



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN QUÍMICA DE ALIMENTOS

TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN
DE UN ALIMENTO FUNCIONAL A BASE DE
FRIJOL NEGRO, CHÍA Y MAÍZ.**

**Para obtener el título de
Licenciada en Química de Alimentos**

PRESENTA

Verónica Itzel Rodríguez García

Director (a)

Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa

Codirector (a)

Dra. Zaira Esmeralda Cabrera Canales

Pachuca de Soto, Hgo., México., agosto, 2024



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
 School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 12 de agosto de 2024

Número de control: ICBI-D/979/2024
 Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Química de Alimentos **Verónica Itzel Rodríguez García**, quien presenta el trabajo de titulación "**Optimización del proceso de extrusión de un alimento funcional a base de frijol negro, chía y maíz**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Javier Castro Rosas

Secretario: Dra. Esmeralda Rangel Vargas

Vocal: Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa

Suplente: Dra. Zaira Esmeralda Cabrera Canales

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
 vergara@uaeh.edu.mx



Dedicatoria

Les dedico este trabajo a mis padres, Liboria García y Salvador Rodríguez, quienes nunca dejaron de apoyarme, a pesar de la adversidad siempre me proporcionaron las herramientas necesarias para poder desenvolverme en todos ámbitos.

A mi hermana, Denis Rodríguez que con todo y desacuerdos, es apoyo e inspiración en mi vida, es la persona más leal y amorosa que podré conocer.

A Daniela Tolentino, quien ha sido un lugar seguro en esta vida, una de las mejores partes de la etapa universitaria, quien llegó para quedarse y quien creyó en mí incluso cuando yo ya no lo hacía.

A mí misma, por demostrarme las cosas que puedo hacer, que el esfuerzo rinde frutos y el trabajo no es en vano. Este logro no es solo mío, sino de todos los que creyeron en mí y me alentaron a seguir.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo, por brindarme la infraestructura, el conocimiento y las herramientas para la realización de esta tesis.

Al Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa por ser una guía para mí desde mis primeros momentos en la universidad, por sus enseñanzas y apoyo, por su orientación y dirección en el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Zaira Esmeralda Cabrera Canales, por todo el apoyo que me brindó en esta etapa, por todas sus enseñanzas, por compartir su conocimiento y explicar las cosas una y otra vez, por su tiempo, paciencia y comprensión, por ayudarme a aligerar las cosas en momentos difíciles, por guiarme y acompañarme en esta etapa.

A mis compañeros, doctores e investigadores del laboratorio de Fisicoquímica de Alimentos I, quienes me brindaron palabras de aliento y consejos, quienes compartieron algunos de sus conocimientos conmigo, y por motivarme en esta travesía.

Y a mi familia, mis papás y mi hermana, en las buenas y en las malas, que sin su paciencia, apoyo y comprensión, esto no habría sido posible.

Índice

1. Introducción	2
2. Marco Teórico.....	4
2.1 Alimento funcional	4
2.2 Proceso de extrusión	5
2.3 Materias primas utilizadas en el proceso de extrusión.....	7
2.4 Antioxidantes	12
3. Justificación	14
4. Hipótesis.....	15
5. Objetivos.....	16
5.1 Objetivo general	16
5.2 Objetivos específicos.....	16
6. Materiales y métodos.....	17
6.1 Materia prima.....	17
6.2 Metodología.....	17
7. Resultados y discusiones	28
7.1 Obtención de las harinas	28
7.2 Productos obtenidos por extrusión	29
7.3 Caracterización fisicoquímica de los productos extrudidos.....	29
7.4 Antioxidantes	44
7.5 Optimización.....	57
8. Conclusiones	58
9. Referencias bibliográficas.....	59

Índice de tablas

Tabla 1 Curva de calibración para la determinación de capacidad la antioxidante por los radicales ABTS y DPPH, el contenido de equivalentes de trolox y el porcentaje de inhibición del radical.	23
Tabla 2 Curva de calibración para la determinación del contenido de fenoles.	25
Tabla 3 Diseño experimental central compuesto rotatable.....	26
Tabla 4 Análisis de varianza para las respuestas de índice de expansión (IE), dureza y densidad aparente (DA) de los productos extrudidos.....	30
Tabla 5 Coeficientes estimados del modelo ajustado y nivel de significancia para las respuestas de índice de expansión (IE), dureza y densidad aparente (DA) de los productos extrudidos.	31
Tabla 6 Análisis de varianza para las respuestas de los radicales ABTS, DPPH y fenoles totales de los productos extrudidos	44
Tabla 7 Coeficientes estimados del modelo ajustado y nivel de significancia para las respuestas de radical ABTS, radical DPPH y fenoles totales de los productos extrudidos	45

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de un grano de frijol.	8
Figura 2. Extrusor de laboratorio Brabender, modelo 832005.007.	18
Figura 3. Texturómetro (Stable Micro Systems, modelo TA.XTPlus).....	19
Figura 4. a) Harina de maíz, b) harina de chía y c) harina de frijol.....	28
Figura 5. Productos extrudidos obtenidos de harinas de frijol, chía y maíz.....	29
Figura 6. Efecto de las concentraciones de las harinas de chía y de frijol sobre los valores del índice de expansión (IE).	32
Figura 7. Efecto de la concentración de la harina de chía y de la humedad de alimentación sobre los valores del índice de expansión (IE)	33
Figura 8. Efecto de la humedad de alimentación y de la concentración de la harina de frijol sobre los valores de índice de expansión (IE).	34
Figura 9. Efecto de las concentraciones de harina de frijol y harina de chía sobre los valores de dureza de los extrudidos.	37
Figura 10. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de dureza de los extrudidos.	37
Figura 11. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de dureza de los extrudidos.....	38
Figura 12. Efecto de la concentración de harina de frijol y harina de chía sobre los valores de densidad aparente (DA) de los extrudidos.	41
Figura 13. Efecto de la concentración de harina de chía y de la humedad de alimentación sobre los valores de densidad aparente (DA) de los extrudidos.	41
Figura 14. Efecto de la concentración de harina de frijol y de la humedad de alimentación sobre los valores de densidad aparente de los extrudidos.	43
Figura 15. Efecto de la concentración de harina de frijol y harina de chía sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos.	46
Figura 16. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos.	47

Figura 17. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos. 48

Figura 18. Efecto de las concentraciones de harina de chía y de harina de frijol sobre los valores de DPPH (equivalentes de Ácido Ascórbico) de los extrudidos.50

Figura 19. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de DPPH (equivalentes de ácido ascórbico) de los extrudidos.....52

Figura 20. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de DPPH (equivalentes de ácido ascórbico) de los extrudidos.52

Figura 21. Efecto de las concentraciones de harina de chía y harina de frijol y sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.54

Figura 22. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.54

Figura 23. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.....56

Figura 24. Región óptima de procesamiento y valores predichos para los productos extrudidos.57

Resumen

El objetivo de esta investigación fue optimizar el proceso de extrusión de un alimento funcional con alto contenido de antioxidantes empleando una mezcla de frijol, chía y maíz, el cual puede ser utilizado como coadyuvante a las problemáticas de salud que se presentan actualmente tales como la obesidad, las enfermedades cardiovasculares, crónicas degenerativas y neurodegenerativas. Aunado a ello, este producto se considera una opción más saludable de alimentación para la población que padece estas enfermedades, debido a su alto contenido de antioxidantes. Se trabajó con un diseño central compuesto rotatable, con tres variables independientes: humedad de alimentación y porcentajes de las harinas de frijol y de chía, el diseño constó de 20 tratamientos, con un $\alpha = 1.68179$. Se realizaron pruebas fisicoquímicas y análisis de actividad antioxidante; en el primer caso se analizó el índice de expansión, la dureza y la densidad aparente; mientras que para la actividad antioxidante, está se determinó usando los métodos con los radicales ABTS y DPPH, además de que se cuantificaron fenoles totales. Como conclusión se observó que, conforme aumentó la humedad, la dureza y la densidad aparente incrementaron y disminuyó el índice de expansión, valores que se vieron afectados por la interacción de las harinas de frijol y de chía con la humedad, debido a los contenidos de fibra, de proteínas, de ácidos grasos, entre otros, presentes en éstas. Por otro lado, la inhibición de los radicales ABTS y DPPH incrementó conforme aumentó la concentración de la humedad y de las fuentes de antioxidantes (harinas de frijol y de chía).

1. Introducción

En este trabajo se presenta el desarrollo y la optimización de un alimento funcional extrudido a base de harinas de frijol, de chía y de maíz, el cual surge a raíz de problemas mundiales como son la obesidad, las enfermedades cardiovasculares, las degenerativas y las neurodegenerativas; las cuales durante generaciones han sido un conflicto que crece rápidamente y que, aunque hace 50 años ya se presentaban, no se consideraban de tanta relevancia como ahora.

Por ejemplo, de acuerdo a los datos estadísticos reportados por el INEGI del año 2018, la obesidad en México es un problema de gran interés que afecta al 18% de la población urbana de niños y niñas de entre 5 y 11 años. Desde hace tres décadas, se ha identificado que el envejecimiento de la población se ve afectado por estilos de vida poco saludables, lo que origina enfermedades tales como la obesidad, el cáncer, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares (Reynoso-Noverón y Mohar, 2014). Durante los últimos años, estos padecimientos han avanzado rápidamente, así que se han buscado estrategias para reducir los altos índices de enfermedades, estos problemas se han incrementado a raíz de que la población no tiene una alimentación adecuada o balanceada, así como por los estilos de vida poco saludables. Esto es un problema de gran importancia, ya que tiene graves consecuencias en la salud de quienes se ven afectados. Por todo lo anterior, en este trabajo de investigación se desarrolló un alimento funcional a partir de una mezcla de harinas de frijol, de chía y de maíz mediante el proceso de extrusión. Alimento que por su formulación, contiene antioxidantes y es un producto de consumo común, pero sobre todo, está dirigido a la población que se ve afectada por enfermedades como la obesidad, la mala alimentación, la desnutrición y otros padecimientos como el envejecimiento celular, los riesgos cardiovasculares, el cáncer, etc.

Los alimentos funcionales se han consumido desde hace mucho tiempo, pero no se identificaban como tal, ya que antes solían producirse alimentos “dietéticos” cuyo desarrollo sólo involucraba eliminar las grasas y los carbohidratos simples y sustituirlos por aditivos y edulcorantes. Hasta hace algunos años, los alimentos funcionales ha cobrado importancia para varios sectores de la población que los requieren debido a una necesidad específica por diferentes motivos. Por ello, actualmente se ha reportado que los alimentos funcionales son una mejor opción para contrarrestar muchas enfermedades, por ejemplo, el sobrepeso, la obesidad, el cáncer, los padecimientos cardiovasculares, etc. La manera en la que pueden contribuir es favoreciendo el metabolismo, previniendo el estrés oxidativo, gracias a su contenido de vitaminas (C y E) y antioxidantes; los alimentos enriquecidos con fibra favorecen la digestión y la función digestiva, mientras los alimentos enriquecidos con ácidos grasos omega 3 y 6, vitaminas del grupo B y fibra, actúan protegiendo el sistema cardiovascular.

Por lo que la formulación del producto desarrollado con harinas de frijol, de chía y de maíz, representa una opción más saludable de alimentación y su consumo representa un beneficio al contener antioxidantes.

2. Marco Teórico

2.1 Alimento funcional

El término alimento funcional fue utilizado para referirse a los alimentos de uso específico para la salud, es decir, aquellos que contienen ingredientes cuyo objetivo es cumplir una función específica dentro del organismo. Actualmente estos alimentos son reconocidos por tener aportes específicos para promover el crecimiento y el desarrollo del sistema cardiovascular, la mejora del sistema gastrointestinal y el metabolismo (Alvídrez *et al.*, 2002).

Los alimentos funcionales son de gran interés, ya que pueden ser alimentos fortificados o con un valor nutrimental extra, sirven también como herramientas para el control o en tratamientos alternos de enfermedades. Un alimento funcional puede definirse como el alimento natural o procesado, que además de su formulación habitual contiene componentes que favorecen a la salud, como, por ejemplo, fibra dietética, aminoácidos y proteínas, carbohidratos, ácidos grasos insaturados, vitaminas, minerales como hierro y calcio, fitoesteroles, antioxidantes, bacterias ácido-lácticas, etc. A este tipo de alimentos se les conoce como funcionales debido al concepto bromatológico que menciona que tiene propiedad funcional, es decir, la calidad que presenta de acuerdo con sus características fisicoquímicas, sus componentes químicos y nutricionales. La FDA considera a los alimentos funcionales como aquellos que tienen sustancias que pueden favorecer a la salud si se incluyen en una dieta variada (Alvídrez *et al.*, 2002) de las personas de la tercera edad, o personas con enfermedades específicas.

Debido a los múltiples propósitos para los que los alimentos funcionales pueden servir, a través del tiempo se han desarrollado diferentes propuestas, por ejemplo, barras de cereales que son destinadas a mujeres de mediana edad, debido a su fortificación con calcio, diseñadas para la prevención de artritis y osteoporosis. Por otro lado, existen ingredientes que tienen funcionalidades benéficas para la salud, por ejemplo, la proteína de soya, la cual permite reducir el riesgo de cáncer de mama. El ácido fólico es también adicionado habitualmente a alimentos dirigidos a personas inmunosuprimidas, de

mediana edad, con sobrepeso y embarazadas, debido a sus efectos en el tratamiento de prevención de anemia macrocítica, en la cual, los glóbulos rojos son mayores al tamaño normal; enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Samaniego *et al.*, 2009).

En los últimos años se han creado nuevos alimentos obtenidos a base de productos naturales que tienen un aporte nutrimental adecuado; tal es el caso del uso de frijol, por su contenido proteico, en diferentes productos cárnicos, en los cuales se pretendió mantener un sabor a carne, con su propio aroma, olor, humedad, grasa y textura (Martínez-Álvarez *et al.*, 2006).

Con respecto a la relación entre los alimentos funcionales y la obesidad, antes solían producirse alimentos “dietéticos” cuyo desarrollo sólo involucraba eliminar las grasas y los carbohidratos simples, sustituyéndolos por aditivos y edulcorantes (Serrano y Sánchez, 2008). Sin embargo, actualmente se ha descubierto que los alimentos funcionales son una mejor opción, debido a que contrarrestan muchas enfermedades, como el sobrepeso, la obesidad, las enfermedades cardiovasculares y las degenerativas. Estos alimentos nacieron como una respuesta al incremento de afecciones, como una alternativa de alimentación ante los nuevos estilos de vida, mejorando la nutrición y la salud pública (Sarmiento-Rubiano, 2006).

Con el desarrollo de alimentos funcionales, se han pretendido adicionar los nutrientes necesarios para que formen parte de una dieta suficiente y balanceada para el grupo al que el alimento vaya enfocado, procurando la eficacia del producto y reduciendo los índices de padecimiento de enfermedades en la población en general (Serrano y Sánchez, 2008). Los alimentos funcionales pueden desarrollarse por medio del proceso de extrusión, ya que es una opción en donde pueden adicionarse los nutrientes necesarios de una manera sencilla.

2.2 Proceso de extrusión

La extrusión es un método por el cual pueden procesarse alimentos mejorando su

digestibilidad y algunos aspectos nutricionales. Para cada alimento deben establecerse las condiciones de extrusión específicas y apropiadas de temperatura, de humedad, el tipo de tornillo del extrusor, la velocidad de rotación del tornillo y la velocidad de alimentación (Rokey, 1995), estas dependen de la materia prima que se utilice, y/o las características fisicoquímicas esperadas del producto.

Existen extrusores de un tornillo, considerados como simples, y de doble tornillo. Los extrusores de un tornillo son uno de los equipos más usados en la industria de alimentos, en estos se emplea cizallamiento profundo, tornillos de cizallamiento bajo y velocidades bajas; generalmente se usan para elaborar pastas cocidas, cereales para desayuno o botanas. Mientras que, un extrusor de doble tornillo es más adecuado para procesar polvos debido a su capacidad de mezcla, ventilación y auto limpieza, consta de un ensamblaje de tornillos acoplados y co-rotatorios ensamblados en un barril cerrado, donde pueden realizarse procesos de mezcla, cocción, transporte, compresión, calentamiento, enfriamiento, bombeo, etc. de materiales muy cohesivos como los plásticos. Diversas ventajas se relacionan a la extrusión, se considera que los alimentos extrudidos tienen un menor impacto ambiental porque se minimizan los residuos generados, lo que los hace más novedosos e interesantes para el consumidor (Rokey, 1995).

Para más ejemplos del uso de los extrusores de un tornillo dentro del desarrollo de alimentos, en el año 2015, en el estado de Hidalgo se desarrolló una botana utilizando un extrusor de un tornillo o tornillo simple, a la cual se le adicionó maíz azul como fuente de compuestos antioxidantes, amaranto para contribuir con proteína de alta calidad nutricional y también calabaza como una fuente de pectinas y carotenos (Cruz-Lozano *et al.*, 2015). Para la elaboración de la botana se requirieron diferentes condiciones de procesamiento (temperaturas, humedades y concentraciones de las harinas de maíz azul, de amaranto y de calabaza). El extrusor mantuvo una velocidad constante del tornillo y con un tornillo con relación de compresión y un dado de salida constante. A la botana obtenida, se le determinó el índice de expansión, el índice de absorción de agua y el índice de solubilidad en agua. Por lo que los autores concluyeron que, debido a la inclusión de harina de calabaza y de amaranto, se afectaron las variables fisicoquímicas anteriormente mencionadas.

También con el uso de un extrusor de tornillo simple, en el año de 2005, se elaboró un alimento extrudido a base de zanahoria, con el objetivo de obtener un producto rico en fibra. De acuerdo a los expertos en el área de nutrición, la importancia de incluir y aumentar el aporte de fibra en la dieta diaria tiene ventajas tales como la sensación de saciedad, ya que se ha reportado que las personas que procuran un consumo suficiente de fibra tienen menos tentación a comer entre comidas. Por el contrario, entre las desventajas de consumir bajas cantidades de fibra, están el estreñimiento y diversos trastornos del sistema digestivo, hasta la posibilidad de desarrollar cáncer de colon (Chávez *et al.*, 2005). En dicha investigación, el contenido de fibra se determinó como fibra dietaria soluble e insoluble, también se determinaron otras propiedades funcionales propias de la materia prima, tales como la capacidad de retención, absorción y adsorción de agua, capacidad de intercambio catiónico y capacidad de intercambio de moléculas orgánicas. Concluyendo que la fibra de zanahoria es un ingrediente óptimo para agregar a un alimento funcional, es de fácil incorporación y es de costo accesible. Estas características y beneficios han hecho que las hortalizas como la zanahoria y otras materias primas como las leguminosas, entre las cuales destaca el frijol negro, puedan utilizarse para la obtención de un alimento elaborado por extrusión (Anderson-Trezina & Kince, 2022).

2.3 Materias primas utilizadas en el proceso de extrusión

*2.3.1 Frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L)*

El frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los productos más consumidos a nivel nacional, gracias a sus altos aportes nutrimentales y forma parte de la dieta básica en México; representa el 36% de la ingesta diaria de proteínas. Es un producto originario y domesticado en América Latina, se considera que se originó en Mesoamérica y Los Andes (Lara-Flores, 2015). Esta leguminosa es importante para el consumo humano, gracias a su contenido de proteínas (16 al 30%), donde destaca la lisina y algunos aminoácidos azufrados como la metionina y la cisteína. Contiene fibra (3 a 8%), carbohidratos (55 al 65%), lípidos (1 al 5%), minerales (3 al 5%), complejo B, calcio, hierro, tiamina y ácido fólico. Además, tiene componentes bioactivos e inhibidores de enzimas y lecitinas; en el pericarpio, el frijol contiene flavonoides con poder antioxidante (Ávila *et al.*, 2017; Fernández *et al.*, 2017). Existen muchas variedades de frijol, tales como comapa, inifap,

huasteco 81, tacaná, siendo diferentes en su color, tamaño, peso promedio y contenidos nutrimentales (López *et al.*, 1996; Lara- Flores, 2015)

Diversos estudios han demostrado que consumir frijol, disminuye problemas de salud tales como obesidad, diabetes, enfermedades del corazón y diferentes tipos de cáncer. Entre sus funciones, el frijol tiene capacidad antioxidante, capacidad de reducir colesterol y lipoproteínas. Por su contenido en fibra, produce un efecto hipoglucemiante que ayuda en el tratamiento de la diabetes tipo 2 (Fernández *et al.*, 2017).

El frijol, si es de color oscuro posee elevada capacidad antioxidante debido a la presencia de altas cantidades de compuestos fenólicos como antocianinas y taninos (Bedoyar Maldonado, 2022). La cascara, también conocida como la testa del frijol (Figura 1), se caracteriza por ser la fuente principal de la fibra en el frijol, además de que presenta gran actividad antioxidante. Los colores de la testa se relacionan con su contenido de compuestos fenólicos como taninos, flavonoides, flavonoles, antocianinas (Sánchez et al, 2016).

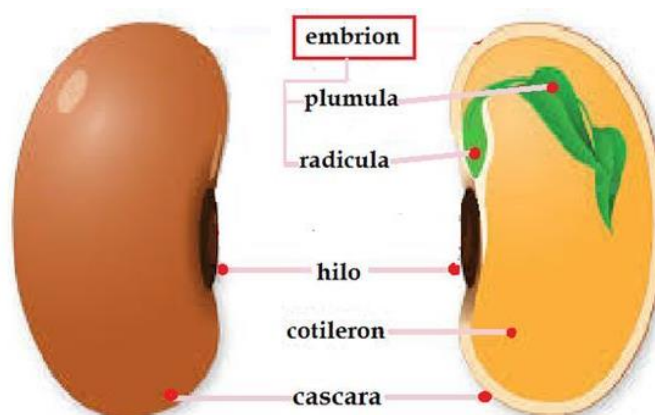


Figura 1. Estructura de un grano de frijol

La testa de frijol contiene fibra y compuestos fenólicos, la primera permite reducir la concentración de colesterol en la sangre y facilita la digestión y los compuestos fenólicos contribuyen con las propiedades antioxidantes (Iniestra-González *et al.*, 2005). Además de los compuestos fenólicos, el frijol tiene antocianinas (responsables del color rojo, negro y azul-violeta) y se encuentran principalmente en la testa del grano. El frijol también

contiene flavonoides (compuestos que contribuyen al color y al sabor del frijol) y los taninos que se localizan principalmente en la testa del grano y también son responsables del color del frijol, tienen potencial antibacteriano, antiviral y antiinflamatorio, su rol principal es la defensa del grano, ya que su astringencia brinda protección contra patógenos y depredadores en granos expuestos (Rochín-Medina, 2021).

De acuerdo a las propiedades antes mencionadas del frijol, en el año 2021, se desarrolló un alimento funcional por extrusión, dirigido a adultos mayores, a base de harina de maíz y de frijol, del cual se obtuvieron buenos resultados de actividad antioxidante atribuida a su contenido de compuestos fenólicos, así como de aceptabilidad sensorial (Moreno-Espinoza *et al.*, 2021). Otras materias primas que pueden utilizarse por tener propiedades funcionales es la chía ya que resulta ser un ingrediente potencial y fuente de proteínas, lípidos y fibra (Senna *et al.*, 2024).

2.3.2 Chía (*Salvia hispánica*)

Es una planta oleaginosa, aromática y herbácea que pertenece a la familia de la *Labiatae lamiaceae* (igual conocida como labiadas). Tiene su origen en zonas montañosas de México, además de sus propiedades antioxidantes e hidrofílicas que la hacen ideal para ser integrada a alimentos funcionales, también tiene propiedades medicinales (Bautista *et al.*, 2007).

La chía presenta altos contenidos de ácido linoléico (17-26%) y de ácido linolénico (50-57%), los cuales son ácidos grasos poliinsaturados (AGE) (Bautista *et al.*, 2007), no son sintetizados por el organismo y forman parte de los ácidos grasos omega 3 y omega 6, respectivamente. Además de que tienen la función de aportar flexibilidad a las membranas celulares, es decir, permiten el movimiento de las proteínas en la superficie y dentro de la bicapa lipídica, también permiten reducir los triglicéridos en sangre (Di Sapio *et al.*, 2008).

La chía es rica en antioxidantes como los ácidos clorogénico, cafeico y cinámico, miricetina, quercetina, kaempferol, flavonoles y flavonoides, compuestos que reducen el

estrés oxidativo y la inflamación en el síndrome metabólico (Muller-Tito, 2015). Debido a su composición, la chía se usa en tratamientos de arterosclerosis, cáncer y cardiomiopatía isquémica. Es fuente de riboflavina, niacina, tiamina, calcio, fósforo, potasio, zinc, cobre, fibra dietaria, proteína y antioxidantes.

Es usada para enriquecer alimentos para bebés y se ha integrado a productos como barras nutritivas, yogures y salsas. Además aumenta el índice de saciedad, previene enfermedades cardiovasculares. Por su contenido de fibra, contrarresta el estreñimiento y debido al contenido de ácidos grasos, la chía tiene función de prevención de enfermedades degenerativas, retarda el índice de glucosa en sangre y reduce la absorción de colesterol (Di Sapio *et al.*, 2008).

Otra materia prima que previene enfermedades degenerativas es el maíz, incluyendo enfermedades cardiovasculares, la diabetes tipo 2, la obesidad, algunos tipos de cáncer, además de la mejora del tracto digestivo (Sánchez- Nuño et al, 2024).

2.3.3 Maíz (*Zea mays* L)

El maíz es una planta gramínea que fue domesticada en Mesoamérica, su nombre científico es *Zea mays* y se caracteriza por desarrollarse en forma de mazorcas con granos. La planta pasa por dos fases fisiológicas, vegetativa y de reproducción, donde adquiere características y diferencias morfológicas distintas. A través del tiempo, la morfología y la estructura del maíz se han modificado debido a diversos factores, como la anchura de sus hojas, su variabilidad, su longitud, la altura de la planta y el espacio donde aparece la mazorca, etc. (Cuevas, 2014). Cada grano de maíz se conoce como cariósido, tiene su revestimiento y la semilla, tiene características físicas fundamentales: el pericarpio, cáscara o salvado; el endospermo; el germen o embrión y la piloriza (Iluh, P, 2006).

Existen técnicas de molienda en seco, donde se obtiene sémola y/o harina, obteniéndose subproductos como el germen y la cubierta seminal. En la industria de alimentos, el maíz es usado para elaborar tortillas, enchiladas, quesadillas, totopos, sopes, esquites, panuchos, tacos, tostadas, garnachas, memelas, chilaquiles, pozole, tamales, esquites y

dulces como pinole o incluso bebidas como el atole, etc. (Cuevas, 2014).

La composición del endospermo del maíz es aproximadamente 80% de almidón y 9% de proteína, también contiene minerales, aceites y elementos traza. Aparte de almidón contiene otros carbohidratos como glucosa, sacarosa y fructosa, los cuales comprenden del 1 al 3% del grano (FAO, 2022).

El almidón está conformado por dos polímeros de glucosa, que son conocidos como amilosa y amilopectina. La amilosa es una molécula lineal compuesta por varias unidades de glucosas, que forman parte de hasta el 25 al 30% del almidón. La amilopectina también consiste en unidades de glucosa, pero en forma ramificada y constituye hasta el 70 al 75% del almidón. Su aporte de proteínas también es de gran importancia, según la especie, la concentración variará del 8 al 11% y se ubica en el endospermo. Contiene proteínas como albúminas (7%) y globulinas (5%), así como nitrógeno no proteico (6%) (FAO, 2022).

La capacidad antioxidante del maíz depende del color y de la variedad; por ejemplo, en el maíz azul, se atribuye a compuestos bioactivos como las antocianinas que proveen colores azules, violetas y morados. En 2013, en la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Autónoma de Campeche, se realizó un estudio donde se analizó la capacidad antioxidante de distintas variedades de maíz y se determinó que la variedad de maíz rojo presentó una mayor actividad antioxidante respecto a variedades de maíz morado y amarillo, debido a una mayor actividad de la vitamina C (Mex-Alvarez *et al.*, 2013).

En este mismo estudio se encontró que la cantidad de fenoles totales fue baja en variedades de maíz amarillo. Su contenido de antocianidinas fue mínimo en comparación a las variedades de maíz morado y rojo. La capacidad de inhibición de radicales catiónicos (ABTS) fue mayor en variedades de maíz amarillo que en maíz blanco. (Mex-Álvarez *et al.*, 2013).

2.4 Antioxidantes

Los antioxidantes se encargan de detener las reacciones de oxidación en las células en las que se producen los radicales libres, gracias a esto es que tienen un papel importante al reducir enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Batalla, 2007).

Los radicales libres son moléculas con uno o más electrones desapareados en el último orbital, por lo que, tienden a ser reactivos. Estos pueden conducir al estrés oxidativo, condición que se relaciona a patologías como la diabetes y la hipertensión arterial, entre otras (Guija-Poma, 2015).

2.4.1 Radical ABTS

Este radical catiónico es un cromóforo que se genera en la oxidación de 2,2'-azino-bis-(3-etil benzotiazolin-6-sulfonato de amonio) con persulfato de potasio, es de una tonalidad verde azulado. Y puede determinarse el porcentaje de inhibición del radical conforme a la decoloración respecto a la concentración (Rioja-Antezana, 2018).

2.4.2 Radical DPPH

El radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo, o por sus siglas DPPH, es susceptible a reaccionar con compuestos antioxidantes mediante la cesión de un átomo de hidrógeno que proporciona el agente antioxidante. La cinética muestra que la reacción ocurre en una primera fase muy rápida y otra muy lenta, por lo que, la absorbancia puede medirse en función del tiempo (Guija-Poma, 2015). La reacción entre el DPPH y el antioxidante se representa de la siguiente manera.



2.4.3 Fenoles

Son compuestos orgánicos con el grupo hidroxilo, que se encuentran en distintos

alimentos, influyen en la calidad y en la aceptabilidad del alimento, ya que actúan como saborizantes, colorantes, antioxidantes. Los compuestos fenólicos tienen propiedades antioxidantes, son muy susceptibles a ser oxidados, pero también impiden que los metales catalicen las reacciones de oxidación (Creus, 2004). Estos compuestos reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu en medio básico, dando lugar a una coloración azul. El complejo de los compuestos con el reactivo resulta en un color azul intenso que varía de intensidad según la concentración contenida (Rioja-Antezana, 2018).

3. Justificación

En años recientes, los problemas de salud como la obesidad, las enfermedades cardiovasculares, crónicas degenerativas y neurodegenerativas han incrementado rápidamente, problemas que afectan a niños(as), jóvenes, adultos y ancianos; los cuales, generalmente son derivados de una alimentación inadecuada o no balanceada, así como por los estilos de vida poco saludables.

Por lo que en esta investigación se propuso el desarrollo de un alimento funcional a base de mezclas de harinas de frijol, de chía y de maíz, mediante el proceso de extrusión, el cual por su contenido de antioxidantes esté dirigido a la población que tenga mala alimentación, obesidad, desnutrición y otros padecimientos como el envejecimiento celular, los riesgos cardiovasculares, el cáncer, etc. Por lo que, el alimento funcional propuesto podría contribuir en la alimentación y en el tratamiento coadyuvante para la mejora de las enfermedades anteriormente mencionadas. Además de que, también sería una opción más saludable de alimentación para la población en general.

4. Hipótesis

El desarrollo de un alimento extrudido a partir de la mezcla de frijol, de chía y de maíz permitirá obtener un alimento funcional con antioxidantes.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Desarrollar un alimento funcional mediante extrusión y optimizar las condiciones del proceso de extrusión, que permitan obtener un producto con elevada actividad antioxidante a partir de frijol, chía y maíz.

5.2 Objetivos específicos

- i. Formular un alimento funcional con las proporciones adecuadas de harinas de frijol, de chía y de maíz con la finalidad de que contenga elevada actividad antioxidante.
- ii. Obtener el alimento funcional mediante el proceso de extrusión a partir de mezclas formuladas de harinas de frijol, chía y maíz, para evaluar sus propiedades fisicoquímicas y su capacidad antioxidante.
- iii. Optimizar el proceso de extrusión para la obtención de un alimento funcional con las proporciones adecuadas de harinas de frijol, chía y maíz en función de sus propiedades fisicoquímicas y su capacidad antioxidante.

6. Materiales y métodos

6.1 Materia prima

Las materias primas que se utilizaron fueron frijol, maíz y chía. Y se adquirieron en la central de abastos de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México.

6.2 Metodología

6.2.1 Obtención de harinas

Las semillas de maíz, frijol y chía fueron molidas por separado en un molino de tolvas de acero inoxidable 304, con transmisión de poleas 2RB y motor de 7.5 HP (marca los ángeles MLA). Las harinas de maíz y de frijol se tamizaron con un tamiz (W.S. Tyler) número de malla 50 (297 μm). Mientras que la harina de chía fue tamizada con un tamiz (W.S. Tyler) número de malla 30 (595 μm). Las harinas de maíz, de frijol y de chía se almacenaron en bolsas de polietileno y se conservaron a temperatura ambiente en un lugar fresco y seco.

6.2.2 Acondicionamiento

Las harinas fueron acondicionadas a diferentes porcentajes de humedad, desde 16 a 20% de acuerdo con el diseño experimental utilizado (Tabla 3). Para alcanzar los porcentajes de humedad correspondientes a cada tratamiento, se realizaron los cálculos en base seca de acuerdo a la ecuación 1, con la cual se obtienen los gramos de agua necesarios para acondicionar las muestras a la humedad necesaria. La cantidad de agua calculada para cada tratamiento se adicionó a la muestra con un aspersor y se mezcló poco a poco. Posteriormente cada tratamiento se guardó en una bolsa de polietileno y en refrigeración durante 24 horas antes del proceso de extrusión.

$$gr\ agua = \left(1 - \frac{(100\% - H_{inicial})}{(100\% - H_{final})}\right) * (gr\ muestra) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

H inicial: humedad inicial de la muestra

H final: humedad a alcanzar

6.2.3 Proceso de extrusión

Se empleó un extrusor de laboratorio (Figura 2) de tornillo simple, marca Brabender®, GmbH & Co. KG. KG, Germany (modelo 832005.007) con una relación L/D de 25, un tornillo con relación de compresión 3:1 y una matriz circular con dado de salida de 3 mm de diámetro. La velocidad de tornillo fue de 250 rpm y la velocidad de alimentación de 60 rpm.

Las humedades y la composición de la muestra variaron de acuerdo con el diseño experimental utilizado (Tabla 3), con la finalidad de estudiar el efecto de estas variables en las propiedades fisicoquímicas del alimento extrudido.



Figura 2. Extrusor de laboratorio Brabender, modelo 832005.007.

6.2.4 Caracterización fisicoquímica de los alimentos extrudidos

6.2.4.1 Índice de expansión

El índice de expansión (IE) se determinó dividiendo el diámetro promedio de los extrudidos (tres mediciones por cada pellet), entre el diámetro interior del dado de salida del extrusor (Ecuación 2). Se realizaron 20 determinaciones por tratamiento.

$$IE = \frac{(d_1+d_2+d_3)/3}{\text{diametro interior dado de salida (mm)}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

d1, d2, d3 = diámetros del extrudido (mm)

6.2.4.2 Determinación de dureza

La dureza se determinó cortando los alimentos extrudidos a una longitud de 2.5 cm. Se utilizó un texturómetro *Stable Micro Systems, United Kingdom* (modelo TA.XTPlus) (Figura 3), en modo de compresión, se empleó una sonda Warner V, a una velocidad de 2 mm/s, lo que permitió determinar la fuerza suficiente para fracturar los extrudidos, la fuerza obtenida se reportó en N.

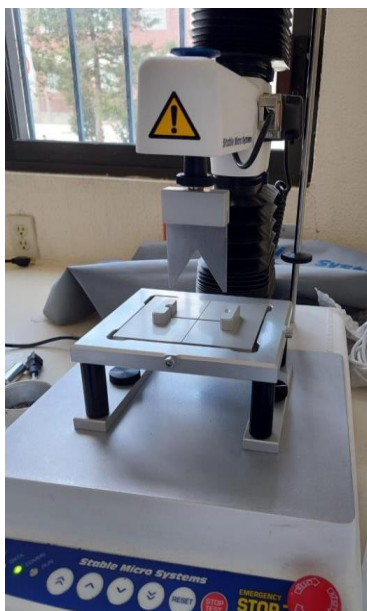


Figura 3. Texturómetro (Stable Micro Systems, modelo TA.XTPlus)

6.2.4.3 Densidad aparente

Se seleccionaron 20 muestras de 2.5 cm de longitud por tratamiento y se determinó su peso en una balanza analítica (marca Mettler Toledo, Switzerland, modelo AX205) y su diámetro promedio. Esos valores fueron empleados para calcular el volumen y la densidad aparentes mediante las ecuaciones 3 y 4, respectivamente. La densidad aparente (DA) se reportó en g/cm³.

$$V = \pi * r^2 * l \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$DA = P/V \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

V= volumen aparente (cm³)

r = radio promedio del extrudido (cm)

l = longitud del extrudido (cm)

p= peso del extrudido (gr)

6.2.5 Antioxidantes

6.2.5.1 Obtención de extractos para la determinación de antioxidantes

Para la determinación de la capacidad antioxidante de cada uno de los tratamientos obtenidos del diseño experimental (Tabla 3), se realizó por triplicado una extracción de compuestos libres y ligados, de acuerdo a la siguiente metodología:

El extrudido se trituró y se colocaron en tubos Falcon de 50 mL 0.5 g de muestra, se adicionaron 50 mL de etanol (C₂H₆O) al 80% y se agitaron en un agitador *Environ Shaker* (marca Lab-Line, Melrose Park, USA; modelo 3527-5) por 10 min. Después de reposar por aproximadamente 20 min, se decantó el sobrenadante a otro tubo de centrifuga, también de 50 mL (etapa que se realizó dos veces). Posteriormente las muestras

reposaron por 12 h a temperatura ambiente. Para la extracción de compuestos libres, se trabajó con el sobrenadante de la extracción, el cual se centrifugó 10 min a 8000 rpm en una centrífuga HERMLE Z300 y se conservó en refrigeración a 4 °C hasta su uso en la evaluación de la actividad antioxidante y en la determinación de compuestos fenólicos.

Para la extracción de compuestos ligados, se usó el precipitado obtenido, al que se le adicionaron 10 mL de hexano y se agitaron por 2 min en un vórtex (IKA® *lab dancer*), después 10 min en un agitador mecánico *Environ Shaker* (marca Lab-Line, Melrose Park, USA modelo 3527-5) y por último, se centrifugó 10 minutos en una centrífuga HERMLE Z300 a 8000 rpm. El hexano (C₆H₁₄) se recuperó por decantación, después se realizó una hidrólisis añadiendo 10 mL empleando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 2M. Los tubos se colocaron en un baño maría por 30 min a 95 °C, cuidando que no entrara agua en su interior, posteriormente se llevaron a agitación por 60 min y se neutralizaron adicionando 2 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, por último, se agitaron 30 s en un vórtex y 10 min en el agitador mecánico.

Para la segunda etapa, la extracción se inició adicionando 10 mL de acetato de etilo a cada tubo y agitando los tubos 30 s en un vórtex (IKA® *lab dancer*) y 10 min en un agitador mecánico *Environ Shaker* (marca Lab-Line, Melrose Park, USA, modelo 3527-5) para posteriormente llevarlos a centrifugar 10 min a 8000 rpm, el sobrenadante resultante de la centrifugación se recuperó y fue utilizado en la evaluación de la actividad antioxidante de compuestos ligados y en la determinación de compuestos fenólicos ligados.

6.2.5.2 Determinación de la capacidad antioxidante por el radical ABTS

Se determinó el porcentaje de inhibición del radical ABTS, empleando una curva de calibración de trolox en el intervalo de concentración de 0 a 150 ppm, para obtener dicha curva se emplearon las diluciones expresadas en la Tabla 1. Para ello, se preparó una solución patrón pesando 3.75 mg del reactivo trolox y se disolvió en 25 mL de agua destilada. Previamente, se pesaron 1.65 mg de persulfato de potasio (K₂S₂O₈) grado analítico y se disolvieron en 5 mL de agua destilada junto a una pastilla de reactivo ABTS. Pasadas 16 h, se tomó una alícuota de 1 mL de la solución de persulfato de potasio y

del reactivo ABTS, los cuales se disolvieron en 45 mL de etanol. Esa solución se analizó a través del espectrofotómetro (GENESYSTM 10S UV-Vis de Thermo Scientific™) hasta que llegó a una lectura aproximada de 732 nm, en caso de no alcanzar la absorbancia necesaria, se ajustó con persulfato de potasio grado analítico (K₂SO₄). Posteriormente para las reacciones, en tubos Eppendorf de 2 mL se colocaron 1050 µL del reactivo ABTS, 50 µL de extracto y se dejó reaccionando 30 min antes de leer a 732 nm en un espectrofotómetro usando etanol como blanco. La curva de calibración se preparó en ocho tubos Eppendorf de 2 mL, en cada tubo se colocaron 1050 µL del reactivo ABTS, 50 µL de la solución de la curva de calibración de trolox a la concentración correspondiente en cada punto de la curva, así como los volúmenes de solución de trolox y etanol (Tabla 1), los tubos Eppendorf se dejaron reaccionando 30 min antes de leer a 732 nm en un espectrofotómetro (GENESYSTM 10S UV-Vis de Thermo Scientific™), también usando etanol como blanco. El porcentaje de inhibición del radical se calculó de acuerdo con la ecuación 5 y los resultados se expresaron como porcentaje (%) de inhibición.

$$\% \text{ Inhibición del radical ABTS} = \left(\frac{Abs_1 - Abs_2}{Abs_1} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

Abs_1 = Absorbancia inicial

Abs_2 = Absorbancia de la reacción (extracto o curva de calibración)

Tabla 1. Curva de calibración para la determinación de capacidad antioxidante por los radicales ABTS y DPPH, el contenido de equivalentes de trolox y el porcentaje de inhibición del radical.

Tubo	Concentración (ppm)	Solución de Trolox (mL)	Metanol (mL)
1	150	5.000	0
2	120	4.000	1.000
3	100	3.333	1.667
4	80	2.666	2.334
5	60	2.000	3.000
6	40	1.333	3.667
7	20	0.666	4.334
8	0	0	5.000

6.2.5.1 Determinación de la capacidad antioxidante por el radical DPPH

Se determinó el porcentaje de inhibición del radical DPPH de acuerdo con la curva de calibración de ácido ascórbico preparada en el intervalo de 0 a 150 ppm, para su obtención se prepararon las diluciones presentadas en la Tabla 1. Para ello, se preparó una solución patrón pesando 3.75 mg de ácido ascórbico y se disolvieron en 25 mL de agua destilada. Por otro lado, se pesaron 2.37 mg de reactivo DPPH ($C_{18}H_{12}N_5O_6$) y se disolvieron en 100 mL de metanol. Para la reacción, en tubos Eppendorf de 2 mL, se colocaron 1050 μ L del reactivo DPPH y luego 50 μ L de extracto y se dejó reaccionando 30 min antes de leer a 515 nm, en caso de no alcanzar la absorbancia esperada, se ajustó con reactivo DPPH; se usó metanol (CH_3OH) como blanco.

Para obtener la curva de calibración de ácido ascórbico, esta se preparó en ocho tubos Eppendorf de 2 mL, en cada tubo se colocaron 1050 μ L del reactivo DPPH, 50 μ L de la solución de ácido ascórbico a la concentración correspondiente de cada punto de la curva, así como los volúmenes necesarios de ácido ascórbico y metanol (Tabla 1), los tubos se dejaron reaccionando 30 min antes de leer a 515 nm, también usando metanol como blanco. El porcentaje de inhibición del radical se calculó con la ecuación 6:

$$\% \text{ inhibición del radical DPPH} = \left(\frac{Abs_1 - Abs_2}{Abs_1} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

Abs_1 = Absorbancia inicial

Abs_2 = Absorbancia de la reacción (extracto o curva de calibración)

6.2.5.2 Determinación de fenoles totales

Se determinó la concentración de fenoles totales por el método Folín-Ciocalteu y con una curva de calibración de ácido gálico, con concentración de 0 a 120 ppm (preparadas por las diluciones de una solución patrón presentadas en la Tabla 2). La solución patrón se preparó pesando 3 mg de ácido gálico ($C_6H_2(OH)_3COOH$) y disolviéndolos en 25 mL de agua.

Para la obtención de la curva de calibración se prepararon 7 tubos Eppendorf en los cuales se colocaron 0.25 mL de la solución de ácido gálico a la concentración correspondiente del punto de la curva y los volúmenes de ácido gálico y agua destilada necesarios (Tabla 2), 0.625 mL de solución Folin al 10% y 0.5 mL de solución de carbonato de sodio al 7.5%. Por otro lado, para la reacción de la muestra se prepararon tubos Eppendorf donde se colocaron 0.25 mL de extracto, 0.625 mL de solución Folin al 10% y 0.5 mL de solución de carbonato de sodio al 7.5%.

La lectura se realizó a 760 nm en un espectrofotómetro (GENESYSTM 10S UV-Vis de Thermo Scientific™). La concentración de fenoles totales se calculó mediante la ecuación de la recta.

Tabla 2. Curva de calibración para la determinación del contenido de fenoles.

Tubo	Concentración (ppm)	Solución de Ácido Gálico (mL)	Agua destilada (mL)
1	120	5.000	0
2	100	4.160	0.840
3	80	3.333	1.667
4	60	2.500	2.500
5	40	1.666	3.334
6	20	0.833	4.167
7	0	0	5.000

6.2.6 Diseño experimental

Se trabajó con un diseño central compuesto rotatable, con tres variables independientes: la humedad de alimentación y los porcentajes de la harina de frijol y de chíá, el diseño constó de 20 tratamientos, con un valor de $\alpha = 1.68179$ (Tabla 3). Los datos fueron analizados empleando el software Design Expert versión 7.1.5.

Tabla 3. Diseño experimental central compuesto rotatable

Tratamiento	Contenido de harina chíá (%)	Contenido de harina frijol (%)	Humedad (%)
1	5.81	21.81	16.81
2	8.19	21.81	16.81
3	5.81	24.19	16.81
4	8.19	24.19	16.81
5	5.81	21.81	19.19
6	8.19	21.81	19.19
7	5.81	24.19	19.19
8	8.19	24.19	19.19
9	5.00	23.00	18.00
10	9.00	23.00	18.00
11	7.00	21.00	18.00
12	7.00	25.00	18.00
13	7.00	23.00	16.00
14	7.00	23.00	20.00
15	7.00	23.00	18.00
16	7.00	23.00	18.00
17	7.00	23.00	18.00
18	7.00	23.00	18.00
19	7.00	23.00	18.00
20	7.00	23.00	18.00

6.2.7 Análisis estadístico

Los datos de los tratamientos obtenidos del diseño experimental fueron analizados empleando la metodología de superficies de respuesta, empleando el software Design Expert versión 7.1.5 (Stat Ease Inc., Minneapolis, MN).

6.2.8 Optimización

La optimización se llevó a cabo mediante la metodología de superposición de superficies, utilizando el software Design Expert versión 7.1.5 (Stat Ease Inc., Minneapolis, MN). Las respuestas seleccionadas para realizar la optimización fueron índice de expansión IE, capacidad antioxidante por el radical ABTS, capacidad antioxidante por el radical DPPH y contenido de fenoles totales.

7. Resultados y discusiones

7.1 Obtención de las harinas

Las harinas obtenidas de maíz, de chía y de frijol se presentan en la Figura 4, estas se obtuvieron después de pasar los granos por el molino de tolvas y después de tamizar, para el maíz y el frijol se empleó tamiz (W.S. Tyler) número de malla 50 (297 μm), mientras que la chía se tamizó con un tamiz (W.S. Tyler) número de malla 30 (595 μm). Las harinas se mantuvieron almacenadas en bolsas de polietileno a temperatura ambiente en un lugar fresco y seco.

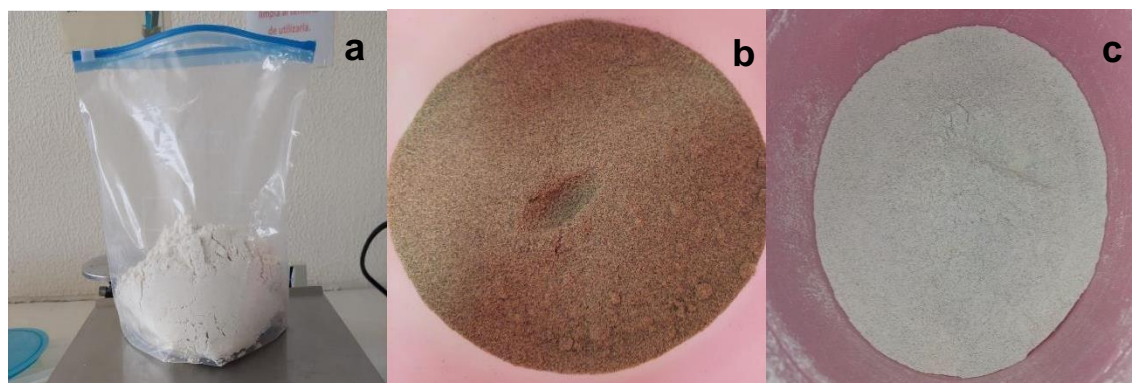


Figura 4. a) Harina de maíz, b) harina de chía y c) harina de frijol

7.2 Productos obtenidos por extrusión

En la Figura 5, se presentan 12 de los 20 tratamientos desarrollados de acuerdo al diseño experimental utilizado y conforme a su apariencia visual obtenida por la combinación de las harinas de frijol, de chíá y de maíz.

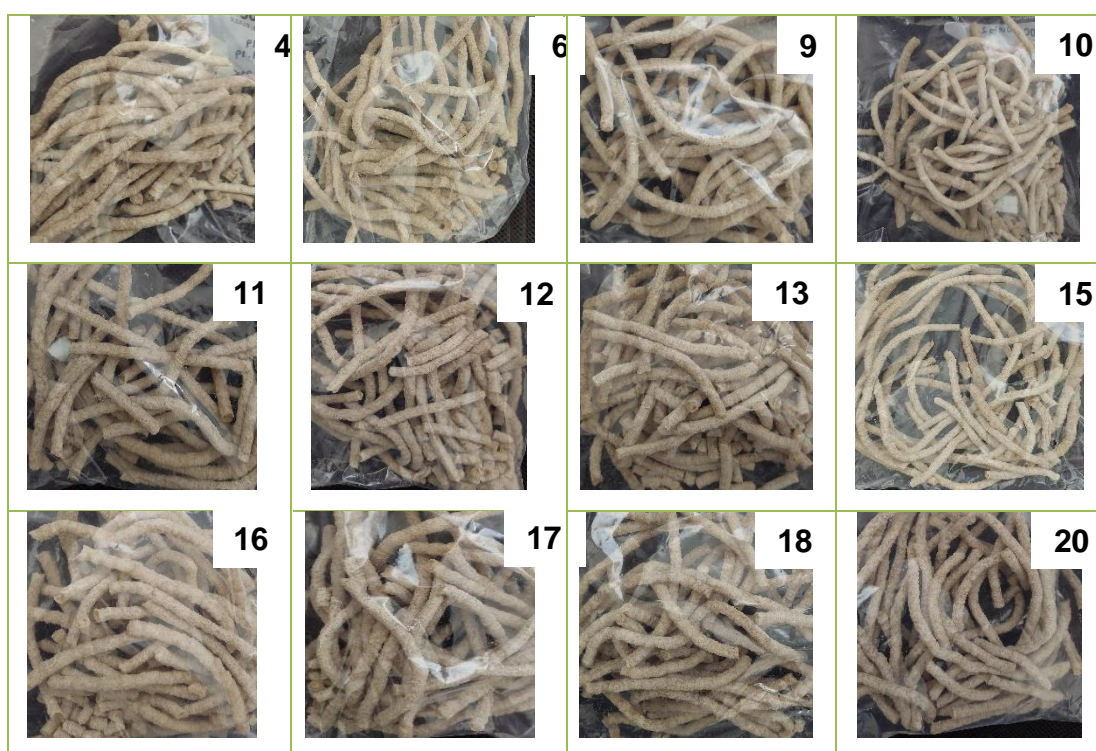


Figura 5. Productos extrudidos obtenidos de acuerdo al diseño experimental y a base de harinas de frijol, chíá y maíz.

7.3 Caracterización fisicoquímica de los productos extrudidos

7.3.1 Índice de expansión (IE)

La Tabla 4 presenta el análisis de varianza de los productos obtenidos por extrusión para las respuestas índice de expansión (IE), densidad aparente (DA) y dureza. Se observó que el modelo de regresión cuadrático utilizado para IE, DA y dureza fue significativo, con valores de R^2 ajustada >0.7056 , coeficientes de variación $<9.28\%$, p de F del modelo

<0.0001 y falta de ajuste para las 3 respuestas.

Tabla 4. Análisis de varianza para las respuestas de índice de expansión (IE), dureza y densidad aparente (DA) de los productos extrudidos

Respuesta	R2 ajustada	R2	C. V. (%)	Valor F	p de F (modelo)	Falta de ajuste
IE	0.7609	0.7723	4.67	67.82	< 0.0001 t	< 0.0001
Dureza	0.7056	0.7210	9.28	47.08	< 0.0001	< 0.0001
DA	0.7353	0.7487	6.33	55.94	< 0.0001	< 0.0001

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores del IE de los productos extrudidos (Tabla 5) mostraron que las variables concentración de harina de chíá, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$ y $p \geq 0.1$).

El índice de expansión es un parámetro que describe el incremento de tamaño del producto por efecto de la expansión formando “burbujas” en su interior, el índice de expansión afecta la densidad y las características del extrudido como la dureza, así mismo se ha demostrado que este parámetro influye en la aceptabilidad de los productos extrudidos (Rodríguez-Miranda, 2011).

En esta investigación, la expansión de los productos extrudidos se vio afectada por la interacción entre las concentraciones de harinas de chíá y frijol (Figura 6). Se observó que el valor máximo de expansión (2.91) se presentó a menor contenido de harina de chíá y menor concentración de harina de frijol. Y el valor menor de expansión (1.78) se obtuvo a mayor concentración de harina de chíá y menor concentración de harina de frijol, probablemente debido al aumento en el contenido de fibra y ácidos grasos presentes en la harina de chíá, los cuales impidieron que el producto expandiera.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en dureza (Figura 9) en donde, se encontró mayor valor de dureza a mayor concentración de harina de chíá y por consiguiente menor expansión atribuyendo el resultado a una probable compactación del extrudido.

Tabla 5. Coeficientes estimados del modelo ajustado y nivel de significancia para las respuestas de índice de expansión (IE), dureza y densidad aparente (DA) de los productos extrudidos.

Respuesta	Intercepto	Lineales			Interacción			Cuadráticos		
		B ₀	b ₁ A	b ₂ B	b ₃ C	b ₁₂ AB	b ₁₃ AC	b ₂₃ BC	b ₁₁ A ²	b ₂₂ B ²
IE	2.4163	-0.1544	0.0011	-0.0614	0.0110	-0.0105	0.0337	-0.0809	-0.0032	0.1648
	2	(<0.0001)	(0.9138)	(<0.0001)	(0.4079)	(0.4318)	(0.0122)	(<0.0001)	(0.7457)	(<0.0001)
	**	*	***	*	***	***	*	*	***	*
Dureza	29.792	0.1778	0.4756	3.1652	-0.2928	2.4157	-2.8760	1.0448	1.2797	1.2797
	7	(0.4904)	(0.0562)	(<0.0001)	(0.3783)	(<0.0001)	(<0.0001)	(<0.0001)	(<0.0001)	(<0.0001)
	**	***	**	*	***	*	*	*	*	*
DA	0.0029	0.0002	2.3736 E ⁻⁵	1.5244 E⁻⁴	9.9204 E⁻⁵	-3.5723 E ⁻⁵	-1.4575 E⁻⁴	-1.2011 E⁻⁴	1.5487 E⁻⁴	-6.9232 E⁻⁵
	**	(<0.0001)	(0.1433)	(<0.0001)	(<0.0001)	(0.0922)	(<0.0001)	(<0.0001)	(<0.0001)	(<0.0001)
	**	*	***	*	*	**	*	*	*	*

Modelo en el cual b₁, b₂ y b₃ = Chía, frijol y humedad respectivamente para la ecuación: $Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2$.

No. de muestras analizadas para IE (índice de expansión), DA (densidad aparente) y dureza = 20

*=p < 0.05

**=0.05 ≤ p < 0.1

***=p ≥ 0.1

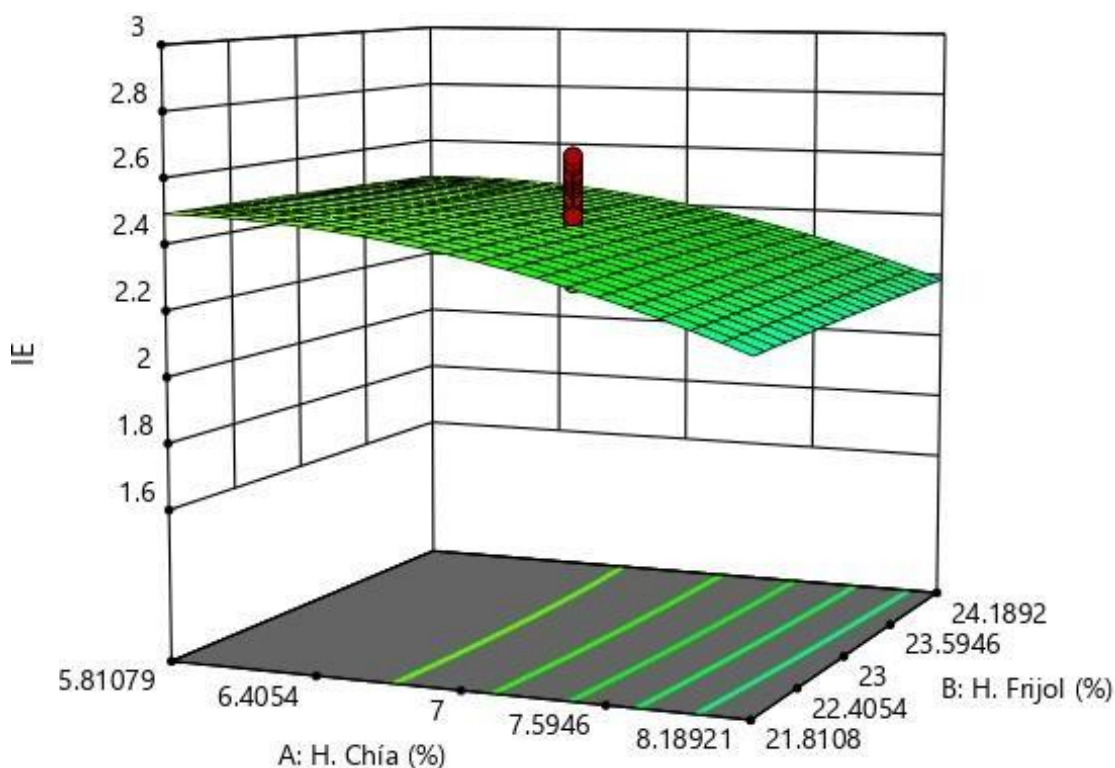


Figura 6. Efecto de las concentraciones de las harinas de chíya y de frijol sobre los valores del índice de expansión (IE).

En la Figura 7 puede observarse que el mayor valor de índice de expansión se encontró a menor concentración de harina de chíya y una baja concentración de humedad de alimentación. Mientras, por lo contrario, el menor valor del índice de expansión para los productos extrudidos se observó a mayor concentración de harina de chíya y humedad alta, indicando que los contenidos de fibra, ácidos grasos y humedad, no permitieron la expansión del producto provocando probablemente la compactación del extrudido; para lo cual sería necesario un análisis del mismo mediante Microscopía Electrónica de Barrido que permitiera observar sus características estructurales y morfológicas.

Al comparar el efecto del contenido de harina de frijol y de la humedad de alimentación (Figura 8), se observó que el valor máximo del índice de expansión se encontró a bajas humedades de alimentación y a bajas concentraciones de harina de frijol. Mientras que el valor mínimo de expansión se encontró a humedades intermedias de alimentación y concentraciones intermedias de harina de frijol.

De manera general, se observó que la expansión se vio afectada por los componentes de las harinas de chíá y de frijol, ya que el mayor índice de expansión se encontró a concentraciones menores de ambas, con una humedad de alimentación menor, mientras que el menor índice de expansión se encontró a mayor concentración de las harinas de chíá y de frijol, viéndose afectado por las proteínas, la fibra y los ácidos grasos, principalmente.

En este sentido, las proteínas afectan la expansión de los extrudidos debido a su capacidad de afectar la distribución del agua en la matriz y su estructura macromolecular (Gómez-López, 2013). Además, durante la extrusión hay desnaturalización de las proteínas (estructuras terciaria y cuaternaria) y reorganización de los enlaces de hidrógeno y disulfuro, que afectan la plastificación y la formación de textura del producto extrudido. Por otro lado, la fibra al ser rígida puede inhibir la expansión (Galindo-Luján, 2018).

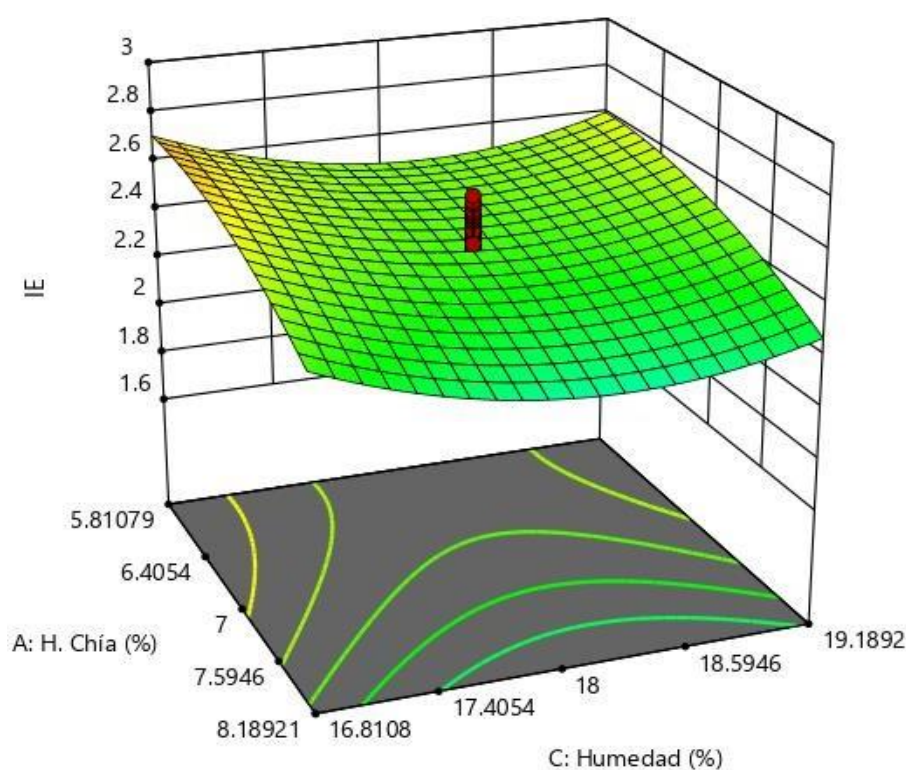


Figura 7. Efecto de la concentración de la harina de chíá y de la humedad de alimentación sobre los valores del índice de expansión (IE).

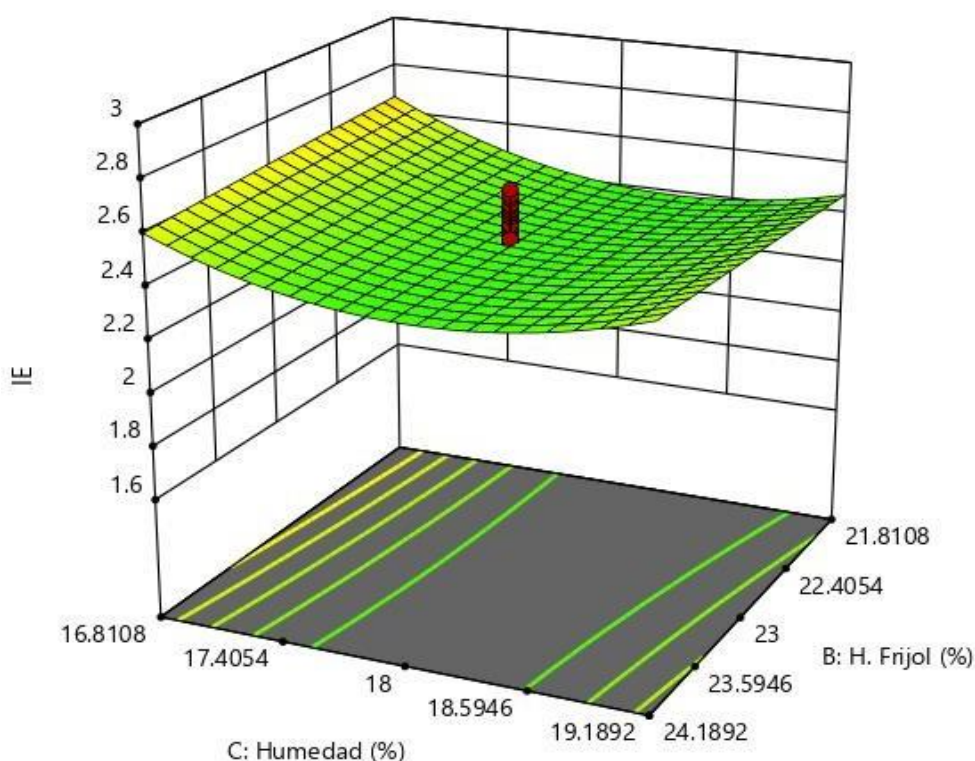


Figura 8. Efecto de la humedad de alimentación y de la concentración de la harina de frijol sobre los valores de índice de expansión (IE).

Llopart (2012) trabajó con un producto extrudido a base de sorgo integral, en el cual se identificó que la expansión de este disminuyó al aumentar la humedad. El sorgo es fuente de fibra dietética, durante la extrusión ésta reduce el potencial de expansión, y su interacción con el aumento de humedad podrían compactar la estructura y provocar que se disminuya la expansión (Vega, 2008) de igual manera como sucede con el alimento presentado en este trabajo (de frijol, chíá y maíz) en donde al aumentar la humedad y por el contenido de fibra de las harinas y otros componentes de ellas, disminuye la expansión. Resultado que concuerda con Ferreira *et al.* (2011), quienes evaluaron botanas extrudidas expandidas a base de maíz que contenían salvado de trigo y en donde encontraron que la expansión de los productos disminuyó al aumentar al 20% el contenido de salvado de trigo, de la misma manera, la fibra contenida en el salvado de trigo tiene la misma acción, disminuir la expansión del extrudido.

Pérez-Navarrete *et al.* (2006), trabajaron con productos extrudidos a partir de distintas mezclas de harinas de maíz QPM (*Zea mays* L.) y de frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.) y aseguraron que la expansión aumentó significativamente conforme se incrementó la concentración de la harina de maíz, debido a que su contenido de almidón aumenta la expansión. Sin embargo, se observó que en los productos extrudidos conforme aumentaba el contenido de frijol disminuía el índice de expansión, debido a las proteínas. Estos resultados son contrarios a los de Neder-Suárez *et al.* (2023) quienes elaboraron un producto extrudido a base de maíz azul, espinacas y frijol negro; sin embargo, están relacionados. Los autores encontraron que existe una tendencia en donde incrementa el índice de expansión al disminuir el contenido de proteína, al analizar la interacción del contenido de frijol contra el aumento o disminución del contenido de maíz azul y no tener diferencia significativa ($p < 0.05$), se indica que el frijol (por su contenido de proteína) afecta la expansión de las botanas justo como sucede con la botana de este trabajo.

Por otro lado, Gómez-López (2013) analizó botanas de segunda y de tercera generación obtenidas a base de harina de chía desgrasada y almidón de maíz modificado por acetilación y reportaron que el índice de expansión disminuyó al aumentar la concentración de chía por arriba del 15%, lo cual podría ser causado por la presencia de fibra en la harina de chía, ya que esta obstruye la expansión del alimento debido a la rigidez de su estructura, además de ácidos grasos que provoca la disminución de la fuerza de corte durante la extrusión, afectando el índice de expansión.

7.3.2 Determinación de dureza

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores de dureza (Tabla 5) para las variables concentración de harina de chíá, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación, en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$, $0.05 \leq p < 0.1$ y $p \geq 0.1$).

En alimentos, la dureza nos indica la fuerza requerida para comprimir un producto, ya sea con los dientes, lengua, paladar o algún instrumento (Zúñiga-Hernández, 2007). De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se observó que la dureza de los productos extrudidos no se vio afectada por el contenido de harina de chíá y de harina de frijol, como se observa en la Figura 9. Los valores máximos y mínimos (39.645 N y 18.0321 N, respectivamente) de dureza no son claramente perceptibles cuando interaccionan la harina de frijol y la harina de chíá utilizadas en la formulación del producto. Por lo que dichas interacciones presentaron poco efecto sobre la dureza de los productos extrudidos.

En las Figuras 10 y 11 pueden observarse que los valores mayores de dureza se encontraron a mayores porcentajes de humedad, mayor concentración de harina de chíá y menor concentración de harina de frijol, respectivamente. Por otro lado, los valores menores de dureza se observaron a menor humedad de alimentación y mayor concentración de harina de chíá (Figura 10), así como, a menor humedad de alimentación y menor concentración de harina de frijol (Figura 11).

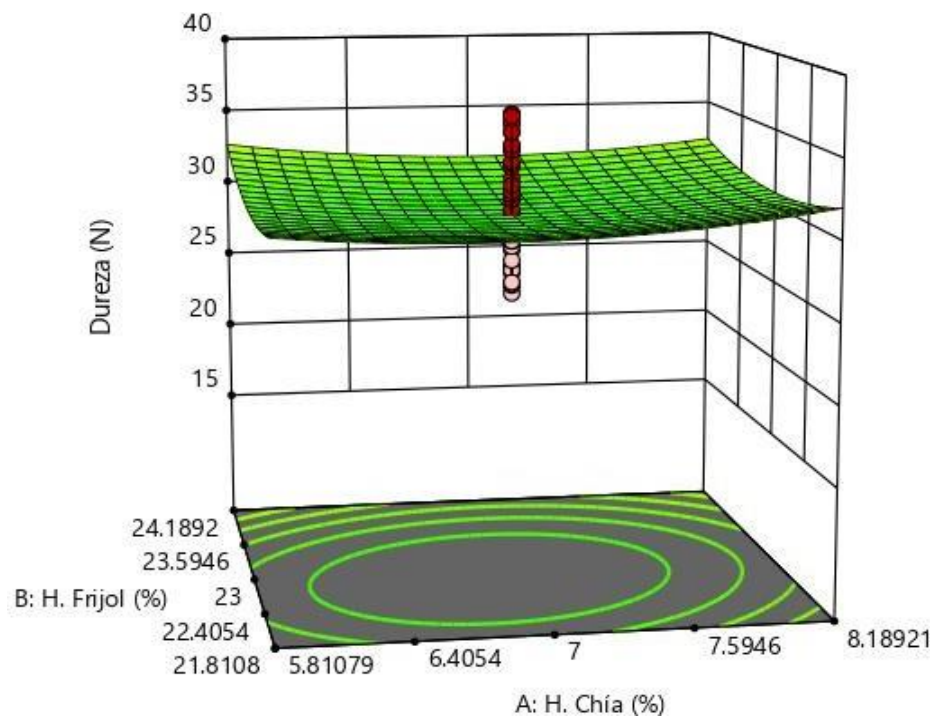


Figura 9. Efecto de las concentraciones de harina de frijol y harina de chíá sobre los valores de dureza de los extrudidos.

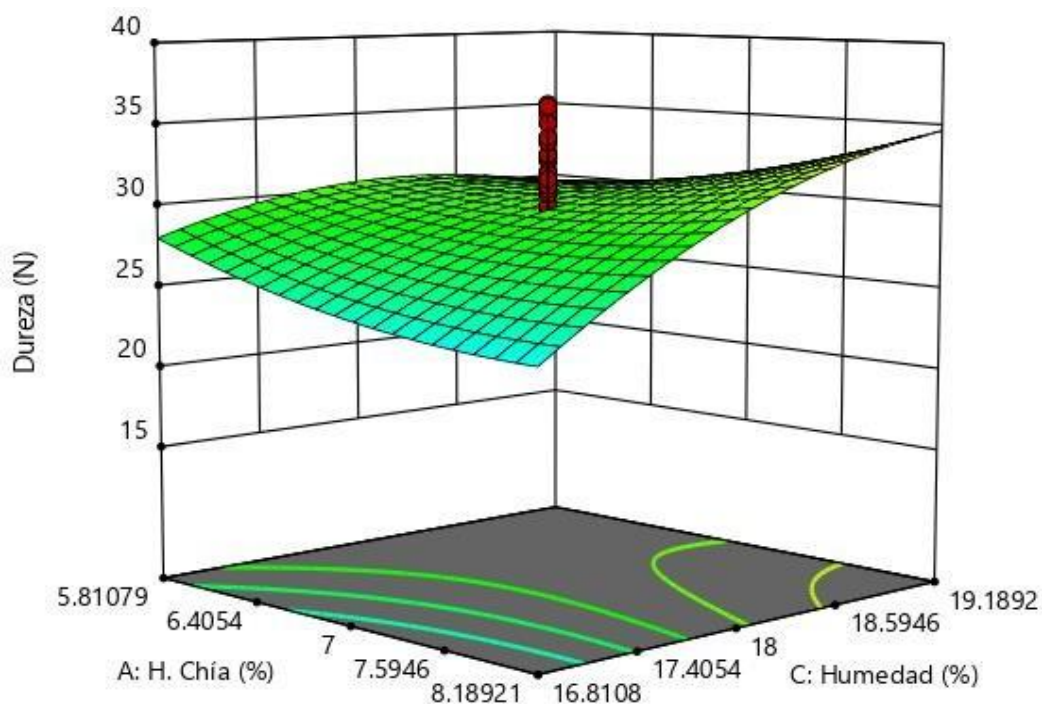


Figura 10. Efecto de la concentración de harina de chíá y humedad de alimentación sobre los valores de dureza de los extrudidos.

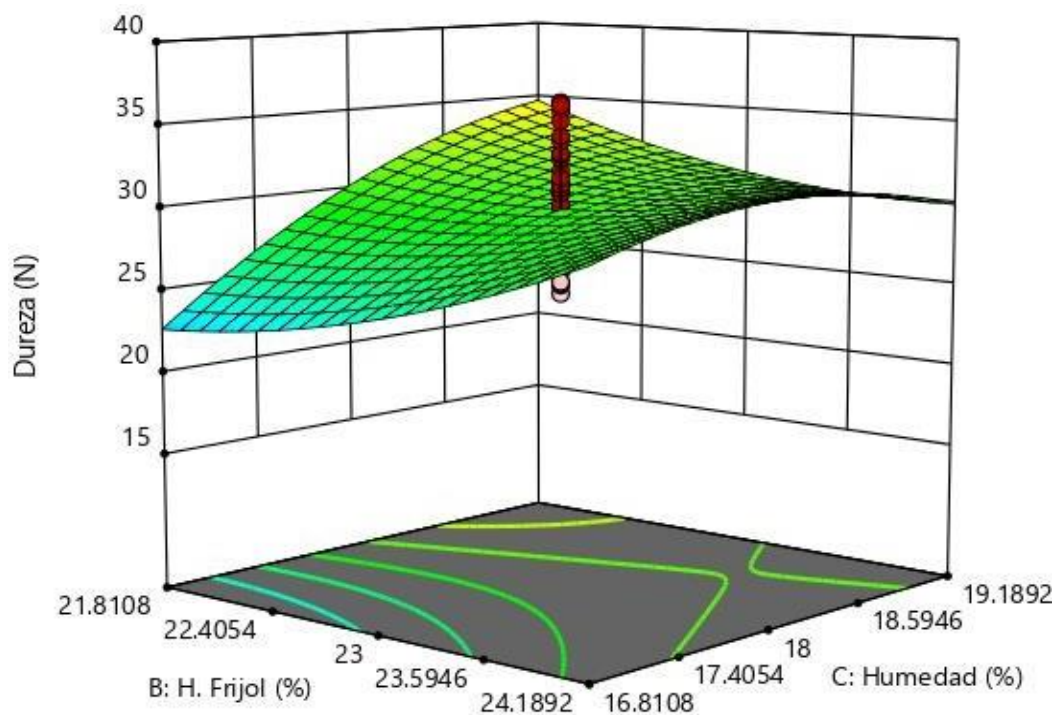


Figura 11. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de dureza de los extrudidos.

La dureza está inversamente relacionada con los valores de expansión en un producto extrudido. Altos valores de expansión generaran valores bajos de dureza y de densidad aparente en los productos (Neder-Suárez et al., 2023). En este estudio, como ya se mencionó, los valores mayores de dureza (39.645 N) se observaron a mayores humedades de alimentación, lo cual coincide con el trabajo reportado por Llopart (2012) en un producto de sorgo integral, donde la mayor dureza se encontró a mayor porcentaje de humedad (19%), observando una relación directa del aumento de la dureza con el incremento de la humedad. Por otro lado, los valores menores de dureza se encontraron a menor porcentaje de humedad y mayor concentración de harina de chíá, esto puede deberse al contenido de fibra de la harina de chíá, debido a que los productos extrudidos que incluyen fibra tienden a presentar mayor densidad y dureza, con una menor expansión (Gómez-López, 2013), esto sucede porque la fibra tiende a retener agua en la matriz, lo que reduce la generación de vapor (Galindo-Lujan, 2018), reduciendo así la expansión del producto y por lo tanto aumentando su dureza (Gómez-López, 2013).

Oliveira (2015) también encontró que en extrudidos de arroz y lupino, las formulaciones con mayor contenido de harina de lupino presentaron mayor dureza y menor expansión debido al contenido de fibra.

Aparte de la fibra, también las proteínas afectan la dureza, Neder-Suárez et al. (2023) encontraron que la dureza tiende a aumentar al incrementar el contenido de proteína y reducir el contenido de almidón, justo como ocurre en la botana de este estudio donde la dureza aumenta al incrementar el contenido de frijol y por consecuencia la fuente de proteína.

En la investigación de Pérez-Ramos *et al.* (2017), donde se elaboró y analizó un producto extrudido a partir de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*), tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) y camote (*Ipomoea batatas L.*), los valores mínimos de dureza (8.29 y 15.59 N) se encontraron donde la concentración de la harina de la leguminosa tarwi fue menor, y la de fécula de camote fue mayor, por lo cual los autores atribuyeron los mayores valores de dureza a una mayor cantidad de harina de tarwi, esto se debe al elevado contenido proteico del tarwi, las proteínas afectan la distribución del agua en la matriz del alimento y se desnaturalizan, aumentando la dureza del extrudido y disminuyendo su expansión.

Respecto al contenido de chía, y de acuerdo al presente estudio en donde se observa que la dureza de la botana desarrollada incrementa conforme aumenta el contenido de chía y de humedad, se ha documentado que la incorporación de fibra dietética en los productos extrudidos da lugar a texturas más duras, reduce significativamente el índice de expansión y aumenta la densidad aparente (Camacho-Hernández, 2014).

7.3.3 Densidad aparente

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores de densidad aparente (DA) de los productos extrudidos (Tabla 5) mostraron que las variables concentración de harina de chíá, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación, en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$ y $p \geq 0.1$).

La densidad aparente de los alimentos es un punto importante al momento de analizar las características fisicoquímicas de un producto alimenticio. Es el cociente entre la masa y el volumen del alimento, incluyendo el aire en su interior, este dato y el de la densidad absoluta permite estimar la porosidad del alimento (Talens, 2020). En el caso de los productos extrudidos desarrollados, se observó una mayor densidad aparente (0.0036 g/cm^3) a mayores concentraciones de harina de frijol y de harina de chíá. Por el contrario, una menor densidad aparente (0.0021 g/cm^3) se encontró a menor contenido de chíá y a concentraciones intermedias de harina de frijol (Figura 12).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que los mayores valores de densidad aparente se encontraron a mayores humedades de alimentación y mayor concentración de harina de chíá, mientras que los menores valores se observaron a menor humedad de alimentación y menor concentración de harina de chíá (Figura 13).

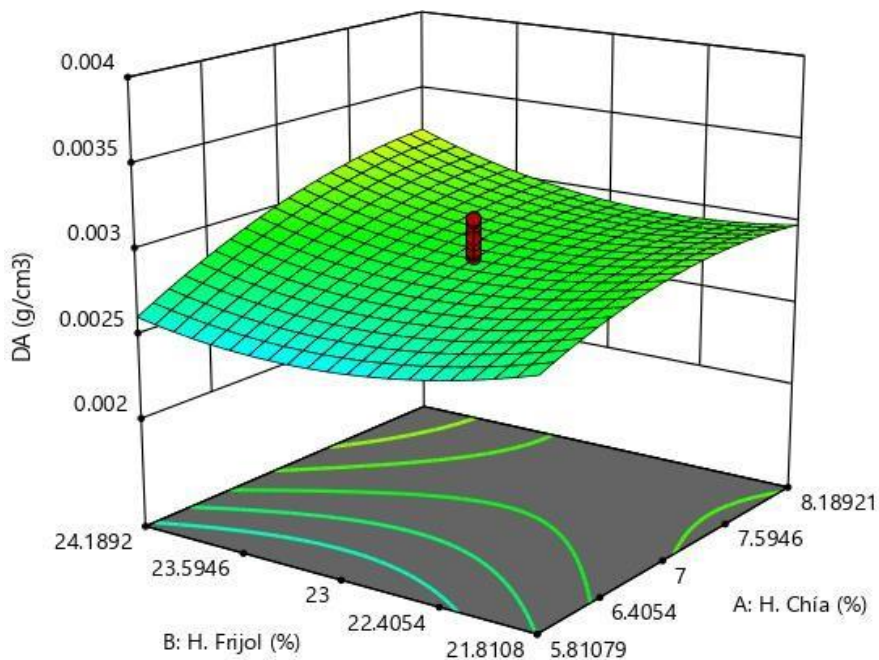


Figura 12. Efecto de la concentración de harina de frijol y harina de chíá sobre los valores de densidad aparente (DA) de los extrudidos.

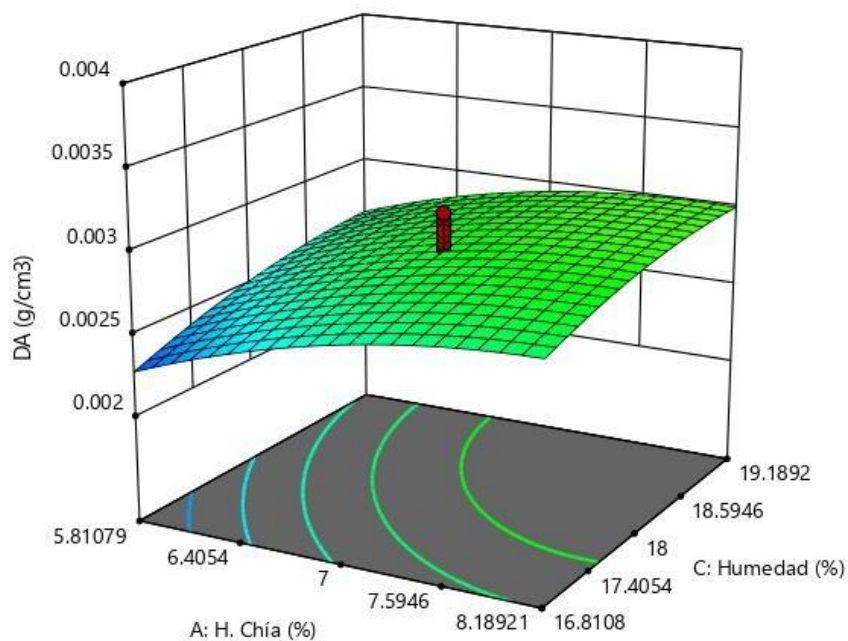


Figura 13. Efecto de la concentración de harina de chíá y de la humedad de alimentación sobre los valores de densidad aparente (DA) de los extrudidos.

En el caso de la relación de la harina de frijol y de la humedad de alimentación (Figura 14), la mayor densidad aparente se encontró a altas humedades y bajas concentraciones

de harina de frijol. Mientras que los menores valores de densidad se obtuvieron a baja humedad de alimentación y baja concentración de harina de frijol.

Resultados similares fueron encontrados por Pérez-Navarrete *et al.* (2006), quienes trabajaron con distintas mezclas de harinas de maíz QPM (*Zea mays L.*) y frijol lima (*Phaseolus lunatus L.*) en donde identificaron que las mezclas con mayor contenido de harina de frijol presentaban mayor densidad, sugiriendo que es debido a la cantidad de amilosa que está presente en el maíz QPM y a la proteína del frijol, por lo que el aumento significativo de la densidad, lo atribuyen a la proteína empleada. También Hernández-Nava *et al.* (2011), desarrollaron extrudidos con harinas extrudidas de lenteja y de plátano y reportaron que la mayor densidad aparente se obtuvo en mezclas con mayores concentraciones de harina de lentejas y con elevado porcentaje de humedad.

En general los resultados encontrados en la densidad aparente de los productos desarrollados en esta investigación mostraron que el valor máximo se encontró a mayores humedades y el valor mínimo a menores humedades (Figuras 13 y 14), lo cual hace suponer que a mayor humedad, mayor dureza, mayor densidad aparente y menor índice de expansión. Por el contrario, a menor humedad, menor dureza, menor densidad aparente y mayor índice de expansión, indicando que tanto la densidad aparente como el índice de expansión, son inversamente proporcionales.

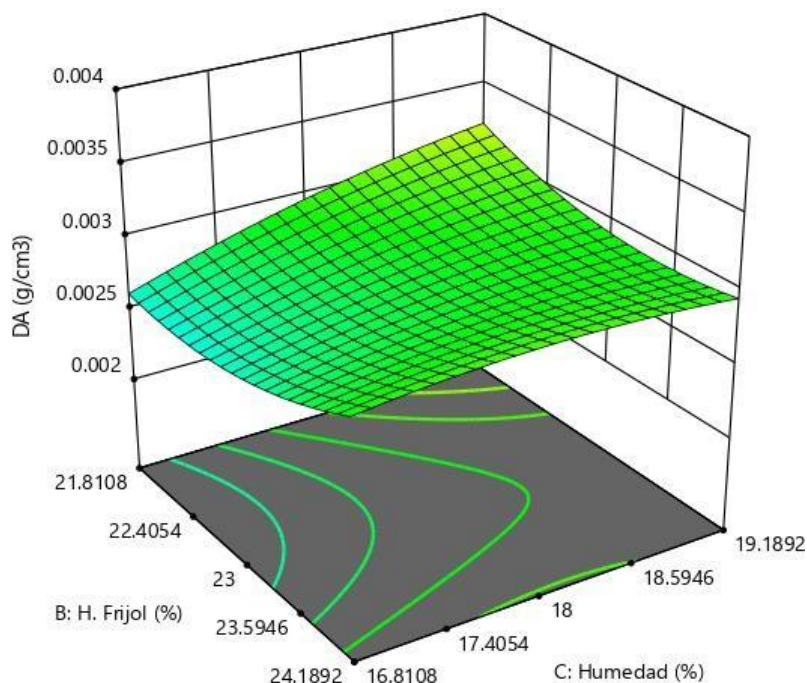


Figura 14. Efecto de la concentración de harina de frijol y de la humedad de alimentación sobre los valores de densidad aparente de los extrudidos.

Norajit *et al.* (2011), prepararon productos extrudidos con harina de arroz y harina de cáñamo (desgrasada y sin desgrasar), fuente de proteínas, carbohidratos, ácidos grasos y de antioxidantes (Encinas-Monge, 2022). Las mezclas tenían una concentración de harina de cáñamo desde 0 a 40%. Los mismos autores reportaron que la densidad aparente aumentaba conforme incrementaba la concentración de harina de cáñamo y disminuía cuando el porcentaje de esta harina era menor, asegurando que en un extrudido la densidad aparente es inversamente proporcional a la expansión de un producto.

Al aumentar la harina de cáñamo se genera una compactación sobre el producto, de esta manera incrementa la densidad aparte y por consecuencia disminuye el índice de expansión. Estos resultados son similares a esta investigación, donde al aumentar la concentración de harina de frijol y de chíá, aumenta la densidad aparente y disminuye el índice de expansión y también esto concuerda con lo reportado por Neder-Suárez *et al.* (2023) quienes elaboraron un alimento extrudido de maíz azul, espinaca y frijol negro y encontraron que la densidad se relacionó inversamente con el grado de expansión.

7.4 Antioxidantes

La Tabla 6 presenta el análisis de varianza de los productos obtenidos por extrusión para las respuestas de la capacidad antioxidante medida por los radicales ABTS y DPPH, además de la cuantificación de fenoles totales. Se observó que el modelo de regresión cuadrático utilizado para ABTS, DPPH y fenoles totales fue significativo, con valores de R^2 ajustada >0.3402 coeficientes de variación $<7.86\%$, p de F del modelo <0.0029 y falta de ajuste para las 3 respuestas.

Tabla 6. Análisis de varianza para las respuestas de los radicales ABTS, DPPH y fenoles totales de los productos extrudidos

Respuesta	R2 ajustada	R2	C. V. (%)	Valor F	p de F (modelo)	Falta de ajuste
ABTS	0.4128	0.5144	5.83	5.06	0.0001	< 0.0001 significant
DPPH	0.7326	0.7849	7.86	15.00	< 0.0001 significant	0.0013 significant
Fenoles totales	0.3402	0.4721	6.95	3.58	0.0029 significant	< 0.0001 significant

7.4.1 Determinación de la capacidad antioxidante por el radical ABTS

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores de actividad antioxidante por radical ABTS de los productos extrudidos (Tabla 7), mostraron que las variables concentración de harina de chíá, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación, en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$ y $p \geq 0.1$).

Tabla 7. Coeficientes estimados del modelo ajustado y nivel de significancia para las respuestas de radical ABTS, radical DPPH y fenoles totales de los productos extrudidos.

Respuesta	Intercepto	Lineales			Interacción			Cuadráticos		
		b1 A	b2 B	b3 C	b12 AB	b13 AC	b23 BC	b11 A ²	b22 B ²	b33 C ²
Radical ABTS	667.84	15.4247	8.7874	- 13.523	- 0.8669	21.0129	10.2941	- 20.1456	- 1.8021	18.9607
	2	(0.0255)	(0.2086)	(0.0392)	(0.9199)	(0.0176)	(0.2359)	(0.0030)	(0.7907)	(0.0031)
	**	*	***	*	***	*	***	*	***	*
Radical DPPH	0.0013	0.0013	- 17.3427	- 6.9309	-16.0132	5.7140	4.5978	-20.5439	-14.2719	-
	*	(0.0013)	(<0.0001)	(0.0211)	(0.0002)	(0.1496)	(0.2511)	(<0.0001)	(<0.0001)	12.5914
		***	*	*	*	***	***	*	*	(<0.0001)
Fenoles totales	191.80	1.9299	2.6406	5.7341	- 4.5868	8.3281	- 7.1673	7.3838	0.1500	4.6865
	6	(0.4668)	(0.2531)	(0.0206)	(0.1407)	(0.0102)	(0.0249)	(0.0117)	(0.9493)	(0.0640)
	**	***	***	*	***	*	*	*	***	**

Modelo en el cual b1, b2 y b3 = chíá, frijol y humedad respectivamente para la ecuación: $Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + B_{11}X_{12} + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2$.

No. de muestras analizadas = 3

*=p < 0.05

**=0.05 ≤ p < 0.1

***=p ≥ 0.1

La capacidad antioxidante de ABTS (ácido 2,2'azinobis (6- sulfonato-3-etilbenzotiazolina)) determinada como equivalentes de trolox, mide la actividad antioxidante de compuestos hidrofílicos y lipofílicos; el espectro de este radical se mide a una absorbancia de 732 nm (Mercado-Mercado *et al.*, 2013). Este método evalúa la actividad antioxidante por reacciones de transferencia de electrones (Daniel, 2009). Por lo tanto, al realizar la prueba de ABTS para los productos extrudidos obtenidas en esta investigación, el valor más alto (761.23 mg E Trolox/ 100 g) del contenido de equivalentes de trolox se encontró a concentraciones intermedias de las harinas de chíá y de frijol (Figura 15). Por otro lado, el valor mínimo de equivalentes de trolox (558.15 mg E Trolox/ 100 g) se observó a concentraciones bajas de harinas de chíá y de frijol.

Respecto a la relación entre la harina de chíá y la humedad, el valor máximo de equivalentes de trolox se presentó a concentración intermedia de harina de chíá y baja humedad; mientras que el valor menor de equivalentes de trolox se observó a una concentración mínima de harina de chíá y un porcentaje de humedad alto (Figura 16).

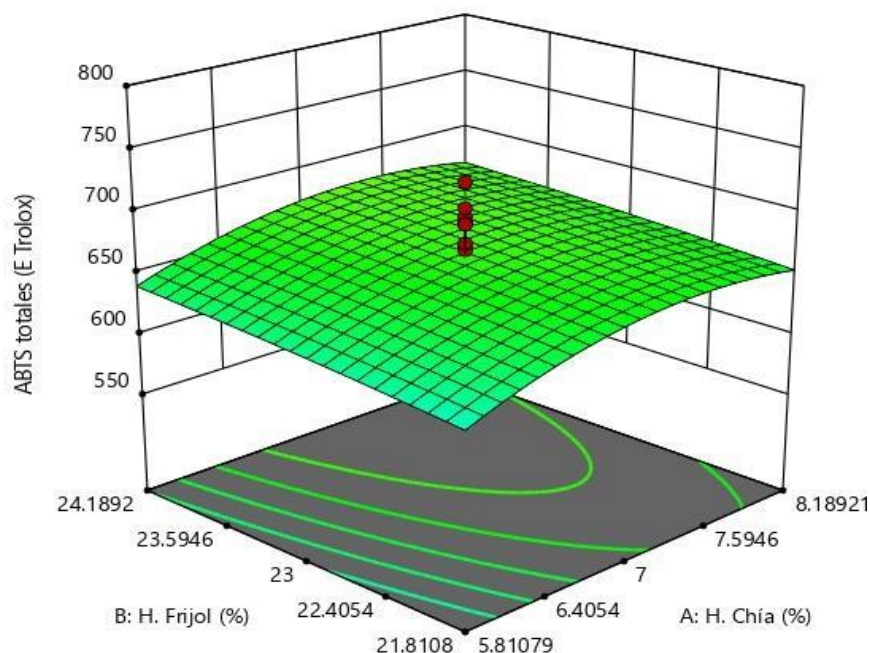


Figura 15. Efecto de la concentración de harina de frijol y harina de chíá sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos.

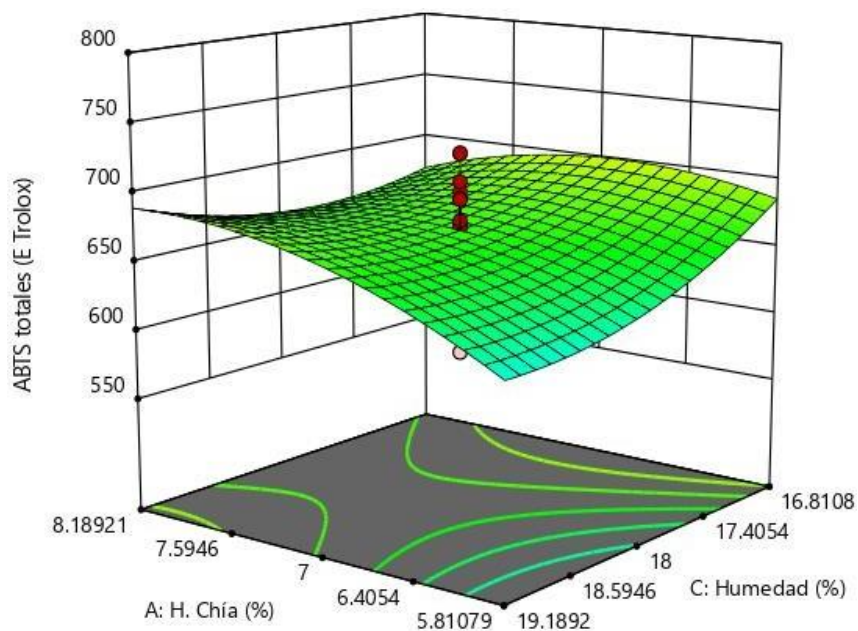


Figura 16. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos.

Por último, analizando la relación entre la harina de frijol y la humedad de alimentación, el valor máximo de equivalentes de trolox, se encontró a un porcentaje de humedad mínimo y a una baja concentración de harina de frijol. El valor mínimo de equivalentes de trolox se encontró a un porcentaje de humedad elevado y a una baja concentración de harina de frijol (Figura 17).

Por lo mencionado anteriormente, se observó que el resultado de la prueba de ABTS se vio afectado principalmente por el contenido de humedad de los extrudidos y posteriormente por las concentraciones de harina de chía y de harina de frijol utilizada para su formulación.

Estos resultados difieren de los obtenidos por Rivera (2011), quien elaboró botanas extrudidas con harinas de maíz y de frijol, donde la actividad antioxidante fue medida por las metodologías de DPPH y ABTS. Identificando para ambas pruebas que la inhibición aumentaba al incrementar el contenido de frijol en la mezcla hasta llegar a una proporción de 60 frijol/40 maíz.

Resultados que como se mencionó anteriormente, contrastan con lo obtenido en esta investigación, donde la mayor capacidad antioxidante del radical ABTS se dio a mínimas concentraciones de harina de frijol y de chíá, pero con elevado porcentaje de humedad.

Castro (2019), desarrolló una botana extrudida hecha de una mezcla de maíz azul y chíá, al analizar el perfil antioxidante mediante el método de ABTS identificó que los valores obtenidos se veían afectados por el contenido de chíá y no por el maíz azul, ya que esta tiene una elevada actividad antioxidante. Por su parte, el valor máximo de equivalentes de Trolox para la prueba de ABTS analizada en la botana presentada en esta investigación (frijol, maíz y chíá) se encontró a mayor humedad principalmente, y en segundo lugar se ve afectada por el contenido de frijol y de chíá.

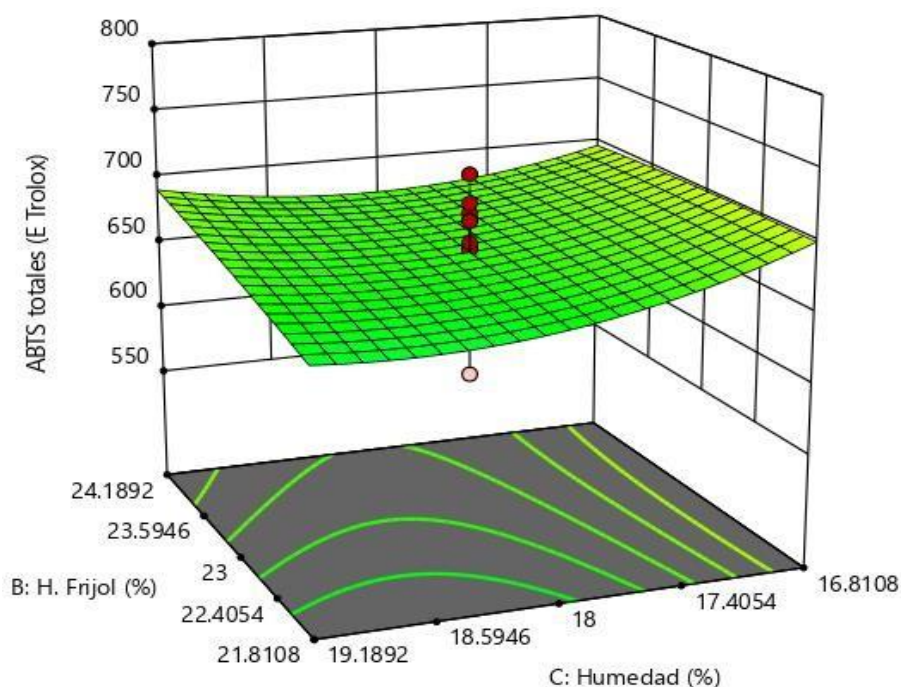


Figura 17. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de ABTS (equivalentes de Trolox) de los extrudidos.

7.4.2 Determinación de la capacidad antioxidante por el radical DPPH

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores de actividad antioxidante por radical DPPH para los productos extrudidos (Tabla 7) mostraron que las

variables (concentración de harina de chía, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación) en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$ y $p \geq 0.1$).

El DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) sólo puede disolverse en medio orgánico, por lo que mide preferentemente la capacidad antioxidante de compuestos poco polares (Mercado-Mercado *et al.*, 2013). Este radical no reacciona con flavonoides que no contienen grupos $-OH$ o con ácidos aromáticos que sólo contienen un grupo $-OH$ (Daniel, 2009).

El valor máximo de la capacidad antioxidante por DPPH (283.478 mg E AA/100 g) determinada como equivalentes de ácido ascórbico, se encontró a concentración alta de harina de chía y baja de harina de frijol; mientras que el valor mínimo (159.13 mg E AA/100 g) se observó a mayores concentraciones de harinas de chía y de frijol (Figura 18), esto tiene sentido, debido a que a mayor concentración de harinas con compuestos antioxidantes, la presencia de los radicales disminuye, puesto que los antioxidantes detienen la oxidación de las células para evitar la producción de los radicales libres (Batalla, 2007).

Para la interacción de la harina de chía y de la humedad, el valor máximo de equivalentes de ácido ascórbico se encontró a concentraciones intermedias de harina de chía y porcentajes de humedad intermedios. Mientras que el menor valor de equivalentes de ácido ascórbico fue observado a bajas concentraciones de harina de chía y altos porcentajes de humedad (Figura 19).

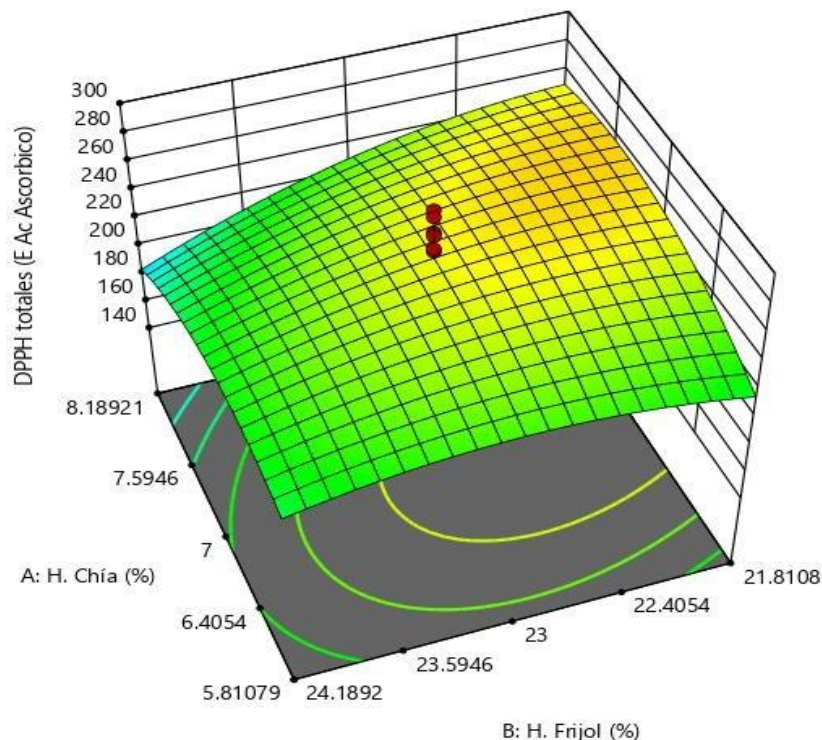


Figura 18. Efecto de las concentraciones de harina de chíá y de harina de frijol sobre los valores de DPPH (equivalentes de Ácido Ascórbico) de los extrudidos.

Finalmente, el valor más alto de equivalentes de ácido ascórbico se observó (Figura 20) a una concentración baja de harina de frijol y bajo porcentaje de humedad de alimentación. Por lo contrario, el valor mínimo se encontró a una concentración alta de harina de frijol y elevado porcentaje de humedad de alimentación.

Flores y Fredy (2023), reportaron que en extrudidos a base de calabaza (*Cucurbita moschata D*) y subproductos de arroz (*Oryza sativa L.*), los mayores valores de la capacidad antioxidante por DPPH se encontraron a alta humedad (aproximadamente 32%) y alto contenido de cascara de calabaza (14%). Esto concuerda con lo obtenido en este trabajo, donde se identificó mayor inhibición del radical a mayor humedad.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, en el cual se desarrollaron productos extrudidos a base de harinas de maíz, de frijol y de chíá, mostraron que un mayor contenido del radical DPPH medido como equivalentes de ácido ascórbico se presentó a condiciones de baja humedad de alimentación, contenido intermedio de

harina de chía y bajo contenido de harina de frijol. Por lo contrario, el menor contenido de los equivalentes de ácido ascórbico, se observaron a condiciones de máxima humedad de alimentación y mayores porcentajes de harinas de chía y de frijol. En relación a ello, Flores y Fredy (2023), reconocen que durante la extrusión, debido a la alta temperatura y el bajo contenido de humedad, los compuestos antioxidantes se transforman, reducen y disminuyen su extractabilidad, resultando una menor capacidad antioxidante.

Por su parte, Anton *et al.* (2009) determinaron a partir del análisis de mezclas de harinas extrudidas de maíz y frijol que sus resultados (0.28 ± 0.3 a 0.45 ± 1.7 $\mu\text{mol eq de Trolox/g}$) para el método DPPH eran dependientes del incremento o disminución del contenido de frijol, ya estos encontraron su punto más alto al incrementar el contenido de este. En este estudio se identificó que el contenido de la fuente de antioxidantes no es el principal factor, sino la humedad para obtener el punto máximo de la inhibición del radical.

González-Victoriano (2018), desarrolló una botana extrudida a partir de mezclas compuestas por grits de maíz y de harina de oca (*Oxalis tuberosa*), una papa rica en almidón, para la cual se obtuvo una mayor inhibición del radical DPPH conforme aumentaba la fuente de antioxidantes, ya que *Oxalis tuberosa* tiene propiedades antioxidantes, debido a su contenido de ácidos fenólicos, flavonas y antocianinas. De igual manera, se identificó una mayor inhibición del radical DPPH al aumentar la concentración de las fuentes de antioxidantes, sin embargo, en el producto desarrollado en este trabajo (botana de frijol, chía y maíz) se requiere de una mayor humedad de alimentación, además de la presencia de las fuentes de antioxidantes.

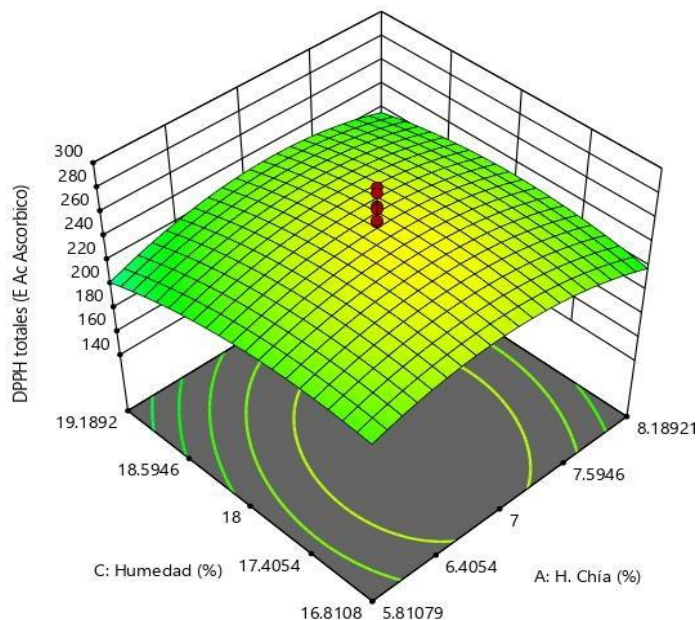


Figura 19. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de DPPH (equivalentes de ácido ascórbico) de los extrudidos.

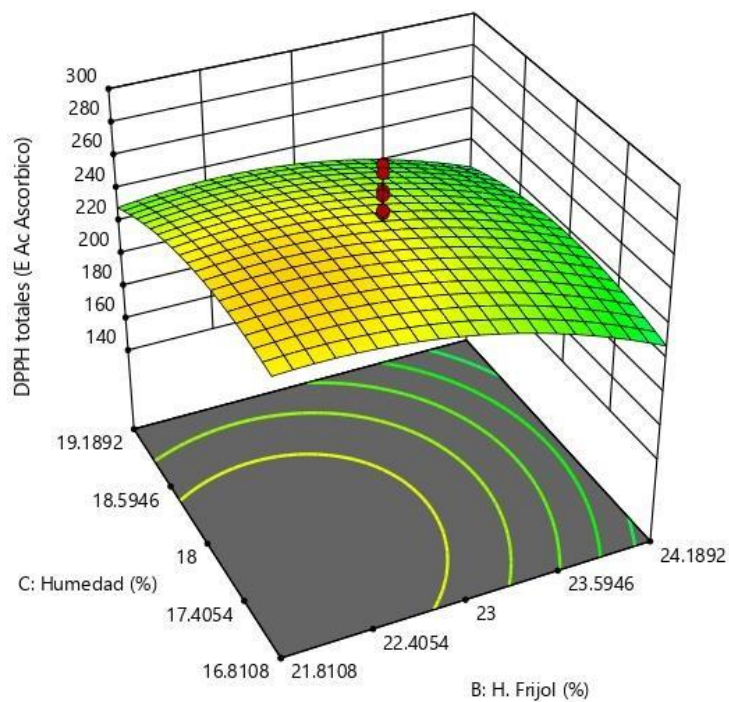


Figura 20. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de DPPH (equivalentes de ácido ascórbico) de los extrudidos.

7.4.3 Determinación de fenoles totales

Los coeficientes estimados del modelo cuadrático ajustado para los valores de actividad antioxidante de fenoles totales de los productos extrudidos (Tabla 7) mostraron que las variables (concentración de harina de chíá, concentración de harina de frijol y humedad de alimentación) en sus términos lineales, cuadráticos e interacciones presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0.05$ y $p \geq 0.1$).

El contenido de fenoles totales en esta investigación está expresado en equivalentes de ácido gálico. Al analizar la interacción entre las harinas de chíá y de frijol utilizadas en la elaboración de las botanas, se observó que el valor máximo (239.577 mg E AG/ 100 g) se encontró a una concentración alta de harina de frijol y concentración baja de harina de chíá; mientras que el valor mínimo de concentración de fenoles totales (171.912 mg E AG/100 g) se presentó a baja concentración de harina de frijol e intermedias concentraciones de harina de chíá (Figura 21).

Respecto a la interacción de la concentración harina de chíá y de la humedad de alimentación (Figura 22), el valor máximo de equivalentes de ácido gálico se observó a alta concentración de harina de chíá y elevadas humedades de alimentación; el valor mínimo de contenido de equivalentes de ácido gálico se encontró a concentración intermedia de harina de chíá y bajas humedades de alimentación.

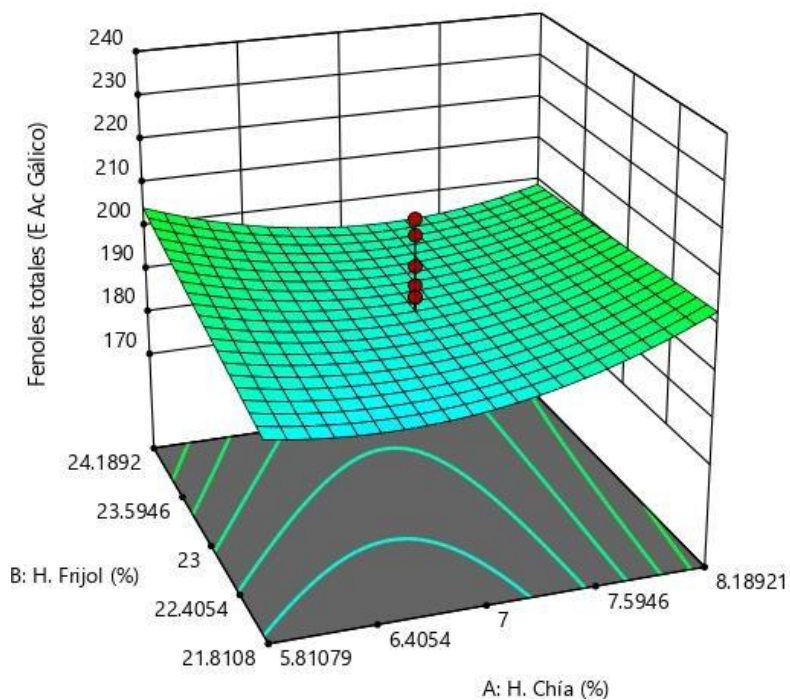


Figura 21. Efecto de las concentraciones de harina de chía y harina de frijol y sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.

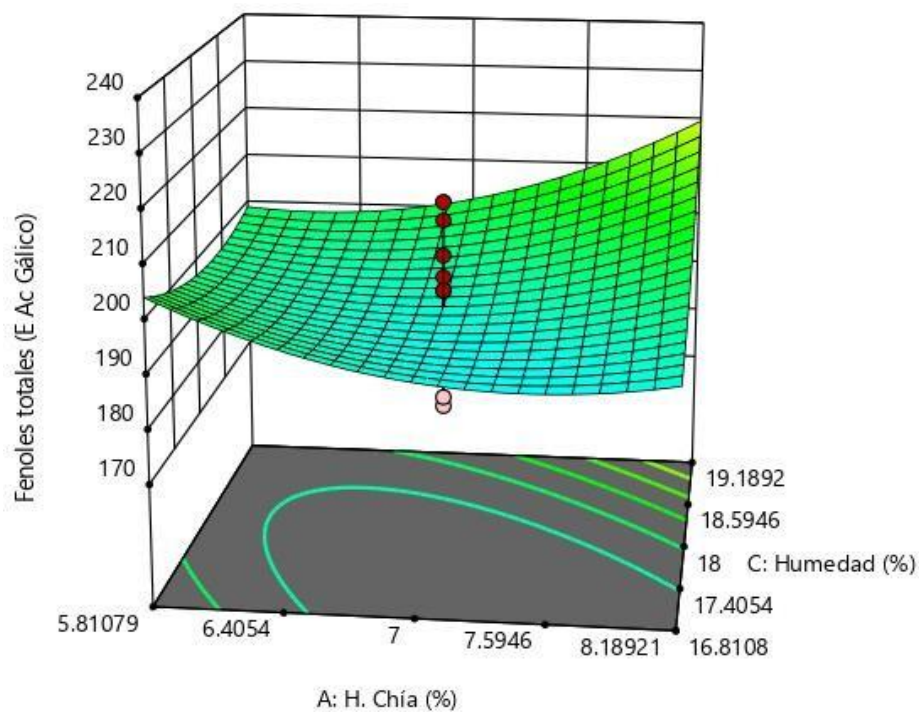


Figura 22. Efecto de la concentración de harina de chía y humedad de alimentación sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.

Con respecto a la interacción de la harina de frijol con la humedad de alimentación (Figura 23), se observó que el valor mayor del contenido de equivalentes de ácido gálico fue a concentración baja de harina de frijol y alto porcentaje de humedad, mientras que el menor valor se encontró a elevada concentración de harina de frijol y un porcentaje alto de humedad.

En la investigación realizada por González-Victoriano (2018), donde se trabajó con una botana extrudida elaborada a partir de mezclas de grits de maíz y de harina de oca (*Oxalis tuberosa*), el contenido de fenoles totales (expresados en equivalentes de ácido gálico) fue mayor en los productos que incorporaban mayor cantidad de harina de *Oxalis tuberosa*, debido a que este tubérculo es fuente de sustancias fitoquímicas como los ácidos fenólicos, flavonas y antocianinas. Sus resultados coinciden con los obtenidos en este trabajo (botana de maíz, frijol y chía), ya que el contenido de equivalentes de ácido gálico también incrementa proporcionalmente con el contenido de harina de frijol, fuente de compuestos fenólicos (Pérez-Pérez, 2020). Entre mayor sea la concentración presente de esta, los fenoles aumentan. De igual manera, la humedad tuvo un papel importante, ya que al aumentar ésta, aunque el contenido de las fuentes de antioxidantes no sea elevado, el contenido de fenoles se incrementa.

Respecto a una botana elaborada con harina extrudida de maíz y frijol presentada por Anton *et al.* (2009) se documentó que el contenido de fenoles totales incrementaba conforme a la proporción de frijol en la mezcla, sin mencionar el contenido de humedad, factor determinante para el aumento o disminución del contenido de fenoles en la botana (frijol, maíz y chía) analizada en este trabajo.

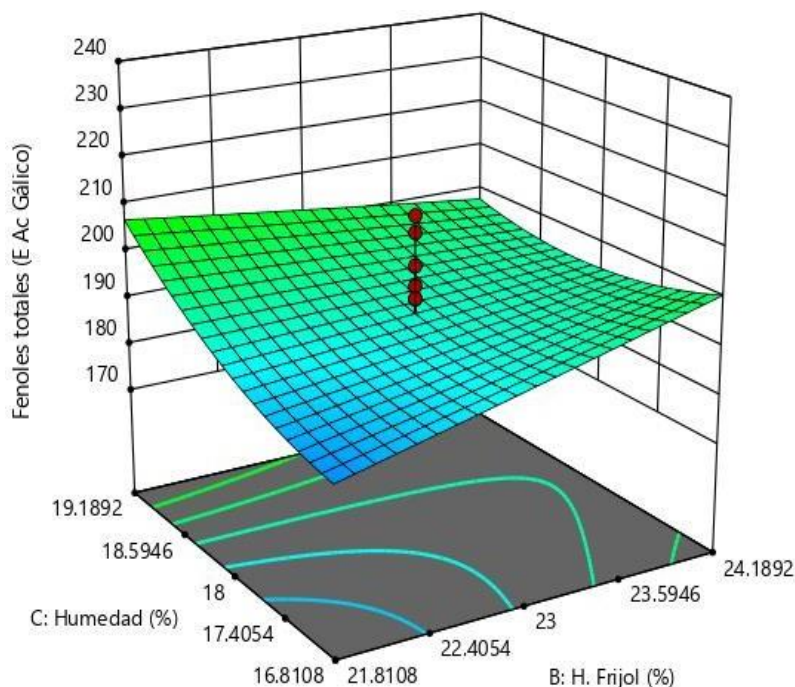


Figura 23. Efecto de la concentración de harina de frijol y humedad de alimentación sobre los valores de fenoles totales (equivalentes de ácido gálico) de los extrudidos.

En una botana extrudida elaborada con subproductos de arroz (*Oryza sativa L.*) y calabaza (*Cucurbita moschata D.*), también se identificó que el contenido de fenoles totales incrementó en las mezclas con mayor contenido de humedad (29%) y mayor contenido de cascara de calabaza (14%). Por lo que, también incrementó el contenido de fenoles totales al aumentar la humedad y la fuente antioxidante. Flores y Fredy (2023), atribuyen estos resultados a que la humedad pudo tener un efecto lubricante durante la extrusión, permitiendo que la mezcla se expusiera menos tiempo a altas temperaturas y así se evitara el daño termomecánico de los compuestos fenólicos. En el caso de bajo porcentaje de humedad, la fricción dentro del extrusor puede aumentar y liberar compuestos fenólicos ligados.

7.5 Optimización

En la Figura 24 se presenta la optimización realizada con la metodología de superposición de superficies de los productos extrudidos a base de harinas de chíya y de frijol, cuyas respuestas de optimización fueron IE, ABTS, DPPH y fenoles totales. La respuesta del software Design Expert versión 7.1.5 señala que el tratamiento ideal para alcanzar óptimos resultados de las variables tiene las siguientes condiciones, 7.54% de harina de chíya y 22.24% de harina de frijol. La optimización debe ser comprobada de manera práctica y experimental para confirmar los valores arrojados por el programa.

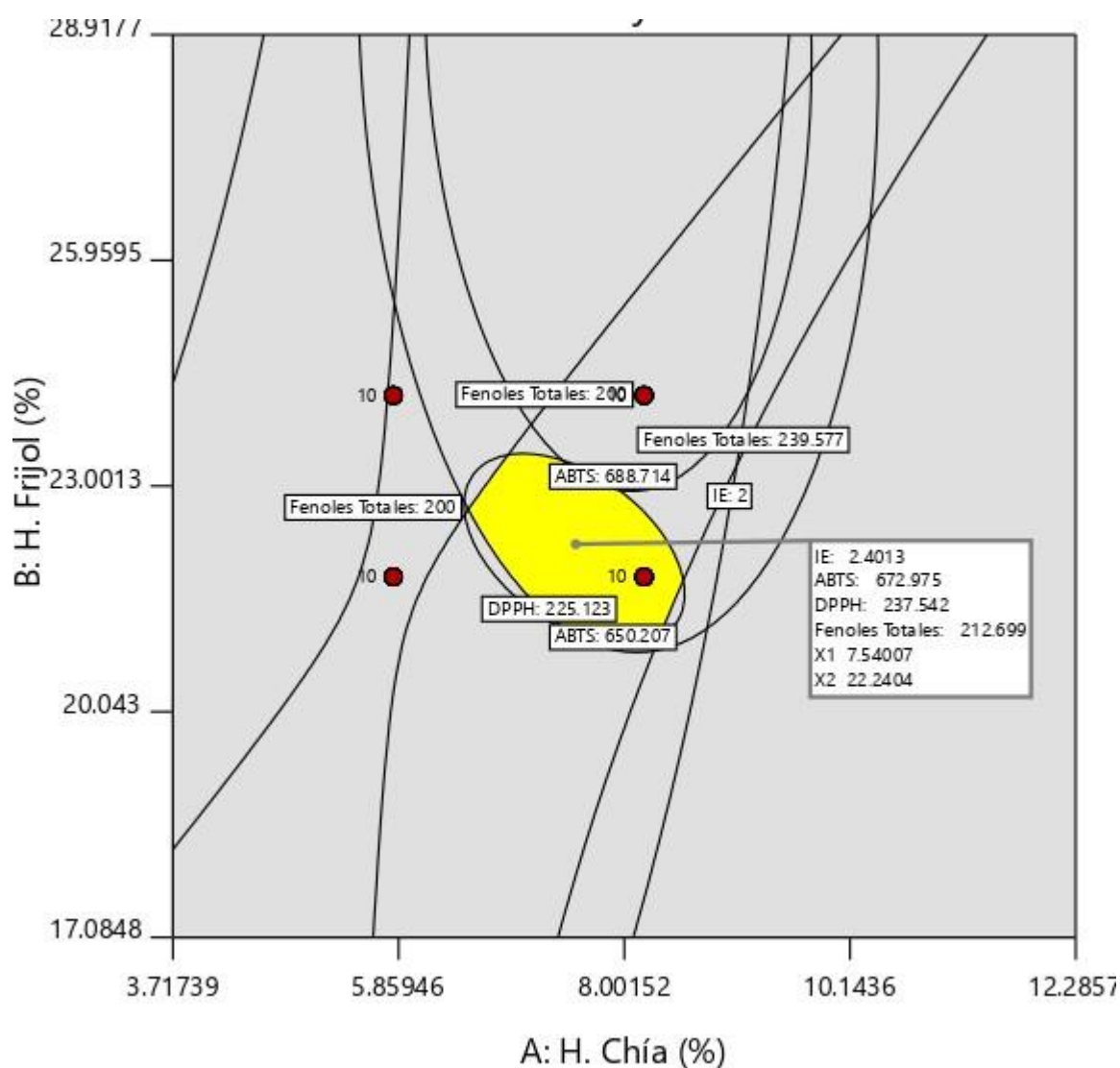


Figura 24. Región óptima de procesamiento y valores predichos para los productos extrudidos cuyas respuestas de optimización fueron IE, ABTS, DPPH y fenoles totales.

8. Conclusiones

Se logró el desarrollar un alimento funcional con antioxidantes a partir de mezclas de frijol, de chía y de maíz mediante el proceso de extrusión, el cual contribuya a mejorar problemas de salud como la obesidad, las enfermedades cardiovasculares, crónicas degenerativas y neurodegenerativas. Así mismo, se optimizó el proceso de extrusión para obtener un producto con propiedades fisicoquímicas adecuadas y elevada capacidad antioxidante.

El diseño experimental utilizado permitió la formulación del alimento extrudido con las proporciones adecuadas de harinas de frijol, de chía y de maíz para obtener las mejores características fisicoquímicas y elevada capacidad antioxidante para el alimento funcional.

Las propiedades fisicoquímicas evaluadas (IE, dureza y DA) y las interacciones de las harinas de maíz, de frijol y de chía, con la humedad de alimentación, dieron lugar a un producto en el cual el aumento de la humedad de alimentación, la dureza y la DA, disminuyó el IE. Por otro lado, la actividad antioxidante aumentó con la presencia de las harinas de frijol y de chía, así como el aumento de la humedad de alimentación.

La optimización del alimento funcional permitió encontrar la mejor formulación (7.540% de harina de chía y 22.240% de harina de frijol) para obtener un alimento funcional con un IE adecuado y elevados contenidos de antioxidantes. Sin embargo, es necesario realizar la optimización de manera experimental para comprobar los valores predichos por el programa donde se realizó la optimización y los valores experimentales.

9. Referencias bibliográficas

- Alvídrez-Morales, A., González-Martínez, B. E., & Jiménez-Salas, Z. (2002). Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. *Revista salud pública y Nutrición*, 3(3). <https://www.medigraphic.com/pdfs/revsalpubnut/spn-2002/spn023g.pdf>
- Andersone-Trezina, E., & Kince, T. (2022). Use of peas (*Pisum sativum* L.) and beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in high-moisture food extrusion: A review. *RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT*, 37.
- Anton, A. A., Fulcher, R. G., & Arntfield, S. D. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food chemistry*, 113(4), 989-996.
- Ávila-Ontiveros, M., Juárez-García, M., Mancillas-Medina, J., Leyva-Maldonado, A., y Zumaran-Alvarado, E. M. (2017). Desarrollo de un pay de harina de frijol negro San Luis con mermelada de chilacayote de altas propiedades nutricionales. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (71), 27-33. <https://doi.org/10.33064/iycuaa201771597>
- Bautista, J. M., Castro, A. A., Camarena, A. E., Wrobel, K., Wrobel, K., Alanís, G. G., y Da Mota, Z. V. (2007). Desarrollo de pan integral con soya, chía, linaza y ácido fólico como alimento funcional para la mujer. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 57(1), 78-84. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/67074693/pan_integral-libre.pdf?1620212662=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDesarrollo_de_pan_integral_con_soya_chi_a.pdf&Expires=1708492352&Signature=SA3rJCnENyN1gmG5jnWWywFE~KNR2cpF3ReYurK6vvvoyuiOPQNohqHDaPazibd3DFFZjbEGnzlkeCoL1KaR9ppz6f-vV0kkP7eNB0QNK-fZtQ6wLEOjvtcwWuTNbrfD87LuHpD7lt58rGNiWkvxiTAecZkhgwstN-znHzQFGVSADkRzGVQ5rx9GPIwfLHpsOYUBLhz3VPwFxFH48L-JX~~~FxWa0RHbplGF5ImWDtgDkN6fVgWm15oH0MT~adXdu9fw6CXZwa-PmVFeI5nHU9h8HNwDjbfYWylqDDJlul9nUjNmTIB9dSQc2Wml60WJBwWpxuQmdyvjHSR33LodUg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Batalla, M. V. (2007). Antioxidantes presentes en los alimentos: vitaminas, minerales y suplementos. *Offarm: farmacia y sociedad*, 26(10), 79-86. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5324583>
- Bedoya, R. A., & Maldonado, M. E. (2022). Características nutricionales y antioxidantes de la especie de frijol petaco (*Phaseolus coccineus*). *Revista chilena de nutrición*, 49(1), 34-42.
- Camacho-Hernández, IL, Zazueta-Morales, JJ, Gallegos-Infante, JA, Aguilar-Palazuelos, E., Rocha-Guzmán, NE, Navarro-Cortez, RO, ... Gómez-Aldapa, CA (2014). Efecto de las condiciones de extrusión sobre las características fisicoquímicas y el contenido de antocianinas de snacks de maíz azul de tercera generación. *CyTA - Journal of Food* , 12 (4), 320–330. <https://doi.org/10.1080/19476337.2013.861517>
- Castro, L. M., (2019). TESIS Desarrollo de una Botana Saludable a Partir de Maíz azul (*Zea mays* L) y Chía (*Salvia hispanica* L). (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Sinaloa).
- Chávez, R., Flores, T. Y., y Gallardo, N. (2005). Elaboración de Alimentos a Base de Fibra de Zanahoria por el Proceso de Extrusión. Guanajuato, Guanajuato.
- Creus, E. G. (2004). Compuestos fenólicos. *Offarm*, 23(6), 80-84. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35101196/Compuestos_fenolicos-libre.pdf?1413165699=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAMBITO_FARMACEUTICO.pdf&Expires=1708492578&Signature=g-1rblQUjTND7jFVkrKVBaANBTcWrCbnYAB0mcLTo7VqTJPOZhPQhGpPuZTFws72MtVtZ60~GRR1qhex0rxNHExLkGxiCkmxV2yxJXQauEM~1dXJ4dj990m8m~ueq3GvW3eEDjnEhEWQwfv7qQ5tStHGzXNQEwwAaOlcrgGmxYkA6dN2EIsZjc4~Tw58i1sxf9RzqwCyp61rs6Y3vr7GZfqlliQcaE8p4u8zsWYBVFhG4Bbyx7B6Cor0xlyX6ekX9zMDh5vq01IIP0K-29XZ129m8hbcTfDHApPVOvCHtpH5BIX4D4nS-OqCMBg0z1Ok4SEiaLt1wSDB1CUBvINpA_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Cruz-Lozano, H., Acevedo-Sandoval, O. A., Navarro-Cortez, R. O., Gómez-Aldapa, C. A., y Castro-Rosas, J. (2015). Elaboración de botanas funcionales por

- extrusión. Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP, 1(1).
<https://doi.org/10.29057/icap.v1i1.978>
- Cuevas, M. J. (2014). Maíz: Alimento fundamental en las tradiciones y costumbres mexicanas. *Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 425- 431.
<https://doi.org/10.25145/j.pasos.2014.12.030>
- Daniel, D. (2009). Determinación de antocianinas, fenoles totales y actividad antioxidante en licores y fruto de mora. [Tesis Ingeniería, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10876.pdf
- Di-Sapio, O., Bueno, M., Busilacchi, H., y Severín, C. (2008). Chía: importante antioxidante vegetal.
<https://rehip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/348d0206-b864-4cc9-b6b9-ab4b41cdbbb6/content>
- Encinas-Monge, E. (2022). Estudio de las propiedades de la harina de cáñamo y su aplicabilidad para el enriquecimiento de las galletas sin gluten.
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55686>
- FAO. (2022). Obtenido de Capitulo 2 Composición química y valor nutritivo del maíz:
<http://www.fao.org/3/t0395s/t0395s03.htm#:~:text=El%20componente%20qu%C3%ADmico%20principal%20del,3%20por%20ciento%20del%20grano>
- Fernández-Valenciano, A. F., y Sánchez-Chávez, E. (2017). Estudio de las propiedades fisicoquímicas y calidad nutricional en distintas variedades de frijol consumidas en México. *Nova scientia*, 9(18). 133-148.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052017000100133
- Ferreira, R. E., Chang, Y. K., and Steel, C. J. (2011). Influence of wheat bran addition and of thermoplastic extrusion process parameters on physical properties of corn-based expanded extruded snacks. *Brazilian Journal of Food & Nutrition/Alimentos e Nutrição*, 22(4).
<https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A10%3A20900202/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A77940636&crl=c>
- Flores, B., y Fredy, J. (2023). Caracterización fisicoquímica y nutraceutica de alimentos botana de segunda generación elaborados con subproductos de arroz (*Oryza sativa* L.) y calabaza (*Cucurbita moschata* D.) cv Cehualca. [Tesis de Maestría,

- Agosto 2007, 7, 15-20.
<https://www.iim.unam.mx/revista/pdf/numero07.pdf#page=19>
- Iniestra-González, J. J., Ibarra-Pérez, F. J., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., y González-Laredo, R. F. (2005). Factores antinutricios y actividad antioxidante en variedades mejoradas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*). *Agrociencia*, 39(6), 603-610. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239603.pdf>
- Lara- Flores, M. (2015). El cultivo del frijol en México. *Revista Digital Universitaria*. <https://www.revista.unam.mx/vol.16/num2/art09/>
- Llopart, E. E. (2012). Efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos (Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos). Universidad Nacional del Litoral Facultad de Ingeniería Química. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/319/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, E., Ortega, D. A., y Vinay, J. C. (1996). Caracterización de la calidad tecnológica y nutricional, de variedades mejoradas y criollas de frijol negro tropical (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 20-25. <https://doi.org/10.15517/am.v7i1.24784>
- Martínez-Álvarez, J. R., Gómez-Candela, C., y Villarino-Marín, A. (2006). Obesidad y alimentos funcionales: son eficaces los nuevos ingredientes y productos? *Revista de Medicina de la Universidad de Navarra*, 50(4), 31-38. <https://revistas.unav.edu/index.php/revista-de-medicina/article/view/7616/6669>
- Mercado-Mercado, G., Rosa Carrillo, L. D. L., Wall-Medrano, A., López Díaz, J. A., y Álvarez-Parrilla, E. (2013). Compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de especias típicas consumidas en México. *Nutrición hospitalaria*, 28(1), 36-46. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112013000100005#:~:text=En%20el%20m%C3%A9xico%20todo%20ABTS%2C%20tambi%C3%A9n,org%C3%A1nico%20por%20lo%20que%20mide Consultado el 29 de Agosto de 2023.
- Mex-Alvarez, R. M. J., Bolívar-Fernández, N. J., Garma-Quen, P. M., Tut-Heredia, J., y Romero-Guillén, K. I. (2013). Actividad antioxidante de cinco variedades de maíz cultivadas en Campeche, México. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 12(6), 558-571.

<https://www.redalyc.org/pdf/856/85629226001.pdf>

- Moreno-Espinoza, R. J., Reyes-Moreno, C., Gutiérrez-Dorado, R., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E., Mora-Rochín, S. y Perales-Sánchez, J. X. (2021). Alimento funcional para adultos mayores producido por extrusión a partir de granos integrales de maíz/frijol común. *Acta Universitaria*, 31, 1-18.
<https://doi.org/10.15174/au.2021.3217>
- Muller-Tito, K. E. (2015). Capacidad antioxidante y contenido de flavonoides entre las semillas de Chia Negra (*salvia nativa*) y Chia Blanca (*salvia hispánica* L.) Puno, Octubre 2014–enero 2015.
- Neder-Suárez, D., Rodríguez, J. V., Rodríguez-Roque, M. J., Hernández-Ochoa, L. R., Sánchez-Madrigal, M. A., Amaya-Guerra, C. A., & Quintero-Ramos, A. (2023). Características fisicoquímicas y sensoriales de productos extruidos y expandidos por microondas elaborados de maíz azul, espinacas y frijol negro. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 24-30.
- Norajit, K., Gu, B. J., and Ryu, G. H. (2011). Effects of the addition of hemp powder on the physicochemical properties and energy bar qualities of extruded rice. *Food chemistry*, 129(4), 1919-1925. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.06.002>
- Oliveira, C. T., Gutierrez, É. M. R., Caliari, M., Monteiro, M. R. P., Labanca, R. A., and Carreira, R. L. (2015). Development and characterization of extruded broken rice and lupine (*Lupinus albus*). *American Journal of Plant Sciences*, 6, 1928-1936.
<http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.612194>
- Pérez-Navarrete, C., Cruz-Estrada, R. H., Chel-Guerrero, L., y Betancur-Ancona, D. (2006). Caracterización física de extruidos preparados con mezclas de harinas de maíz QPM (*Zea mays* L.) y frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(2), 145-155.
<https://www.redalyc.org/pdf/620/62050205.pdf>
- Pérez-Pérez, L. M., Toro-Sánchez, C. L. D., Sánchez-Chávez, E., González-Vega, R. I., Reyes-Díaz, A., Borboa-Flores, J. and Flores-Cordova, M. A. (2020). Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal in vitro. *Biotechnia*, 22(1), 117-125. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i1.1159>
- Pérez-Ramos, K., Elías-Peñafiel, C., y Delgado-Soriano, V. (2017). Bocadito con alto contenido proteico: un extruido a partir de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.),

- tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) y camote (*Ipomoea batatas* L.). *Scientia Agropecuaria*, 8(4), 377-388. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.04.09>
- Reynoso-Noverón, N., y Mohar, A. (2014). El cáncer en México: propuestas para su control. *Salud pública de México*, 56, 418-420. https://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/spm/v56n5/v56n5a2.pdf
- Rioja-Antezana, A. P., Vizaluque, B. E., Aliaga-Rossel, E., Tejeda, L., Book, O., Mollinedo, P., y Peñarrieta, J. M. (2018). Determinación de la capacidad antioxidante total, fenoles totales, y la actividad enzimática en una bebida no láctea en base a granos de *chenopodium quinoa*. *Revista Boliviana de Química*, 35(5), 168-176. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S0250-54602018000500006&script=sci_arttext
- Rivera, C. D. M. (2011). Elaboración, evaluación nutrimental y nutracéutica de una botana a partir de harinas extrudidas maíz/frijol. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/614/1/RI003724.pdf>
- Rochín-Medina, J. J., Mora-Rochín, S., Navarro-Cortez, R. O., Tovar-Jimenez, X., Quiñones-Reyes, G., Ayala-Luján, J. L., y Aguayo-Rojas, J. (2021). Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sembradas en el estado de Zacatecas. *Acta universitaria*, 31. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3059>
- Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I. I., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C. E., Delgado-Licon, E., and Vivar-Vera, M. A. (2011). Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *LWT-Food Science and Technology*, 44(3), 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.06.036>
- Rokey, G. (1995). Tecnología de la Extrusión e Implicaciones Nutricionales. *Curso de Especialización FEDNA Avances en nutrición y alimentación animal*, 11, 270-286. https://www.researchgate.net/profile/Galen-Rokey/publication/28180459_Tecnologia_de_la_extrusion_e_implicaciones_nutricionales/links/00b4952e66dea63deb000000/Tecnologia-de-la-extrusion-e-implicaciones-nutricionales.pdf
- Sánchez, Y. G., Cruz-Martín, M., Sánchez-García, C., Leiva-Mora, M., Acosta-Suárez, M., Roque, B., & Alvarado-Capó, Y. (2016). Contenido de fenoles totales en la

- testa de las semillas de tres cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. *Biotecnología vegetal*, 16(2).
- Samaniego, V. M., Alonso, A. E., y Varela, M. G. (2009). Alimentos fortificados con ácido fólico comercializados en España: tipo de productos, cantidad de ácido fólico que proporcionan y población a la que van dirigidos. *Nutrición Hospitalaria*. 24(4), 459-466. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0212-16112009000400010&script=sci_arttext
- Sarmiento-Rubiano, L. (2006). Alimentos funcionales, una nueva alternativa de alimentación. *Orinoquia*, 10(1), 16–23. <https://doi.org/10.22579/20112629.194>
- Senna, C., Soares, L., Egea, M. B., & Fernandes, S. S. (2024). The Techno-Functionality of Chia Seed and Its Fractions as Ingredients for Meat Analogs. *Molecules*, 29(2), 440.
- Serrano, J., y Sánchez, G. (2008). Portal Regional BVS. Tendencias en alimentos funcionales contra la obesidad: ingredientes funcionales, alimentos modificados tecnológicamente y dietas completas. *Rev. Esp. Nutr. Comunitaria*
- Talens-Oliag, P. (2020). Determinación experimental de densidad y porosidad en alimentos sólidos y líquidos. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/144736/Talens%20-%20Determinaci%3b3n%20experimental%20de%20densidad%20y%20porosidad%20en%20alimentos%20s%3b3lidos%20y%20l%3badquidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vega, A. (2008). Desarrollo de un churro de arroz fortificado con fibra dietética en la Escuela Agrícola Panamericana el Zamorano (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2016).
- Zúñiga-Hernández, L. A., Ciro-Velásquez, H. J., y Osorio-Saraz, J. A. (2007). Estudio de la dureza del queso Edam por medio de análisis de perfil de textura y penetrometría por esfera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(1), 3797-3811. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472007000100012&script=sci_arttext