel, I., & Heinrich, M. (2014). *Hibiscus sabdariffa* L. - a phytochemical and pharmacological . FOOD CHEMISTRY , 1-72.
27. De León Zapta , M. A., Pastrana Castro , L., Rúa Rodríguez , M., Alvarez Pérez, O. B., Rodríguez Herrera , R., & Aguilar , C. N. (2016). Experimental protocol for the recovery and evaluation of bioactive compounds of tarbush against postharvest fruit fungi. Food chemistry, 62-67.
28. Díaz Huacaz , R. S., Ávila Perches , M. Á., Espinosa Calderón , A., & Manjarrez Juárez, F. J. (2017). PRODUCCIÓN ARTESANAL DE SEMILLA DE MAÍZ AZUL EN EL ESTADO DE MÉXICO . Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y pecuarias , 7-8.
29. Duarte Valenzuela , Z. N., Zamora Gaga, V. M., Montalvo González , E., & Sáyo Ayerdi , S. G. (2016). Caracterización nutricional de 20 variedades mejoradas de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) cultivadas en México. Revista fitotecnica mexicana .
30. EL FINANCIERO . (5 de Noviembre de 2025). A que no puedes comer solo una: Mexicanos consumen más de 10 kilos de botanas saladas al año. El Financiero.
31. El poder del consumidor A.C. (2021). Obtenido de El poder del consumidor.
32. Escalante, A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P., I., Barrón-Hoyos, J. M., De Dios Figueroa-Cárdenas, J., & López-Cervantes, J. (2013.). La nixtamalización y su efecto en el contenido de antocianinas de maíces pigmentados, una revisión.
33. Flores Trejo , C. M. (2021). Identificación de compuestos fenólicos de extractos de jamaica (*hibiscus sabdariffa*) ‘sudán’ y ‘alma blanca’ y su efecto fungistático en el control de *Rhizopus stolonifer*. México: Universidad Autónoma Chapingo.

34. Forte , d., & young, g. (2021). Food and feed extrusion technology. Australia: Food Industry Engineering.
35. Fosado Quiroz , R., Castro Rosas , J., & Gómez Aldpa , C. A. (2021). Composición y usos de la jamaica . Instituto de ciencias básicas e ingeniería uaeh , 1-6.
36. Fosfado , R. (2021). Producción, composición y usos de la Jamaica . Instituto de ciencias básicas e ingeniería .
37. Galicia Flores , L., Salinas Moreno , Y., Espinoza García , B. M., & Sánchez Fera , C. (2008). Caracterización fisicoquímica y actividad antioxidante de extractos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) nacional e importada. Chapingo Serie horticultura .
38. Gámez Valdez , L. C., Gutiérrez Dorado , R., Gómez Aldapa , C. A., Perales Sánchez, J. X., Milán Carrillo, J., Cuevas Rodríguez, E. O., & Mora Rochín , S. (2021). Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. Biotecnia .
39. García campos , A. U., Cruz Monterrosa , R. G., Rayas Amor, A. A., Jiménez Guzmán , J., Fabela Moron , M. F., Salgado Cruz , M. D., . . . Díaz Ramírez , M. (2020). Caracterización físico-química de maíz (*Zea mays* L.) criollo (azul y rojo) del Estado de México. Agroproductividad, Universidad Autónoma Metropolitana , 95-100.
40. García Reyes , E., Flores Naveda , A., Ruiz Torres , N., Camposeco Montejó, N., Ramírez Barrón , S., & García López , J. (2022). Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de genotipos de maíz pigmentado (azul/morado). Temas de Ciencia y Tecnología, 13-19.
41. Gómez López , P. (2013). OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DIRECTAMENTE EXPANDIDOS POR EXTRUSIÓN Y BOTANAS DE 3a GENERACIÓN A BASE DE CHÍA Y ALMIDÓN DE MAÍZ RESISTENTE AR4. UNIVERSIDAD VERACRUZANA INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS , XALAPA .
42. Gutiérrez Ramírez , A. M., Arriola Guevara , E., Jacques Fajardo , G. E., Morales Hernández , N., Corona González , R. I., & Guatemala Morales , G. M. (2017). CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE UN ALIMENTO EXTRUIDO TIPO BOTANA . Guerrero: Encuentro Nacional de la AMIDIQ.
43. Gutiérrez Ramírez, A. M., Arriola Guevara , E., Jacques Fajardo , G. E., Morales Hernández , N., Corona González, R. I., & Guatemala Morales , G. M. (2017). Caracterización fisicoquímica de un alimento tipo botana. Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química , 5-9.

44. Hernández Santos , B., Juárez Barrientos , J. M., Torruco Uco, J. G., Ramírez Figueroa, E., Bautista Viazcan, V. O., & Rodríguez Miranda , J. (2021). Physicochemical properties of extruded ready-to-eat snack from unripe plantain blends, pineapple by-products and stevia. *Nova scientia*.
45. Hernández Santos , B., Rodríguez Miranda , J., Juárez Barrientos , J. M., Torruco Uco, J. G., Ramírez Rivera , E. J., Herman Lara, E., . . . González García , A. (2025). Physicochemical and Techno-Functional Properties of Extruded Corn Starch Snacks Enriched with Huitlacoche (*Ustilago maydis*): Effects of Extrusion Parameters and Process Optimization. *MDPI*.
46. Hirth , M., Leiter, A., Beck , S., & Schuchmann, H. (2014). Effect of extrusion cooking process parameters on the retention of bilberry anthocyanins in starch based food . *Journal of Food Engineering* , 139-146.
47. Hoyos Gómez , G. M. (2018). Algunos componentes generales, particulares y singulares del maíz en Colombia y México. Colombia : Isogénesis .
48. imarc . (2025). México Mercado de Botanas Extruidas Tamaño, Participación, Tendencias y Pronóstico por Tipo, Canal de Distribución, y Región, 2026-2034. imarc .
49. Ijabadeniyi Y, P. (2017). Microbial Safety of Low Water Activity Foods: Study of Simulated and Durban Household Samples. Department of Biotechnology and Food Technology, Durban University of Technology,.
50. INSIGHTS, F. B. (2026). Tamaño del mercado de snacks extruidos, participación y análisis de la industria, por tipo de producto (maíz, trigo, papa, arroz y otros), canal de distribución y pronóstico regional 2026-2034. Procesamiento de alimentos y alimentos procesados .
51. Ipiates Moreta , I. A. (2024). Evaluación de las Condiciones de Extrusión en las Características del Producto Extruido a Base de Maíz Zea Mays, Lenteja Lens Culinaris y Yuca Manihot Esculenta Crantz. Ibarra : Universidad Técnica del Norte .
52. Jiménez , A., Jaramillo Jaramillo , C., & Rojas de Astudillo , L. (2022). Estudio comparativo de los métodos espectrofotométrico y potenciómetro para la determinación cuantitativa de fenoles totales en plantas medicinales ecuatorianas. *Infoanalítica* , 129-141.
53. Jiménez Juárez , J., Aràmbula , V. G., De la Cruz-Làzaro , E., & Aparicio Trapal, M. A. (2012). CARACTERISTICA DEL GRANO, MASA Y TORTILLA PRODUCIDA CON DIFERENTES GENOTIPOS DE MAÍZ DEL TROPICO MEXICANO. *Universidad y Ciencia* , 145-152.
54. Jin Han, Y., Tra Tran , T. T., & Man Le, V. V. (2018). Corn snack with high fiber content: Effects of different fiber types on the product quality . *LWT* , 1-6.

55. Kato Yamakake , T. A., Mapes Sánchez , C., Mera Ovando , L. M., Serratos Hernández , J. A., & Bye Boettler, R. A. (2009). Origen y diversificación del maíz. México : Impresora Apolo S.A de C.V.
56. Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, C., Uttapap, D., & Rungsardthong, V. (2015). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products . *Journal of Food Science and Technology* , 561-570.
57. López , C., González Gallardo, C. E., Guerrero Ocha , M., Mariño , G., Jácome , B., & Beltrán Sinchiguano , E. (2019). Estudio de la estabilidad de los Antioxidante del vino de Flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L) en el Almacenamiento. . *La granja* , 105-118.
58. Maciel , L. G., Carmo , M. A., Acevedo , L., Daguer , H., Molognoni, L., De Almeida, M. M., & Rosso , N. D. (2018). *Hibiscus sabdariffa* anthocyanins-rich extrac: Chemical stability in vitro antioxidant and antiproliferative activities . *Food and Chemical* , 187-189.
59. Mäkilä , L., Laaksonen, O., Ramos Díaz, J. M., Vahvaselka, M., Myllymaki, O., Lehtomaki, I., . . . Kallio , H. (2014). Exploiting blackcurrant juice press residue in extruded snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 618-627.
60. Makowska , A., Cais Sokolinska , & Lasik , A. (2014). EFFECT OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON WATER ACTIVITY OF EXTRUDED CORN PRODUCT WITH AN ADDITION OF WHEY PROTEINS. *SCIENTIARUM POLONORUM* , 243-247.
61. Martínez Alvarez , M. (2017). Almidón de Maíz. FENALCE.
62. Martínez Meza , Y., Islas Hernández , J. J., Gutierrez Meraz , F., & Osorio Díaz, P. (2016). Formulación de una botana por extrusión con mezcla de harina de plátano y amaranto. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* , 728-733.
63. Mathad, G. N., Gavahian, M., & Lin, J. (2025). Effects of extrusion parameters on the physicochemical. *International Journal of Food Science and Technology*, 60(1), 1-10. doi:<https://doi.org/10.1093/ijfood/vvae077>
64. Medina Pérez, G., Cruz Cadena , A., Pérez Soto , E., Choque Rivera , T., & Almendares Calderón , L. (2024). Botanas Saludables Elaboradas con Harina Libre de Gluten . *Boletín de Ciencias Agropecuarias Icap*, 11-21.
65. Menchaca Armenta , M., Frutos , M. J., Ramírez Wong , B., Quintero Ramos , A., Torres Chávez , P. I., Valero Cases , E., . . . Campas Baypoli , O. N. (2021). The effect of Nixtamalization Extrusion Process and Tortillas Making on the Stability of Anthocyanins from Blue Corn through the Kinetic and Thermodynamic Parameters . *Food and Agriculture Organization of the United Nations* , 334-339.

66. Méndez Montealvo , G., Solorza Feria , J., Velázquez del Valle , M., Gómez Montiel , N., Paredes López , O., & Bello Pérez , L. A. (2005). COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN CALORIMÉTRICA DE HÍBRIDOS Y VARIEDADES DE MAÍZ CULTIVADAS EN MÉXICO. *Agrociencia* , 267-274.
67. Mendoza Martínez , E. (2010). *Bromatología Composición y propiedades de los alimentos*. México: Mc Graw Hill.
68. Meza Rivera, C. D. (Octubre de 2011). *Elaboración y evaluación nutrimental y nutracéutica de una botana a partir de harinas extruidas maíz/frijol*. Obtenido de Universidad Autónoma de Querétaro.
69. Mohammed Ali , I., Fikreyesus Forsido, S., Kuyu, C., Hussien Ahmed, E., Negasa Andersa , K., Tibebu Chane , K., & Kebede Regasa, T. (2024). Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack. *Food Science & Nutrition*, 8755-8761.
70. Mondoñedo, Ph.D, J. R., De la rosa Peñaloza , I., Kirchner Salinas , F., Usami Olmos , C., & Altillano Díaz , M. T. (1994). *Manuales para educación agropecuaria* . México : Trillas .
71. Montaña, O.A, Armenta, J. R. C., Reyes, A. o. O., & González, J. G. (2024). La flor de jamaica como producto estratégico para la salud humana en el contexto de México. *INTERdisciplina*, 12(33), 117-142.
72. Murador , D., Braga , A. R., Da Cunha , D., & De Rosso , V. (2018). Alterations in phenolic compound levels and antioxidant activity in response to cooking technique effects:A meta-analytic investigation. *National Library of Medicine* , 169-177.
73. N. Riaz, M. (2004). *Extrusores en la aplicación de alimentos*. España: ACRIBIA.
74. Navarro Cortez , R. (2010). *Caracterización Fisicoquímica y Estructural de Botanas de Tercera Generación Elaboradas apartir de Harina de Maíz (Zea mays) Azul Utilizando la Tecnología de Extrusión*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
75. Neder Suárez , D., Vazquez Rodríguez , J., Rodríguez Roque , M., Hernández Ochoa , L., S+anchez Madrigal , M. A., Amaya Guerrero , C., & Quintero Ramos , A. (2023). Características fisicoquímicas y sensoriales de productos extruidos y expandidos por microondas elaborados de maíz, espinacas y frijol negro. *Invetigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Aliemntos* , 24-30.
76. Neeraj, G., Kamaljit, K., Amarjeet, K., Baljit, S., & Parminder , S. (2016). TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN THIRD GENERATION SNACK FOODS. *Progressive Research-An International Journal* , 4948-4959.

77. Nikinmaa, M., Zehnder-Wyss , O., Nyström, L., & Sozer, N. (2023). Effect of extrusion processing parameters on structure, texture and dietary fibre composition of directly expanded wholegrain oat-based matrices. LWT.
78. Nuñez Hernández, G., Faz Contreras , R., Gonzalez Castañeda, F., & Peña Ramos , A. (enero de 2005). Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. Redalyc.org, 43(1), págs. 68-78. doi:0040-1889
79. Ortíz Prudencio, S. D. (2006). Determinación de la composición química proximal y fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del sureste del estado de Hidalgo. Pachuca Hidalgo : Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
80. Pérez Naverrate , C., Cruz Estrada , R. H., Chel Guerrero , L., & Betancur Ancona , D. (2006). Caracterización física de extrudidos preparados con mezclas de harinas de maíz QPM (*Zea mays* L.) y frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.). Revista Mexicana de Ingeniería Química , 145-155.
81. Pérez Ramos , K., Elías Peñafiel , C., & Delgado Soriano , V. (2017). High-protein snack: an extruded from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet), and sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). Scientia Agropecuaria , 377-388.
82. Piovensa , A., & Zapata Noreña , C. P. (2019). Study of acidified aqueous extraction of phenolic compounds from calyces. The Open Food Science Journal , 25-34.
83. Pravitha, M., Manikantan, M. R., Ajesh Kumar, V., Beegum, S., & Pandizelvam, R. (2021). Optimization of process parameters for the production of jaggery infused osmodehydrated coconut chips. LWT - Food Science and Technology, 146. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111441>.
84. Puma Campues , G. Y. (2019). EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MEZCLA GRITZ DE MAÍZ *Zea mays* Gritz DE MASHUA *Tropaeolum tuberosum* Y EL DIÁMETRO DE LA BOQUILLA DEL EXTRUSOR EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN. UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE .
85. Quiñones , M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. Nutrición Hospitalaria.
86. Rafael Sánchez , E., & Castro Vargas , D. J. (2023). Extracción y Cuantificación de Antocianinas de maíz morado. Revista Latinoamericana de Difusión Científica, 47-80.

87. Reyes Hernández , I. (2023). Desarrollo y caracterización de una botana de 3ra generación preparada con mezclas de harina de maíz azul y soya . Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo .
88. Rivera Castro, V. M., Gutiérrez Dorado, R., Gutiérrez Grijalva, E. P., Basilio Heredia, J., & Muy Rangel, M. D. (2024). Botana de maíz y residuos de cáliz de jamaica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3-4.
89. Romero Ortiz , M. S. (2023). Botana de segunda generación a base de harinas de frijol, soya y garbanzo:desarrollo, caracterización, evaluación nutraceútica y sensorial. Querétaro : Universidad Autónoma de Querétaro .
90. Romo Zamarrón , K. F., García Muñoz , X. C., Ávila Ruvalcaba , G., Pérez Cabrera , L. E., & Ramírez Carrillo , R. E. (2023). Obtención y caracterización de polvosde flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L)gastada. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* , 741-749.
91. Rossen , J. L., & Miller , R. C. (1973). *Food extrusion . Food technology*, 46.
92. Ruiz Rubio , D. A. (2019). Obtención de Harina Funcional de Semillas de Moringa por Extrusión .
93. Saheed Sanusi , M., Olushola Sunmonu, M., Oladimeji Alasi, S., Abdulganiyy Adebisi, A., & Abdulsalam Tajudeen, A. (2023). Composition,bioactive constituents and glycemic index of brown rice-watermelon seeds extruded snacks as stimulated by extrusion conditions . *Applied Food Research*.
94. Salinas Moreno , Y., Resendiz Valencia , R., Arteaga Garibay , R., & Zacamo Velázquez , N. (2023). Actividad antifúngica de accesiones de maíz (*Zea mays* L.). *TECNOCENCIA CHIHUAHUA*, 1-16.
95. Sañudo Ruiz, C. A., Estrada Alvarado , M. I., Cira Chávez , L. A., Núñez Vega , J., & Gassós Ortega , L. (2015). Producción de antocianinas a partir de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L) adicionando enzimas hidrolíticas . XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería .
96. Sáyago Ayerdi, S. G., & Goñi, I. (2010). *Hibiscus sabdariffa* L: Fuente de fibra antioxidante . *ALAN Archivos latinoamericanos de nutrición* .
97. Sáyago Ayerdi, S., & Álvarez Parrilla , E. (2018). *Alimentos Vegetales autóctonos iberoamericanos subutilizados*. México : Fabro.
98. Segovia Ochoa, R. A. (2024). Desarrollo de una botana a base de maíz con alto contenido de proteínas y fibra dietética . Universidad Autónoma de Querétaro .
99. Serna Saldivar , S.O. (2010). *Cereal Grains Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. México : CRC.

100. Sheng , S., Li, T., & Hai Liu, R. (2018). Fitoquímicos del maíz y sus beneficios para la salud . Food Science and Human Wellness , 185-195.
101. Silva , V. (2018). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activity of phenolic compounds extracted from wine industry by products . Food control, 515-522.
102. Simón , M. R., & Golik, S. I. (2022). Cereales de Verano. Argentina: Editorial Universidad de la Plata.
103. Sinela, A., Rawat, N., Mertz, C., Achir , N., Fulcrand, H., & Dornier, M. (2016). Anthocyanins degradation during storage of Hibiscus sabdariffa extract and evolution of its degradation products. Francia: FOODCHEMISTRY.
104. Sotomayor Carrasco , M. F., & Vargas Arroyo , D. A. (2017). Optimización de de extracción, microencapsulación y evaluación ded la capacidad antioxidante de antocianinas de la flor de Jamaica (Hibiscus sabdariffa) mediante secado por aspersión . Honduras: Escuela Agrícola Panamericana,Zamorano .
105. Suarez D, N., Ramos A, Q., & Guerra C, A. (2016). Efecto de la extrusión-cocción en la formación de almidón resistente . Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos , 36-41.
106. Tepixtle Colohua , V. V., Reyes Trejo , B., & Saucedo , A. (2025). Compuestos químicos funcionales en el maíz morado (Zea mays). Acta Botánica mexicana .
107. Tiefenbacher , K. (2017). Wafer Sheet Manufacturing: Technology and Products. The technology of wafers and waffles I, 405-486.
108. Tokarczyk , G., Bienkiewicz, G., Biernacka, P., Przybylska, S., & Tabaszewska, M. (2025). Effect of Frying Temperature on Lipid Binding, Fatty Acid Composition, and Nutritional Quality of Fish Crackers Prepared from Carp (Ciprinus carpio L.) and Tapioca Starch (Manihot esculentus). National Library of Medicine .
109. Torres Alcalá, A. (2016). Caracterización y cuantificación de compuestos bioactivos en IPOMOEIA BATATAS (L.) LAM variedad morada y en un snack de camote . México : Universidad Nacional Autónoma de México .
110. Valdez López , E. N., Ramírez Moctezuma , E., Sevilla Cervantes , L. J., & Suárez Diéguez , T. (2019). Cuantificación del contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante in-vitro en extractos de flor de Jamaica (Hibiscus sabdariffa). Educación y Salud Boletín científico de Ciencias de la Salud , 174-179.
111. Vargas , L. A. (2007). La historia incompleta del maíz y su nixtamalización. Cuadernos de la Nutrición, 97-104.
112. Zamora Cujilema , V., Mriño Brito , G. A., Gonzalez Gallardo , C. E., Jácome Villacres , M. B., & Beltrán Sinchiguano , E. R. (2018). Estudio de la capacidad antioxidante y contenido de polifenoles en el proceso de clarificación del vino de

flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) utilizando cálices frescos. Enfoque UTE ,
1-14.