

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Botanas Saludables Elaboradas por Extrusión a Partir de Maíz Azul (*Zea mays* L) y Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.)

Healthy Snacks Made by Extrusion from Blue Corn (*Zea mays* L) and Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.)

Authors/Autores: Ramos-Ferra, C.F, Gutiérrez-Dorado, R.1, Perales-Sánchez, J.X.K., Aguilar-Palazuelos, E., García-Armenta, E., Félix-Medina, J.V., Preciado-Ortiz, R.

ID: e1696

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1696>

Received/Fecha de recepción: June 29th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: October 15th 2024

Available online/Fecha de publicación: November 13th 2024

Please cite this article as/Como citar este artículo: Ramos-Ferra, C.F, Gutiérrez-Dorado, R.1, Perales-Sánchez, J.X.K., Aguilar-Palazuelos, E., García-Armenta, E., Félix-Medina, J.V., Preciado-Ortiz, R. (2024). Healthy Snacks Made by Extrusion from Blue Corn (*Zea mays* L) and Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista Bio Ciencias*, 11, e1696. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1696>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Botanas Saludables Elaboradas por Extrusión a Partir de Maíz Azul (*Zea mays* L) y Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.)

Healthy Snacks Made by Extrusion from Blue Corn (*Zea mays* L) and Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.)

Botanas Saludables Extrudidas/Healthy Extruded Snacks

Ramos-Ferra, C.F.¹() , Gutiérrez-Dorado, R.^{1*}() , Perales-Sánchez, J.X.K.¹() , Aguilar-Palazuelos, E.¹() , García-Armenta, E.¹() , Félix-Medina, J.V.^{2,3}() , Preciado-Ortiz, R.⁴())

¹Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas, Nte 2771. 80030, Culiacán, Sinaloa, México. ² Instituto Tecnológico de Culiacán. Juan de Dios Bátiz, 488, Guadalupe. 80220, Culiacán, Sinaloa, México. ³ CONAHCYT-Ingeniería Agroindustrial. Universidad Politécnica del Mar y la Sierra. 8708, La Cruz, Sinaloa, México. ⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-Celaya), Celaya, Guanajuato, México.

*Corresponding Author:

[Roberto Gutiérrez-Dorado](mailto:rgutierrez@uas.edu.mx). Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas, Nte 2771. 80030, Culiacán, Sinaloa, México. Teléfono: (667) 231 1146. E-mail: rgutierrez@uas.edu.mx

RESUMEN

Actualmente, a nivel mundial, las personas demandan botanas más saludables. Los granos integrales de maíz azul y amaranto son una buena opción para mejorar la calidad nutrimental y nutracéutica de las botanas. Asimismo, los alimentos procesados por extrusión conservan sus propiedades nutricionales. Sin embargo, el uso de nuevos ingredientes requiere ajustar condiciones del proceso. En esta investigación, se optimizaron las condiciones del proceso de extrusión mediante la metodología de superficie de respuesta para alcanzar altos valores en características de textura, físicas, nutricionales y fitoquímicas. Se usó un diseño central compuesto rotatable, de acuerdo con el cual se prepararon mezclas de harinas de maíz azul y amaranto (0-70 % amaranto). Las mezclas se procesaron variando la temperatura de extrusión (120-170 °C) y la velocidad del tornillo (50-240 rpm). A las botanas se les evaluó: índice de expansión radial (REI), densidad aparente (AD), dureza (H), compuestos fenólicos totales (TPC), flavonoides totales (TF), actividad antioxidante (AoxA) y digestibilidad proteínica *in vitro* (IVPD). Se obtuvieron dos distintas combinaciones de variables de proceso: 162 °C, 240 rpm, 12.7 % amaranto; y 170 °C, 240 rpm, 29 % amaranto. Las botanas obtenidas tuvieron máximo REI, TPC, TF, AoxA e IVPD, y mínima AD y H.

PALABRAS CLAVE:

Bocadillos, alimentos funcionales, calidad proteínica, *Zea mays* L., *Amaranthus hypochondriacus* L.

ABSTRACT

Globally, there is an increasing demand for healthier snacks. Whole grains such as blue corn and amaranth offer a favorable option to improve the nutritional and nutraceutical quality of snacks. Moreover, extrusion-processed foods retain their nutritional properties. However, the use of new ingredients requires adjustments to the process conditions. This research optimized extrusion process conditions using response surface methodology to achieve high values for textural, physical, nutritional, and phytochemical characteristics. A rotatable central composite design was employed, according to which blends of blue corn and amaranth flours (0-70 % amaranth) were prepared. The blends were processed by varying the barrel temperature (120-170 °C) and screw speed (50-240 rpm). The snacks were evaluated for radial expansion index (REI), apparent density (AD), hardness (H), total phenolic compounds (TPC), total flavonoids (TF), antioxidant activity (AoxA), and *in vitro* protein digestibility (IVPD). Two optimal process variable combinations were obtained: 162 °C, 240 rpm, 12.7 % amaranth; and 170 °C, 240 rpm, 29 % amaranth. The resulting snacks exhibited maximum REI, TPC, TF, AoxA, and IVPD values, and minimum AD and H values.

KEYWORDS

Snacks, functional foods, quality protein, *Zea mays* L., *Amaranthus hypochondriacus* L.

Introducción

Las botanas de segunda generación son un tipo de alimento preparado que se consume entre comidas con el fin de proporcionar saciedad, entretener o degustar al consumidor. Sin embargo, la mayoría de los productos de este tipo son elaborados a base de almidón de maíz o fracciones de maíz ricas en almidón, y aditivos como azúcares y grasas, por los cuales tienen pobre calidad nutrimental y alto índice calórico. Debido a esto, las botanas se han relacionado con la prevalencia de malnutrición, la cual es una condición física no deseable ocasionada por la falta o el exceso de nutrimentos, además de la incidencia de obesidad y enfermedades crónico-degenerativas como diabetes mellitus, hígado graso y algunos tipos de cáncer (Shah *et al.*, 2018).

Hoy en día ha habido un creciente interés en el uso de granos enteros como materia prima para el desarrollo de productos alimentarios de alto consumo (tortillas, botanas, pastas, etc.) con buen aporte nutrimental y nutracéutico que ofrezca beneficios para la salud y prevención de enfermedades crónico degenerativas, tales como compuestos bioactivos con potencial antioxidante; además de la implementación de tecnologías emergentes (tecnologías innovadoras o en desarrollo que necesitan ser investigadas para analizar su posible impacto social, económico y/o ambiental, así como sus posibles mejoras y soluciones) en la elaboración de alimentos con el fin de conservar o transformar algunos nutrimentos y compuestos con actividad antioxidante. Una tecnología que actualmente se utiliza mucho en la elaboración de botanas expandidas es la extrusión. La extrusión es un proceso que somete al alimento a operaciones simultáneas de corte, mezclado y cocción causando diversas transformaciones en los componentes del alimento, por ejemplo, desnaturalización de proteínas, gelatinización del almidón, oxidación de lípidos,

degradación de vitaminas y compuestos antioxidantes o generación de estos últimos (Leonard *et al.*, 2019). Anteriormente, (Félix *et al.*, 2021) elaboraron botanas expandidas por medio de extrusión a base de maíz y frijol, obteniendo un producto mejorado nutricionalmente, debido al aumento de proteína, complemento de aminoácidos esenciales y mejora de la digestibilidad de la proteína, y con propiedades antioxidantes que podrían reducir la prevalencia de enfermedades crónico-degenerativas (Herrera *et al.*, 2017). Por otro lado, (Espinoza *et al.*, 2016) elaboraron botanas producidas por extrusión a partir de maíz transgénico y frijol negro común, obteniendo un producto con mayor contenido de proteína, fibra y compuestos fenólicos en comparación a botanas de este tipo que se encuentran en el mercado.

El maíz es una de las fuentes de almidón más utilizadas en la investigación y en la industria alimentaria, y entre sus diferentes razas destaca el maíz azul frente a otros granos o variedades de este mismo cereal debido a sus buenos contenidos en fibra, vitaminas, aminoácidos esenciales y compuestos con propiedades antioxidantes, lo que hace de este grano una buena materia prima para la elaboración de productos tipo botana (Escalante *et al.*, 2014; Herrera *et al.*, 2017); sin embargo, el maíz en general es deficiente en los aminoácidos esenciales lisina y triptófano, por lo que es necesario realizar una complementación de proteínas utilizando otros granos ricos en estos aminoácidos esenciales para incrementar el contenido de los mismos en la mezcla de granos, y con ello acercarnos a los requerimientos de aminoácidos esenciales que deben de cumplir las proteínas de acuerdo al estándar de la FAO. Uno de los granos que se ha reportado en la literatura con altos valores de lisina y triptófano es el amaranto, además de ser también una fuente rica en vitaminas, minerales y fitoquímicos (USDA, 2018; Soriano *et al.*, 2019), no obstante, la inclusión de este grano puede afectar las características sensoriales y tecnofuncionales del producto final, por lo que es necesario optimizar las variables de proceso con el fin de obtener una botana expandida con alto valor antioxidante y de digestibilidad proteínica, así como, características físicas y de textura adecuadas para una botana de segunda generación. De acuerdo con lo anterior mencionado, el objetivo de esta investigación fue optimizar las condiciones de extrusión y la proporción de maíz azul-amaranto para desarrollar una botana expandida con buenas características antioxidantes, de contenido de fitoquímicos, de digestibilidad proteínica y de textura a partir de mezclas de granos enteros de maíz azul y amaranto.

Material y métodos

Materiales

Se utilizaron granos de maíz azul (*Zea mays* L.) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) obtenidos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Celaya, Guanajuato, México y del mercado en Temoac, Morelos, México, respectivamente. Por otra parte se utilizaron los siguientes reactivos y solventes: hidróxido de sodio (NaOH), ácido clorhídrico (HCl), etanol (C₂H₆O), metanol (CH₃OH), hexano (C₆H₁₄), acetato de etilo (C₄H₈O₂), carbonato de sodio (Na₂CO₃), reactivo Folin-Ciocalteu, ácido gálico, nitrito de sodio (NaNO₂), cloruro de aluminio (AlCl₃), persulfato de potasio (K₂S₂O₈), ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS), fosfato de potasio monobásico (KH₂PO₄), fosfato disódico anhidro (Na₂HPO₄), pepsina, pancreatina, ácido tricloroacético (C₂HCl₃O₂), sulfato de potasio (K₂SO₄), sulfato cúprico (CuSO₄), ácido sulfúrico

(H₂SO₄) y caseína, los cuales fueron adquiridos en la casa comercial Macerlab en Culiacán, Sinaloa.

Métodos

Preparación y obtención de las muestras

En la presente investigación se desarrollaron botanas a base de granos integrales de maíz azul, amaranto y agua, sin la utilización de otros ingredientes adicionales. Los granos de maíz azul y amaranto se fragmentaron hasta obtener harinas que pasen a través de una malla #40 (0.425 mm), las cuales se mezclaron en proporciones de harina de amaranto (AF) = 0 - 70 % y se acondicionaron a 18 % de humedad añadiendo agua purificada. La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple modelo 20 DN (CW Brabender Instruments, Inc, NJ, EE. UU.) con diámetro de tornillo de 19 mm, relación longitud a diámetro de 20:1, razón de compresión nominal 3:1 y dado de salida con 5 mm de apertura. Asimismo, se emplearon diferentes condiciones de temperatura de extrusión (BT) = 120 - 170 °C y velocidad de tornillo (SS) = 50 - 240 rpm (Félix *et al.*, 2020). Las botanas extrudidas expandidas (EES) se recolectaron y empaquetaron para evaluar tres características de calidad: índice de expansión radial (REI), densidad aparente (AD) y dureza (H). Posteriormente, los extrudidos se secaron a temperatura ambiente, se molieron en un molino de martillos (LM 3100, EE. UU.) hasta pasar por una malla #80 (0.180 mm), y a las harinas obtenidas se les evaluaron cuatro propiedades: actividad antioxidante (AoxA), compuestos fenólicos totales (TPC), flavonoides totales (TF) y digestibilidad proteínica *in vitro* (IVPD).

Evaluación de las variables de respuesta

Índice de expansión radial (REI), densidad aparente (AD) y dureza (H)

Las botanas expandidas se cortaron en muestras de 5 cm de longitud y se seleccionaron 10 al azar para tomar medidas de diámetro y peso. El valor de REI se obtuvo dividiendo el diámetro de la botana expandida entre la apertura del dado de salida del extrusor (Gujska & Khan, 1990) y el valor de AD se obtuvo con la siguiente ecuación (Wang *et al.*, 1993):

$$AD = \frac{sw}{\pi(0.5d)^2(l)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: *sw* = peso de la muestra (g), *d* = diámetro promedio de la muestra (cm) y *l* = longitud de la muestra (cm).

Para la determinación de H se empleó la técnica descrita por (Park *et al.*, 1993). Se utilizó un Texturómetro Universal Modelo 4411 y una punta de 1 mm de diámetro para medir la fuerza necesaria para penetrar el 60 % de la botana expandida. Las condiciones de medición fueron: carga de 500 kgf para penetrar, velocidad de avance 2 mm/s. Se realizaron 90 mediciones de H.

Contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante

Obtención de extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

La extracción de los compuestos fenólicos libres se realizó suspendiendo 0.5 g de muestra en 10 mL de una mezcla de etanol y agua (80:20 %, v/v) (Dewanto *et al.*, 2002). La muestra suspendida se agitó en un homogeneizador rotativo circular de tubos (50 rpm, 10 min), posteriormente se centrifugó (8000 rpm, 10 °C, 10 min) y a la pastilla remanente se le realizó una segunda extracción con etanol al 80 %; el sobrenadante de las dos extracciones se concentró a 45 °C usando equipo a presión baja (Apud Vac Concentrator, Thermo Elector Corporation), y los extractos recuperados se evaporaron a 45 °C hasta sequedad (1 - 2 noches) y se almacenaron a -20 °C hasta su uso. Los sedimentos obtenidos después de la extracción de compuestos fenólicos libres se desgrasaron con hexano, posteriormente se hidrolizaron con 10 mL NaOH (2 M) a 95 °C y 25 °C durante 30 y 60 minutos, respectivamente, y se neutralizaron con HCl. Los extractos fenólicos ligados se obtuvieron con cuatro extracciones con 10 mL de acetato de etilo (Adom & Liu, 2002; Adom *et al.*, 2003). Los extractos se evaporaron y se almacenaron hasta su uso. Las extracciones de los compuestos fenólicos se realizaron por cuadruplicado.

Contenido de compuestos fenólicos totales

Para la determinación de TPC se preparó una solución estándar de ácido gálico, y se inyectaron 20 µL de solución estándar (25 - 600 ppm), y extractos libres y ligados sobre una microplaca de 96 posillos. Cada punto de la curva estándar y extracto se hizo reaccionar con 180 µL del reactivo Folin-Ciocalteu y 50 µL de Na₂CO₃ al 7 % para dejar incubar a 25 °C durante 90 minutos. La absorbancia de las muestras se leyó a 750 nm en un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (thermoscientific, Singapur) utilizando metanol como blanco, y los resultados de TPC se calcularon sumando los compuestos fenólicos presentes en los extractos libres y ligados como mg equivalentes de ácido gálico (GAE) / 100 g de muestra en base seca (ps) (Singleton *et al.*, 1999). Las determinaciones se realizaron por cuadruplicado.

Contenido de flavonoides totales

La determinación de TF se realizó con el ensayo colorimétrico descrito por (Xu & Chang 2007). Se mezclaron 20 µL de extracto con 80 µL de agua destilada, después se agregaron 6 µL de NaNO₂ y 12 µL de AlCl₃ reposando 5 minutos después de cada reactivo, y al final se añadieron 40 µL de NaOH 1 M con 20 µL de agua destilada. Los extractos se dejaron reposar durante 30 minutos y se leyeron a 415 nm en un lector de microplacas modelo Multiskan Skyhigh (thermoscientific, Singapur) utilizando quercetina como estándar para la curva de calibración. Las determinaciones se realizaron por cuadruplicado y los resultados se calcularon y expresaron como mg equivalentes de quercetina (QE) / 100 g de muestra (ps).

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó mediante el ensayo de decoloración descrito por (Re *et al.*, 1999). Se preparó una solución ABTS mezclando 0.0192 g del

radical en 5 mL de $K_2S_2O_8$ 2.45 mM, y se dejó reposar durante 16 h en oscuridad. Posteriormente, se diluyeron 500 μ L de la solución ABTS en 45 mL de una solución reguladora de fosfatos (PBS) pH = 7.4, y se ajustó su absorbancia a 0.7 - 1.0 a 734 nm. Una vez ajustada la absorbancia del radical, se añadieron 1980 μ L del radical ajustado a 20 μ L de extracto y se leyó su absorbancia a 734 nm en un lector de cubeta modelo Multiskan Skyhigh (thermoscientific, Singapur) 6 minutos después de haber colocado el radical. Las determinaciones se realizaron por cuadruplicado y los resultados se expresaron como μ mol equivalentes de Trolox (TE) / 100 g de muestra (ps).

Digestibilidad proteínica *in vitro*

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

$$IVPD (\%) = \frac{\text{Proteína total} - \text{Proteína en el residuo}}{\text{Proteína total}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Diseño experimental, análisis estadístico y optimización

Para la optimización de las condiciones del proceso de extrusión y el porcentaje de amaranto en la botana se utilizó un diseño experimental central compuesto rotatable con tres variables de proceso: temperatura de extrusión (BT, 120 - 170 °C), velocidad de tornillo (SS, 50 - 240 rpm) y proporción de harina de amaranto (AF, 0 - 70 %). Los valores mínimo y máximo de SS se seleccionaron de acuerdo a las características del extrusor, el cual opera un rango de 50 - 240 rpm, mientras que los valores mínimos y máximos de BT y AF se seleccionaron por medio de revisión de literatura y ensayos preliminares. En dicha revisión de literatura y ensayos preliminares se encontró que valores de BT mayores a 120 °C son necesarios para causar una expansión aceptable (similar a productos comerciales) en este tipo de botanas y valores por encima de 170 °C causan problemas de fluidez de la muestra dentro del extrusor, por lo tanto, que la salida del equipo se obstruya y que la muestra se adhiera en las paredes internas del extrusor. Para variar los niveles de inclusión de harina de amaranto en las mezclas maíz azul-amaranto empleadas para extrudir, se tomó como base el artículo publicado por (Félix *et al.*, 2020); ellos variaron el nivel de inclusión de frijol de 0 - 70 % en diferentes mezclas maíz-frijol con el objetivo de optimizar las condiciones de obtención de una botana de segunda generación mediante un extrusor de tornillo simple. El propósito de variar AF durante la optimización fue estudiar el efecto de la inclusión de diferentes cantidades de harina de amaranto, en las mezclas de maíz azul-amaranto, sobre las propiedades físicas, de textura, antioxidantes y de

digestibilidad de la proteína de botanas de segunda generación. Se seleccionaron valores bajos (0 %) y altos (70 %) de inclusión de AF en la mezcla maíz azul-amaranto con el objetivo de ajustar modelos de regresión de segundo orden adecuados y reproducibles para cada una de las variables de respuesta estudiadas; un rango amplio de AF (0 - 70 %) en la mezcla de maíz azul-amaranto nos permitió tener un extenso rango de variabilidades de las respuestas analizadas y con ello se aseguró obtener mejores modelos matemáticos de regresión, en contraste con un rango de inclusión de AF en las mezclas más acotado, donde la probabilidad de éxito de obtener modelos de regresión adecuados para todas las respuestas estudiadas hubiera sido más baja. Las variables de respuesta evaluadas fueron: índice de expansión radial (REI), densidad aparente (AD, g/cm³), dureza (H, N), contenido de compuestos fenólicos totales (TPC, mg GAE / 100 g, ps), contenido de flavonoides totales (TF, mg QE / 100 g, ps), actividad antioxidante (AoxA, μmol TE / 100 g, ps) y digestibilidad proteínica *in vitro* (IVPD, %). Una vez obtenidos los resultados de las variables de respuesta bajo las diferentes condiciones de proceso, se buscó la relación entre las variables independientes (BT, SS y AF) y las variables dependientes (REI, AD, H, TPC, TF, AoxA, IVPD) por medio de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados a través del software Design Expert versión 11.1.2.0. Se obtuvieron siete modelos de predicción y cada modelo fue utilizado para representar en gráficos de superficie de respuesta el efecto de las variables de proceso sobre su respectiva variable de respuesta. Además, se obtuvieron las coordenadas del punto estacionario para cada variable de respuesta y, en caso de que el punto estacionario se localice dentro del rango de experimentación, se realizó una caracterización de la superficie de respuesta mediante un análisis canónico, en el cual se determinaron los eigenvalores o raíces características (λ_i). Asimismo, la naturaleza de la superficie de respuesta se determinó a partir del punto estacionario, y de todos los signos y magnitudes de los eigenvalores. El punto estacionario es un punto de respuesta mínima si todos los eigenvalores son positivos, un punto de respuesta máxima si todos los eigenvalores son negativos y un punto silla si los eigenvalores presentan signos diferentes. Para encontrar el valor máximo y mínimo dentro de la región experimental, se realizó optimización de una variable por el método de deseabilidad para una respuesta mediante el software Minitab versión 19. Estos resultados también fueron validados por el método de análisis de cordillera de la metodología de superficie de respuesta (Gutiérrez y De la Vara, 2008; Khuri y Mukhopadhyay, 2010). Posteriormente, se aplicó el método numérico de deseabilidad para multirespuestas mediante el software Design Expert versión 11.1.2.0 para encontrar la combinación de variables de proceso que permitió maximizar los valores de REI, AoxA, TPC, TF e IVPD, y minimizar los valores de AD y H. A partir del método numérico de deseabilidad se encontró el grado deseabilidad individual (d_i) para cada variable de respuesta, y la deseabilidad global (D) se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$D = (d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6 d_7)^{1/7} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde el valor ideal es $D = 1$, y un valor aceptable de deseabilidad para sistemas alimenticios puede encontrarse entre 0.6 - 0.8.

Resultados y Discusión

Resultados experimentales y análisis de regresión lineal múltiple

Los valores experimentales obtenidos para cada variable de respuesta bajo las diferentes condiciones de proceso se muestran en la Tabla 1. No se muestran valores promedio y desviaciones estándar en este diseño experimental debido a que los tratamientos se realizaron una sola vez (no réplicas). Solo el tratamiento central (145 °C, 145 rpm, 35 % de AF) se realizó 6 veces (seis réplicas), sin embargo, en la Tabla 1 aparecen los valores de las variables de respuesta correspondientes a cada una de las seis réplicas. A su vez, se encuentran resaltados los valores mínimo y máximo empleados en cada variable de proceso, y los valores mínimo y máximo obtenidos en cada variable de respuesta.

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la regresión lineal para las diferentes variables de respuesta. Los valores β representan los coeficientes para el intercepto, y los términos lineales, cuadráticos y de interacción de los modelos matemáticos de predicción con variables codificadas para cada variable de respuesta, a su vez los signos y magnitudes en los β indican el efecto del término correspondiente sobre la variable de respuesta. Signos negativos significan que este término provoca decrementos en la respuesta, mientras que signos positivos provocan incremento. Por otra parte, se observa que los modelos de regresión son significativos ($p < 0.0001$), presentan coeficientes de determinación ajustado (R^2_{adj}) entre 0.8530 - 0.9730, y no presentan falta de ajuste ($p > 0.05$). Cabe mencionar que un buen modelo de predicción presenta un nivel de significancia estadística p -modelo ≤ 0.05 , un coeficiente de determinación R^2 ajustado ≥ 0.80 , un valor p -falta de ajuste > 0.05 y un coeficiente de variación $CV \leq 10 \%$, por lo que los parámetros estadísticos mostrados en la Tabla 2 prueban que los modelos polinomiales obtenidos se ajustaron positivamente al comportamiento experimental mostrado por las variables de respuesta evaluadas. Los modelos matemáticos obtenidos en cada variable de respuesta incluyen los términos lineales, cuadráticos y de interacción que fueron significativos ($p < 0.05$), sin embargo, se incluyeron algunos términos no significativos para obtener mejores parámetros de ajuste. En la variable AD se incluyó el término de interacción entre BT y AF; en la variable H se incluyó el término lineal de SS; y en la variable AoxA se incluyeron los términos lineales de BT y SS, y el término cuadrático de SS. Por otra parte, en Figura 1 y Figura 2 se observan los gráficos de superficie de respuesta obtenidos para cada variable de respuesta en función de BT, SS y AF. Estos gráficos son tridimensionales y hacen posible analizar a la variable de respuesta (eje Y) en función de solamente dos variables de proceso (ejes X_1 y X_2), por lo que en este caso es necesario fijar una de las variables de proceso; en nuestro caso, en un cuarto eje (X_3) se fijaron tres valores de la tercera variable de proceso para observar cuál es el efecto de las tres variables seleccionadas para el presente estudio. Las variables de proceso BT y AF fueron seleccionadas de manera subjetiva para los ejes X_1 y X_2 , respectivamente, debido a que el principal propósito de este estudio era observar su efecto sobre el comportamiento de las variables de respuesta, mientras que, el eje vertical Y representa a la variable de respuesta. SS fue seleccionada para fijar tres valores en el eje horizontal X_3 debido a que fue la variable de proceso con menor efecto sobre la mayoría de las variables de respuesta evaluadas. Los tres valores seleccionados para fijarse de la variable SS fueron los valores axiales (50 y 240 rpm) y central (145 rpm). Este criterio se estableció para

todos los gráficos para tener una mejor perspectiva de interpretación del comportamiento gráfico de las diferentes variables de respuesta.

La variable de respuesta REI tuvo valores mínimo y máximo de 1.857 y 2.327 (Tabla 1), respectivamente; además, se observa en la Figura 1A que un incremento de REI es causado principalmente por la disminución de BT y AF, mientras que incrementos en SS permiten aumentar el valor de REI a diferentes BT y AF. En la Tabla 2 se observa que la variable de proceso BT tiene un mayor efecto sobre REI, mientras que el término lineal de AF no tuvo un efecto significativo. Asimismo, REI se vio afectado por el término cuadrático de SS y las interacciones BT-SS y BT-AF. A su vez, la optimización de una respuesta reveló que el valor máximo deseable de REI (2.42) se encuentra a BT = 120 °C, SS = 205.5 rpm y AF = 0 %. Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 112.87 °C, SS = 262.23 rpm, AF = 109.48 %) y se encontró que los valores de BT, SS y AF se encuentran fuera del rango de experimentación, por lo que no es posible realizar inferencias sobre este punto.

Por otro lado, AD presentó valores mínimo y máximo de 0.178 y 0.473 g/cm³ (Tabla 1), respectivamente, y en la Figura 1B se observa que los valores de AD disminuyen constantemente por efecto del aumento en BT y disminución en AF, por lo que valores mínimos de AD se encuentran a valores de BT altos y valores de AF bajos. Asimismo, SS no tuvo un efecto significativo sobre AD, por lo que esta variable de respuesta presenta el mismo comportamiento gráfico a diferentes valores de SS. Por otra parte, esta variable no presenta ningún punto estacionario, dado que el modelo muestra un comportamiento lineal (Tabla 2) donde AD se ve afectada negativamente por BT (a mayor BT menor AD) y positivamente por AF (a mayor AF mayor AD) en igual magnitud, así como, por la interacción entre BT y AF.

A su vez, la optimización de una variable reveló que el valor mínimo deseable de AD (0.066 g/cm³) se localizó a BT = 170 °C, AF = 0 % y cualquier valor de SS. Este tipo de comportamiento coincide con lo reportado por (Gómez *et al.*, 2021), quienes reportaron que el incremento de BT causa un aumento en la expansión y, a su vez una disminución de AD, debido a un gradiente de presión más alto a la salida del extrusor que permite tener un mayor nivel de gelatinización del almidón. Asimismo, (Nikinmaa *et al.*, 2023) reportaron que la expansión durante la extrusión se puede presentar de manera tanto radial como longitudinal, por lo que la disminución de la densidad a pesar de la disminución de la expansión radial a altos valores de BT podría atribuirse a un incremento en la expansión longitudinal y no radial como se evaluó en el presente estudio. Por otro lado, el aumento de AF adiciona fibra y proteínas al producto, las cuales compiten con el almidón por el agua y causan problemas de expansión (Félix *et al.*, 2020).

H presentó valores mínimo y máximo de 8.16 y 38.14 N (Tabla 1), respectivamente. En la Figura 1C se encuentra que los valores mínimos de H se localizan a BT altas y AF bajos, lo cual coincide con lo reportado por (Félix *et al.*, 2020). Además, se observa que BT y AF presentan un efecto sinérgico (de interacción), debido a que incrementos de AF a valores bajos de BT permiten disminuir H, sin embargo, incrementos de AF a valores altos de BT causan un incremento en H. Por otra parte, se observa en la Tabla 2 que H fue afectada negativamente y en mayor magnitud por BT, mientras que AF tuvo un efecto positivo (no deseable) sobre esta variable.

Tabla 1. Diseño experimental utilizado para producir botanas extrudidas expandidas (EES) a diferentes condiciones de proceso y resultados experimentales de las variables de respuesta evaluadas en las EES.

Tratamiento ¹	Condiciones de proceso			Respuestas físicas			Respuestas nutraceuticas			Respuesta nutricional
	BT	SS	AF	REI	AD	H	TPC	TF	AoxA	IVPD
1	130.1	88.5	14.2	2.227	0.339	30.38	200	227	3397	27.3
2	159.9	88.5127	14.2	1.857	0.197	8.24	350	166	3400	55.0
3	130.1	201.4	14.2	2.327	0.364	32.78	318	239	2265	25.9
4	159.9	201.4	14.2	2.077	0.178	10.33	383	306	4049	66.4
5	130.1	88.5	55.8	2.173	0.455	33.29	201	93	2392	38.7
6	159.9	88.5	55.8	1.920	0.324	22.63	242	250	1525	35.5
7	130.1	201.5	55.8	2.273	0.422	34.03	278	21	1807	35.3
8	159.9	201.5	55.8	2.080	0.352	24.26	103	271	1756	47.7
9	120	145	35	2.303	0.470	38.14	267	202	2727	27.0
10	170	145	35	1.930	0.238	8.16	302	405	2868	63.8
11	145	50	35	1.931	0.398	24.32	321	194	3091	40.6
12	145	240	35	2.213	0.295	22.52	240	138	2869	54.8
13	145	145	0	2.126	0.204	12.52	285	77	3575	30.6
14	145	145	70	2.100	0.473	36.88	106	153	1147	36.9
15	145	145	35	2.080	0.378	27.87	267	172	2340	42.3
16	145	145	35	2.173	0.385	26.76	278	195	2374	39.9
17	145	145	35	2.153	0.295	20.47	275	165	2803	52.9
18	145	145	35	2.111	0.339	21.51	304	179	2835	49.5
19	145	145	35	2.150	0.291	26.52	290	137	2865	45.7
20	145	145	35	2.160	0.360	25.47	288	141	2686	38.8

¹Diseño experimental central compuesto rotatable con tres factores y cinco niveles de variación codificados; 20 experimentos. AF = Harina de Amaranto (%), BT= Temperatura de Barril (°C), SS = Velocidad de Tornillo (rpm), REI = Índice de Expansión Radial, AD = Densidad Aparente (g/cm³), H = Dureza (N), TPC = Compuestos Fenólicos Totales (mg GAE /100 g, ps), TF = Flavonoides Totales (mg QE / 100 g, ps), AoxA = Actividad Antioxidante (μmol TE / 100 g, ps), IVPD = Digestibilidad proteínica *In vitro* (%) * Los valores en negritas de las variables de proceso y de respuesta corresponden a los valores mínimos y máximos utilizados y obtenidos, respectivamente.

Tabla 2. Resultados del análisis de modelos polinomiales usando regresión lineal para las variables de respuesta estudiadas.

Parámetros	Coeficientes de parámetros de regresión lineal						
	Respuestas físicas			Respuestas nutraceuticas			Respuesta nutricional
	REI	AD	H	TPC	TF	AoxA	IVPD
Intercepto							
β_0	2.13	0.3378	24.35	285.26	165.23	2672.93	45.56
Lineales							
β_1	-0.1240***	-0.0675***	-8.45***	10.32***	55.05***	81.12 ^{NS}	10.20***
β_2	0.0772***	NS	0.2812 ^{NS}	-23.98***	-16.54*	-88.74 ^{NS}	3.12**
β_3	NS	0.0678***	7.24***	-53.50***	22.55**	-711.21***	NS
Cuadráticos							
β_{11}	NS	NS	NS	NS	48.98***	NS	NS
β_{22}	-0.0186**	NS	NS	NS	NS	84.20 ^{NS}	NS
β_{33}	NS	NS	NS	-29.83***	-17.73***	-134.58**	-4.16***
Interacciones							
β_{12}	0.0225**	NS	NS	-37.53***	27.59***	324.61***	3.54**
β_{13}	0.0216**	0.0157 ^{NS}	3.02***	-43.65***	50.03***	-338.02***	-7.36***
β_{23}	NS	NS	NS	-26.53***	-25.27***	NS	NS
β_{123}	NS	NS	NS	-16.26***	NS	-120.53*	NS

Continuación

Coefficientes de parámetros de regresión lineal

Parámetros	Respuestas físicas			Respuestas nutraceuticas			Respuesta nutricional
	REI	AD	H	TPC	TF	AoxA	IVPD
β_{112}	NS	NS	NS	35.22***	29.04**	NS	NS
β_{113}	NS	NS	-3.18**	NS	-60.41***	NS	NS
β_{122}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Valor-p del modelo	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
R^2	0.9642	0.8762	0.9600	0.9879	0.9784	0.9618	0.9061
R^2_{ajust}	0.9514	0.8530	0.9457	0.9770	0.9544	0.9339	0.8726
R^2_{pred}	0.9353	0.8367	0.9445	0.9364	0.9352	0.9139	0.8350
Valor-p falta de ajuste	0.8577	0.8261	0.9859	0.9028	0.9252	0.9208	0.9384
CV (%)	1.34	9.91	8.61	4.01	9.64	6.98	9.75

NS No significativo ($p > 0.1$), * Significativo a $p < 0.1$, ** Significativo a $p < 0.05$, *** Significativo a $p < 0.01$, REI = Índice de Expansión Radial, AD = Densidad Aparente (g/cm^3), H = Dureza (N), TPC = Compuestos Fenólicos Totales ($\text{mg GAE} / 100 \text{ g, ps}$), TF = Flavonoides Totales ($\text{mg QE} / 100 \text{ g, ps}$), AoxA = Actividad Antioxidante ($\mu\text{mol TE} / 100 \text{ g, ps}$), IVPD = Digestibilidad Proteínica *In vitro* (%).

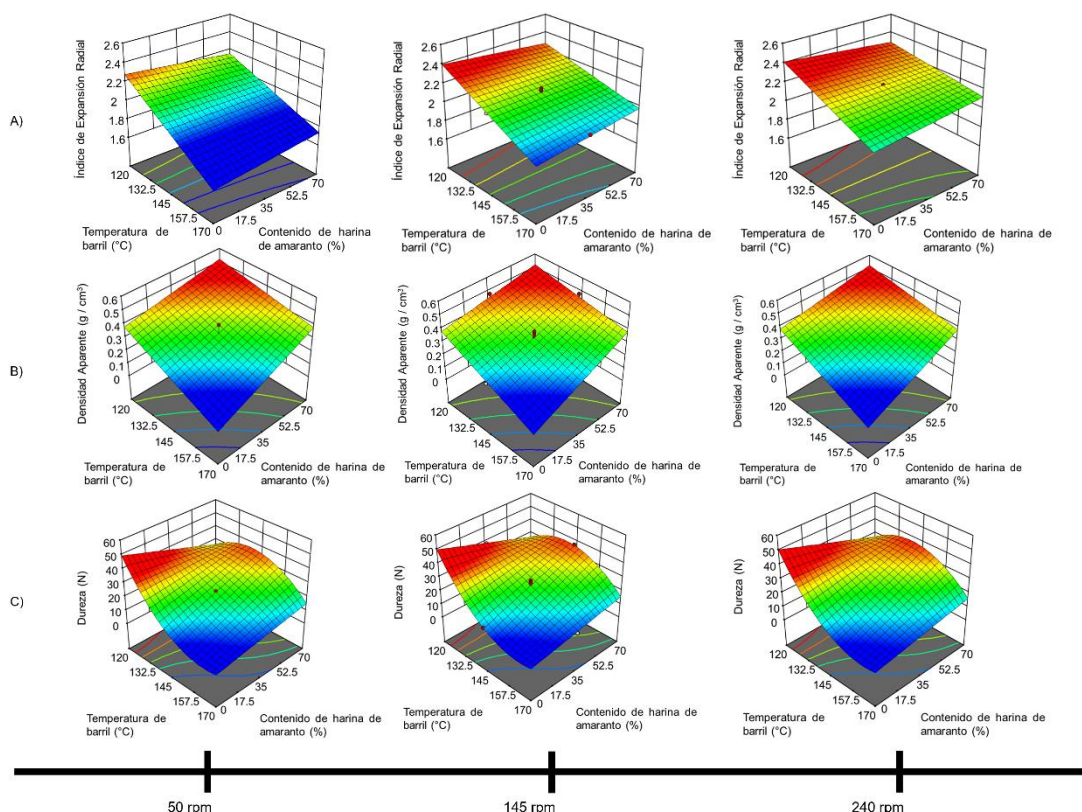


Figura 1. Gráficas de superficie de respuesta mostrando el efecto de las variables del proceso de extrusión (Temperatura de Barril, Contenido de Harina de Amaranto, Velocidad de Tornillo) sobre las variables de respuesta (A) Índice de expansión radial, (B) Densidad aparente, (C) Dureza de botanas expandidas producidas a partir de mezclas de maíz azul / amaranto.

El aumento de la expansión radial y/o longitudinal causado por el efecto de la temperatura de extrusión se relaciona también a un aumento en la porosidad del producto, lo cual permite obtener valores bajos de H. A su vez, SS no tuvo un efecto significativo sobre H. Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 109.36 °C, SS = 172.97 rpm, AF = 93.23 %) y se encontró que los valores de BT y AF se encuentran fuera del rango de experimentación, por lo que no es posible realizar inferencias acerca de este punto. A su vez, la optimización de una variable reveló que el valor mínimo deseable de H (4.55 N) se localizó a BT = 170 °C, AF = 0 % y cualquier valor de SS.

TPC presentó valores en un rango de 103 a 383 mg AGE / 100 g (ps), respectivamente. Del total de compuestos fenólicos, el 3.97 - 30.88 % correspondió a compuestos fenólicos libres y el 69.12 - 96.03 % a compuestos fenólicos ligados. Además, en la Figura 2A se observa que TPC presentó valores máximos a condiciones intermedias de BT y AF cuando se empleaban condiciones leves de SS y, a medida que incrementa el valor de SS, comienzan a aparecer dos puntos con máximo valor en TPC que corresponden a (1) BT bajo y AF alto, y (2) BT alto y AF

bajo debido al efecto sinérgico entre BT, SS y AF, siendo las interacciones BT-AF, BT-SS y BT^2 -SS las que más impactan en esta variable. Diversos autores mencionan que SS altas permiten una mayor liberación de compuestos fenólicos que se encuentran ligados a la pared celular y que el incremento de BT activa reacciones de Maillard produciendo compuestos que se pueden leer a la misma longitud de onda que los compuestos fenólicos (Espinoza *et al.*, 2016; Félix *et al.*, 2020). Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 118.46 °C, SS = 102.62 rpm, AF = 53.35 %) y se encontró que el valor de BT se encuentra fuera del rango de experimentación, por lo que no es posible realizar inferencias acerca de este punto. A su vez, la optimización de una variable reveló que el valor máximo deseable de TPC (605 mg GAE / 100 g, ps) se localizó a BT = 170 °C, SS = 240 rpm y AF = 0 %.

TF presentó valores entre 21 - 405 mg QE/ 100 g (ps) (Tabla 1). En la Figura 2B se observa que a valores bajos de SS se encuentra un valor máximo de TF a BT baja y AF bajo, además de un valor mínimo a BT baja y AF alto. Sin embargo, a medida que se incrementa el valor de SS, comienza a desplazarse positivamente el valor máximo de TF y a aparecer una nueva zona con altos valores de TF localizada a BT alta y AF bajo. Finalmente, cuando SS alcanza su valor más alto dentro del rango experimental (240 rpm), se observan dos picos ubicados en los valores mínimo y máximo de BT y el valor mínimo de AF. Este comportamiento se debe a los mismos mecanismos de liberación y transformación anteriormente mencionados para TPC. Asimismo, el incremento de AF causa disminución tanto de TPC como de TF debido a que el amaranto presenta menor contenido de compuestos fenólicos y flavonoides en comparación al maíz azul (Gámez *et al.*, 2021). Por otro lado, la Tabla 2 indica que las tres variables de proceso BT, SS y AF tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre TF, sin embargo, BT fue la variable que presentó un efecto más importante, mientras que SS afectó en menor grado a TF. Asimismo, las interacciones fueron estadísticamente significativas en el siguiente orden: BT-AF, BT-SS, BT^2 -SS, SS-AF y BT-SS-AF. Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 163.57 °C, SS = 113.76 rpm, AF = 36.25 %) y se encontró que los valores de BT, SS y AF se encuentran dentro del rango de experimentación. Asimismo, los resultados de la caracterización de la superficie de respuesta ($\lambda_1 = 2.68$, $\lambda_2 = -23.48$, $\lambda_3 = 52.05$) muestran que el punto estacionario se trata de un punto silla y que la superficie presenta una mayor inclinación en dirección de w_3 (variable independiente transformada correspondiente a AF) para la que el valor absoluto de λ_3 tuvo un valor máximo. A su vez, la optimización de una variable reveló que el valor máximo deseable de TF (714 mg QE / 100 g, ps) se localiza a BT = 170 °C, SS = 240 rpm y AF = 0 %.

AoxA presentó valores entre 1147 - 4049 μ mol TE / 100 g (ps) (Tabla 1). En la Figura 2C se observa que a valores bajos de SS existe una pérdida de AoxA con el incremento de BT y AF, sin embargo, al aumentar SS el valor máximo de AoxA se desplaza hacia valores más altos de BT, mientras que el valor mínimo de AoxA se localiza a BT y AF altos para cualquier valor de SS. Por otro lado, la Tabla 2 indica que esta variable se vio afectada principalmente por AF, mientras que los términos lineales de BT y SS no presentaron un efecto significativo sobre AoxA; sin embargo, el término cuadrático de AF y las interacciones BT-SS, BT-AF y BT-SS-AF tuvieron un efecto significativo sobre AoxA, por lo que es esperable que los valores de esta variable se vean afectados bajo cambios tanto en BT y SS como en AF. Este

comportamiento es debido a que valores altos de SS permiten una mayor liberación de compuestos que presentan actividad antioxidante provenientes de la pared celular, además BT altas activan reacciones que producen compuestos con actividad antioxidante e inactiva enzimas evitando la oxidación de algunos compuestos fenólicos (Félix *et al.*, 2020).

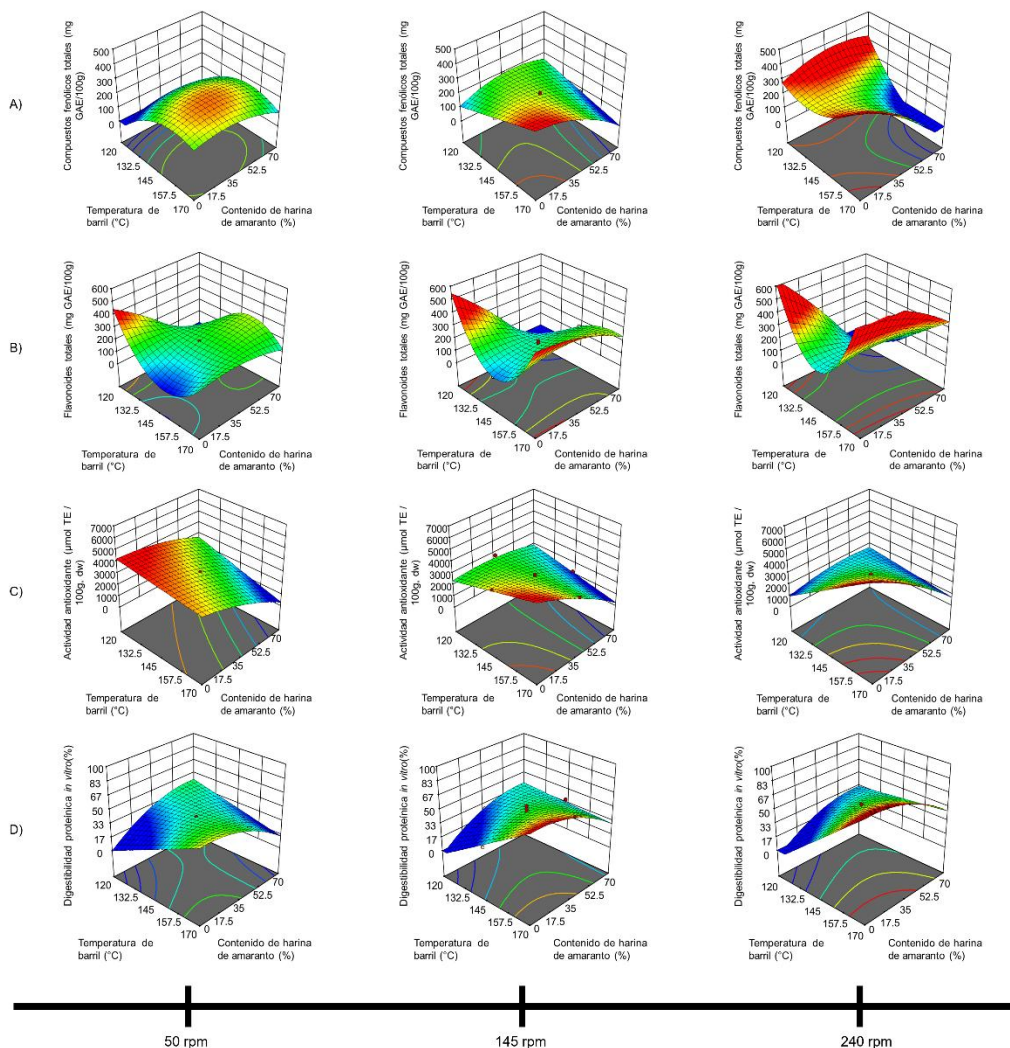


Figura 2. Gráficas de superficie de respuesta mostrando el efecto de las variables del proceso de extrusión (Temperatura de Barril, Contenido de Harina de Amaranto, Velocidad de Tornillo) sobre las variables de respuesta (A) Compuestos fenólicos totales, (B) Flavonoides totales, (C) Actividad antioxidante, (D) Digestibilidad proteínica *in vitro* de botanas expandidas producidas a partir de mezclas de maíz azul / amaranto.

Asimismo, se ha reportado que el amaranto presenta menor actividad antioxidante en comparación al maíz azul (Gámez *et al.*, 2021). Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 112.41 °C, SS = 174.77 rpm, AF =

50.53 %) y se encontró que el valor de BT se encuentra fuera del rango de experimentación. A su vez, la optimización de una variable reveló que el valor máximo deseable de TF (6161 $\mu\text{mol TE} / 100 \text{ g, ps}$) se localiza a BT = 170 °C, SS = 240 rpm y AF = 0 %.

Los valores mínimo y máximo obtenidos para *IVPD* fueron 25.9 y 66.4 % (Tabla 1), respectivamente. En la Figura 2D se observa que, para cualquier valor de SS, el valor mínimo se localiza a BT y AF bajos, mientras que el valor máximo se localiza a BT alta y AF bajo, por lo que esta variable se ve afectada principalmente por BT. Asimismo, incrementos en SS causan un desplazamiento del valor máximo de *IVPD* hacia valores más altos, mientras que incrementos en AF a BT baja causan un aumento de *IVPD* e incrementos de AF a BT alta causan una disminución de *IVPD*. Por otro lado, la Tabla 2 revela que el término lineal de BT presentó un mayor efecto (positivo) sobre *IVPD*, mientras que el término lineal de AF no presentó un efecto significativo; asimismo, *IVPD* se vio afectada por el término cuadrático de AF, a la vez que los términos cuadráticos de BT y SS no presentaron un efecto significativo. Además, las interacciones BT-SS y BT-AF mostraron afectar positiva y negativamente a *IVPD*, respectivamente. Se ha reportado por diversos autores que, durante el proceso de extrusión por efecto de BT y SS, ocurre la desnaturalización de proteínas e inactivación de factores antinutricionales que inhiben la hidrólisis enzimática de proteínas, lo cual permite mejorar la *IVPD* (Zhang *et al.*, 2017). Además, el amaranto presenta una *IVPD* baja (< 70 %) en comparación al maíz azul (> 70 %) (Hejazi *et al.*, 2016). Por otra parte, las coordenadas del punto estacionario fueron calculadas (BT = 123.48 °C, SS = 37.92 rpm, AF = 44.87 %) y se encontró que el valor de SS se encuentra fuera del rango de experimentación. A su vez, la optimización de una respuesta reveló que el valor máximo deseable de *IVPD* (87.2 %) se localizó a BT = 170 °C, SS = 240 rpm y AF = 4.24 %.

Optimización

Para obtener una botana expandida extrudida optimizada (OEES) se utilizó inicialmente el siguiente criterio en las variables de respuesta: maximizar los valores REI, TPC, TF, AoxA y *IVPD*, y minimizar los valores de AD y H. Además, el criterio utilizado en las variables de proceso BT y SS fue “en el rango”, permitiendo cualquier valor dentro del rango de experimentación. La combinación de variables de proceso óptima obtenida fue BT = 162 °C, SS = 240 rpm y AF = 12.67 %. Sin embargo, el nivel de inclusión de harina de amaranto nos pareció bajo como para tener un impacto significativo en la mejora de la calidad de la proteína en la botana, por lo que se realizó una segunda optimización utilizando los criterios “en el rango” para las variables de proceso BT y SS, y “maximizar” para la variable de proceso AF con el fin de evaluar y comparar un producto con las mejores características de acuerdo a los resultados del diseño (primera optimización) y un producto con la mayor inclusión posible de amaranto para asegurar un mejor aporte de los aminoácidos esenciales lisina y triptófano sin sacrificar las características físicas de la OEES (segunda optimización). La combinación de variables de proceso óptima obtenida para este segundo criterio fue BT = 170 °C, SS = 240 rpm y AF = 29.05 %. Los valores de deseabilidad individual obtenidos para las siete variables de respuesta asociados a la primera optimización (OEES1) fueron: $d_{REI} = 0.483$, $d_{AD} = 1$, $d_H = 1$, $d_{TPC} = 1$, $d_{TF} = 1$, $d_{AoxA} = 1$ y $d_{IVPD} = 1$, y la deseabilidad global asociada a estas deseabilidades individuales fue $D = 0.901$. Por otro lado, los valores de deseabilidad individual asociados a la

segunda optimización (OEES2) fueron: $d_{REI} = 0.418$, $d_{AD} = 0.935$, $d_H = 0.95$, $d_{TPC} = 1$, $d_{TF} = 1$, $d_{AoxA} = 1$ y $d_{IVPD} = 1$, y la deseabilidad global asociada a estas deseabilidades individuales fue $D = 0.792$. Ambas deseabilidades globales fueron mayores a 0.6, por lo que se consideran valores aceptables y buenos.

En la Tabla 3 se muestran los valores teóricos obtenidos con los modelos de predicción con sus respectivos intervalos de confianza teóricos. Al comparar estos valores teóricos de la Tabla 3 con los valores experimentales de la Tabla 1 se puede observar que los valores de REI, TPC, TF, AoxA, para las cuales se desea obtener valores lo más grandes posible, presentaron valores teóricos predichos altos aceptables después de optimizar, incluso presentaron valores teóricos predichos mayores que los valores experimentales, excepto para REI, quien presentó un valor teórico ligeramente inferior al valor máximo experimental mostrado en la Tabla 1. Asimismo, se puede ver que los valores de AD y H, para las cuales se desea obtener valores lo más pequeños posible, tuvieron valores teóricos predichos bajos después de optimizar. Esto demuestra que el método numérico de deseabilidad de la metodología de superficie de respuesta fue adecuado para ajustar las condiciones del proceso extrusión para alcanzar altos valores en la característica física REI y las características antioxidantes (AoxA), fitoquímicas (TPC, TF) y de digestibilidad proteínica (IVPD), así como, valores bajos de las características de calidad de textura (H) y AD, lo cual les permitirá competir en el mercado con botanas de características similares. Sin embargo, en un futuro será necesario realizar una caracterización más profunda de las botanas optimizadas, para validar el potencial que tienen las botanas funcionales de maíz azul y amaranto para impactar de manera positiva en el mercado de las botanas y en la salud de los consumidores.

Tabla 3. Medias e intervalos de confianza predichos para las variables de respuesta.

	Variables de respuesta	Media predicha	Límite inferior del Intervalo predicho	Límite superior del Intervalo predicho
OEES1 ¹	REI	2.08	2.01	2.19
	AD	0.17	0.11	0.22
	H	8.16	3.66	12.66
	TPC	419.7	381.0	458.4
	TF	404.8	342.4	467.1
	AoxA	4747.6	4152.18	5343.02
	IVPD	73.5	63.65	83.34
OEES2 ²	REI	2.05	1.97	2.14
	AD	0.20	0.15	0.25
	H	9.66	5.58	13.74
	TPC	383.5	324.9	442.0
	TF	613.8	510.3	717.2
	AoxA	4269.1	3680.94	4857.26
	IVPD	81.20	69.49	92.9

¹OEES1 = Botana Extrudida Expandida Optimizada 1, ²OEES2 = Botana Extrudida Expandida Optimizada 2, REI = Índice de Expansión Radial, AD = Densidad Aparente (g/cm³), H = Dureza (N), TPC = Compuestos Fenólicos Totales (mg GAE / 100 g, ps), TF = Flavonoides Totales (mg QE / 100 g, ps), AoxA = Actividad Antioxidante (μmol TE / 100 g, ps), IVPD = Digestibilidad Proteínica *In vitro* (%).

Conclusiones

Las botanas saludables óptimas elaboradas por extrusión a partir de maíz azul y amaranto, por sus buenas características físicas, texturales, de digestibilidad de la proteína y antioxidantes, son un buen vehículo para reemplazar botanas poco saludables que abundan en el mercado.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K.; desarrollo de la metodología, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K., Ramos-Ferra C.; manejo de software, Gutiérrez-Dorado R., Ramos-Ferra C.; Félix-Medina J.V., Aguilar-Palazuelos E.; validación experimental, Ramos-Ferra C.; análisis de resultados, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K., Ramos-Ferra C.; Manejo de datos, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K., Ramos-Ferra C.; escritura y preparación del manuscrito, Ramos-Ferra C.; redacción, revisión y edición, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K., Félix-Medina J.V., Aguilar-Palazuelos E., García-Armenta E.; administrador de proyectos, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K.; adquisición de fondos, Gutiérrez-Dorado R., Perales-Sánchez J.X.K. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos

Se agradece al personal del laboratorio de bioprocesos y alimentos funcionales de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo brindado. También, se agradece el apoyo brindado por CONHACYT por la beca recibida por el alumno Carlos Francisco Ramos Ferra para los estudios de maestría en ciencia y tecnología de alimentos.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Adom, K. & Liu, R. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Adom, K., Sorrells, M. & Liu, R. H. (2003). Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26), 7825-7834. <https://doi.org/10.1021/jf030404l>
- Dewanto, V., Wu, X., & Liu, R. (2002). Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(17), 4959-4964. <https://doi.org/10.1021/jf0255937>
- Escalante, A., Ramírez, B., Torres, P., López, J., Figueroa, J., Barrón, J., Morales, I., Ponce, N., & Gutiérrez, R. (2014). Obtaining Ready-to-Eat Blue Corn Expanded Snacks With Anthocyanins Using Extrusion Process and Response Surface Methodology. *Molecules*, 19 (12), 21066-21084. <https://doi.org/10.3390/molecules191221066>
- Espinoza, R., Reyes, C., Milán, J., López, J., Paredes, O., & Gutiérrez, R. (2016). Healthy Ready-to-Eat Expanded Snack with High Nutritional and Antioxidant Value Produced from Whole Amarantin Transgenic Maize and Black Common Bean. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71, 218-224. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0551-8>

- Félix, J., Gutiérrez, R., López, J., López, G., Quintero, M., Perales, J., & Montes, J. (2021). Nutritional, antioxidant and phytochemical characterization of healthy ready-to-eat expanded snack produced from maize/common bean mixture by extrusion. *LWT - Food Science and Technology*, 142, Article 111053. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111053>
- Félix, J., Montes, J., Reyes, C., Perales, J., Gómez, M., Aguilar, E., & Gutiérrez, R. (2020). Second-generation snacks with high nutritional and antioxidant value produced by an optimized extrusion process from corn/common bean flours mixtures. *LWT - Food Science and Technology*, 124, Article 109172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109172>
- Gámez, L., Gutiérrez, R., Gómez, C., Perales, J., Milán, J., Cuevas, E., Mora, S., & Reyes, C. (2021). Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. *Biotechnia*, 23(2), 103-112. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1385>
- Gómez, M., Reyes, C., Milán, J., Partida, R., Espinoza, R., Preciado, R., & Gutiérrez, R. (2021). Gluten-free healthy snack with high nutritional and nutraceutical value elaborated from a mixture of extruded underutilized grains (quality protein maize/tepyary bean). *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 31, e3024. <http://doi.org/10.15174.au.2021.3024>
- Gujska, E., & Khan, K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science*, 55(2), 466-469. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06788.x>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. 2 ed. McGraw-Hill Interamericana.
- Hejazi, S., Orsat, V., Azadi, B., & Kubow, S. (2016). Improvement of the in vitro protein digestibility of amaranth grain through optimization of the malting process. *Journal of Cereal Science*, 68, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.11.007>
- Herrera, M., Cruz, C., Trujillo, C., Rodríguez, M., García, H., Chávez, J., Oliart, R., & Guzmán, R. (2017). Antioxidant and antiproliferative activity of blue corn and tortilla from native maize. *Chemistry Central Journal*, 11, (110). <https://doi.org/10.1186%2Fs13065-017-0341-x>
- International Production Assessment Division. (2024, April 15). Corn explorer. U.S. Department of Agriculture. <https://ipad.fas.usda.gov/cropeexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0440000>
- Khuri, A., Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128-149. <https://doi.org/10.1002/wics.73>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., & Fang, Z. (2019). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1) 218-246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514>
- Nikinmaa, M., Zehnder, O., Nystrom, L., Sozer, N. (2023). Effect of extrusion processing parameters on structure, texture and dietary fibre composition of directly expanded wholegrain oat-based matrices. *LWT-Food Science and Technology*, 184, 114972. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114972>
- Park, J., Rhee, K., Kim, B., & Rhee, K. (1993). Single-screw extrusion of defatted soy flour, corn starch and raw beef blends. *Journal of Food Science*, 58(1), 9-19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb03201.x>
- Rathod, R., & Annapure, U. (2016). Effect of extrusion process on antinutritional factors and protein and starch digestibility of lentil splits. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.028>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
- Shah, F., Sharif, M., Bashir, S., & Ahsan, F. (2018). Role of Healthy Extruded Snacks to Mitigate Malnutrition. *Food Reviews International*, 35, 299-323. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1542534>

- Singleton, V., Orthofer, R., & Lamuele, R. (1999). Analysis of total Phenols and other oxidation substrates and antioxidant by means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-165. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Soriano, M., Arias, I., Carrillo, J., & Rosas, D. (2019). Nutritional functional value and therapeutic utilization of Amaranth. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 7, 596-600. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86897>
- Wang, W., Klopfenstein, C., & Ponte, J. (1993). Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry*, 70, 707-711. <https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1993/Documents/cc1993a165.html>
- Xu, B., & Chang, S. (2007). A Comparative Study on Phenolic Profiles and Antioxidant Activities of Legumes as Affected by Extraction Solvents. *Journal of Food Science*, 72, 159-166. <https://doi:10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x>
- Zhang, B., Liu, G., Ying, D., Sanguansri, L., & Augustin, M. (2017). Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and in vitro protein digestibility of canola meal. *Food Research International*, 100, 658-664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060>