

Title Paper/Título del artículo:

Elaboración de harina de amaranto extrudido como ingrediente para la elaboración de pan libre de gluten

Production of extruded amaranth flour as an ingredient for the preparation of gluten-free bread

Authors/Autores: López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado, R., Perales Sánchez, J.X.K., Pineda Hidalgo, K.V., Reyes Moreno, C., Madrigales-Reátiga, L.F.

ID: e1695

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1695>

Received/Fecha de recepción: June 11th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: October 09th 2024

Available online/Fecha de publicación: October 21th 2024

Please cite this article as/Como citar este artículo: López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado, R., Perales Sánchez, J.X.K., Pineda Hidalgo, K.V., Reyes Moreno, C., Madrigales-Reátiga, L.F. (2024). Production of extruded amaranth flour as an ingredient for the preparation of gluten-free bread. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1695. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1695>

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.

Elaboración de harina de amaranto extrudido como ingrediente para la elaboración de pan libre de gluten

Production of extruded amaranth flour as an ingredient for the preparation of gluten-free bread

Pan sin gluten fortificado con amaranto/

Gluten-free bread fortified with amaranth

López Olivas, Z.V.¹, Gutiérrez Dorado, R.^{1,2*} (ID), Perales Sánchez, J.X.K.^{1,2} (ID), Pineda Hidalgo, K.V.¹ (ID), Reyes Moreno, C.^{1,2} (ID), Madrigales-Reátiga, L.F.¹

¹Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calzada de las Américas, Nte 2771. 80030, Culiacán, Sinaloa, México. ²Programa de Posgrado Integral en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calzada de las Américas, Nte 2771. 80030, Culiacán, Sinaloa, México.

*Corresponding Author:

[Roberto Gutiérrez-Dorado](#), Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Posgrado Integral en Biotecnología, 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

El pan sin gluten (GFB) se elabora principalmente a partir de cereales y almidón, lo que lo hace deficiente en nutrientes. El objetivo fue optimizar las condiciones de extrusión [temperatura de extrusión (ET) y velocidad del tornillo (SS)] y el nivel de inclusión de la harina de amaranto extrudido (EAF) para desarrollar una mezcla compuesta de harina de arroz-almidón de maíz (RF/CS) y EAF adecuada para elaborar GFB con mejor calidad nutricional y propiedades tecno-funcionales/sensoriales adecuadas. Se utilizó un diseño central compuesto rotatable de 3 factores y 9 respuestas; 20 tratamientos. Se aplicó metodología de superficie de respuesta como técnica de optimización. Las condiciones óptimas encontradas (ET = 89 °C y SS = 74 rpm y EAF = 15 %) dieron como resultado un pan con contenido de proteína alto (8.3 %), volumen específico aceptable (2.3 mL/g) y propiedades sensoriales (color de la miga = 74.9, color de la corteza = 70.4, textura de la miga = 69.7, textura de la corteza = 68.6, suavidad del pan = 71.7, sabor del pan = 71.0 y aceptabilidad global del pan = 71.9) evaluadas entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”. Los hallazgos de esta investigación resaltan el potencial de la EAF optimizada como componente para mejorar el valor nutricional y la aceptabilidad sensorial del GFB.

PALABRAS CLAVE:

Amarantus hypochondriacus, extrusión, pan para celíacos, optimización, propiedades tecno-funcionales, evaluación sensorial

ABSTRACT

Gluten-free bread (GFB) is primarily made from grains and starch, making it nutrient-deficient. The objective was to optimize the extrusion conditions [extrusion temperature (ET) and screw speed (SS)] and the inclusion level of extruded amaranth flour (EAF) to develop a mixture composed of rice flour-corn starch (RF/CS) and EAF suitable for producing GFB with better nutritional quality and adequate techno-functional/sensory properties. A 3-factor, 9-response rotatable composite central design was used; 20 treatments. Response surface methodology was applied as an optimization technique. The optimal conditions found (ET = 89 °C, SS = 74 rpm, and EAF = 15 %) resulted in a high protein content bread (8.3 %), acceptable specific volume (2.3 mL/g), and sensory properties (crumb color = 74.9, crust color = 70.4, crumb texture = 69.7, crust texture = 68.6, bread softness = 71.7, bread flavor = 71.0, and overall bread acceptability = 71.9) evaluated between “I like it moderately” and “I like it a lot”. The results found show the impact of the optimized EAF as an ingredient for the production of nutritionally improved and sensorially acceptable GFB.

KEY WORDS

Amarantus hypochondriacus, extrusion, bread for celiacs, optimization, techno-functional properties, sensory evaluation

Introducción

La enfermedad celíaca (CD) afecta a alrededor del 1 % de la población mundial (Caio *et al.*, 2019). Se ha informado que su prevalencia es dos veces mayor entre las mujeres que entre los hombres, y aumenta entre personas con un familiar directo afectado (Fasano & Catassi, 2012). El único tratamiento eficaz para la CD es el cumplimiento de por vida de una dieta estrictamente libre de gluten (Caio *et al.*, 2019). Esto significa evitar la ingesta de cualquier alimento o producto que contenga trigo, cebada, centeno y sus derivados. La producción de alimentos sin gluten se basa principalmente en diversos tipos de almidones y harinas procedentes de cereales sin gluten, como el maíz y el arroz (Ziena *et al.*, 2019).

Debido a la ausencia de gluten, el pan sin gluten (GFB) presenta características sensoriales significativamente diferentes en comparación con el pan de trigo. El GFB suele tener poco volumen, una textura quebradiza, un color pálido, un sabor desagradable y un endurecimiento rápido (Masure *et al.*, 2016). Para mejorar las propiedades sensoriales del GFB, se usa comúnmente almidón de maíz, debido a que un mayor contenido de almidón promueve la gelatinización, la retención de gases y previene la pérdida de CO₂ y el colapso de la corteza (Sciarini *et al.*, 2016). Sin embargo, la adición de almidones al GFB reduce su valor nutricional, incluidas las proteínas, la fibra y los minerales. Una solución a este problema es la incorporación de harinas de alto valor nutritivo elaboradas a partir de leguminosas y/o pseudocereales.

En este sentido, varios estudios han explorado el impacto de la inclusión de leguminosas y pseudocereales en las cualidades nutricionales y sensoriales del pan sin gluten (Rybicka *et al.*, 2019; De Aguiar *et al.*, 2022). Descubrieron que la incorporación de harina de amaranto cruda mejora la calidad nutricional del pan, pero disminuye su aceptabilidad sensorial, principalmente debido al sabor. La harina de

amaranto es una excelente alternativa debido a que el amaranto es un pseudocereal de alto valor nutricional, presenta niveles elevados de proteínas, grasas, fibras y minerales (Soriano-García & Aguirre-Díaz, 2019). Las proteínas del amaranto son relativamente ricas en lisina y triptófano en comparación con los valores de la FAO (2013) (Juan *et al.*, 2007). Para potenciar las características nutricionales, tecno-funcionales y sensoriales del amaranto, éste se somete a un tratamiento térmico, como la cocción por extrusión.

La cocción por extrusión provoca cambios bioquímicos significativos, incluida la desnaturalización de proteínas, la gelatinización del almidón, modificaciones de lípidos, aumento de fibra dietética soluble e inactivación de microorganismos y enzimas. En estos cambios las variables de proceso de extrusión, principalmente la temperatura tiene un efecto significativo. La temperatura de extrusión tiene un impacto integral en las propiedades finales de los alimentos extrudidos. Es crucial ajustar este parámetro cuidadosamente para optimizar la textura, el sabor, el valor nutricional y otras propiedades sensoriales del producto (S La temperatura debe ser controlada en función de los ingredientes específicos y las características deseadas del producto final para lograr el equilibrio óptimo entre calidad nutricional y atractivo sensorial. Además, es crucial controlar las condiciones del proceso de extrusión ya que la reacción de Maillard puede afectar el valor nutricional de las proteínas, dependiendo del tipo de materia prima, la composición y las condiciones del proceso (Singh *et al.*, 2007). Por lo tanto, es esencial un control cuidadoso de las condiciones de extrusión para mejorar la calidad nutricional y sensorial.

Varios estudios han empleado la extrusión como método de cocción para mejorar el valor nutricional de las harinas extrudidas. Uno de estos trabajos de investigación consistió en obtener tortillas de maíz cocido con cal fortificadas con 30 % de harina de amaranto extrudido (Gómez-Valdez *et al.*, 2021), estas tortillas funcionales fortificadas con harina de amaranto extrudido presentaron mayor contenido de proteína, fibra dietética, digestibilidad de la proteína y calidad química de la proteína en relación al contenido de aminoácidos que las tortillas sin fortificar con amaranto; asimismo, la adición de harina de amaranto extrudido no afectó significativamente las propiedades sensoriales de las tortillas. Además, la extrusión se ha utilizado para mejorar el volumen específico y las propiedades sensoriales de la harina de arroz como ingrediente en la preparación de GFB (Clerici *et al.*, 2009). Sin embargo, no existen reportes en la literatura sobre el impacto del proceso de cocción por extrusión en la mejora de las propiedades nutricionales, tecno-funcionales y sensoriales del amaranto como ingrediente en la producción de GFB.

El objetivo de este trabajo fue optimizar las condiciones de extrusión y el nivel de inclusión de la harina de amaranto para desarrollar una mezcla compuesta de harina de arroz, almidón de maíz y harina de amaranto extrudido adecuada para elaborar pan libre de gluten con valor nutricional y propiedades fisicoquímicas/ tecno-funcionales/ sensoriales mejoradas.

Material y Métodos

Elaboración de la harina de amaranto extrudida

Granos de Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) de la variedad Nutrisol (cosecha 2021) fueron adquiridos en la empresa DEMEGARCIA en Atlixco, Puebla. La harina de amaranto extrudida (EAF) se obtuvo siguiendo la metodología descrita por Gámez-Valdez *et al.* (2021). Al amaranto se le añadió agua destilada hasta obtener un contenido de humedad final del 28 %. La extrusión se realizó en un extrusor de laboratorio de un solo tornillo Modelo 20 DN (CW Brabender Instruments, Inc, NJ, EE. UU.) equipado con un tornillo de 19 mm de diámetro, 20:1 de longitud/diámetro, una relación de compresión nominal de 1:1 y un dado de 4 mm. Las condiciones de operación del extrusor fueron: Temperatura de extrusión (ET) = 70 - 170 °C y velocidad del tornillo (SS) = 50 - 240 rpm. La velocidad de alimentación fue de 70 g/min; Los extruidos de amaranto se dejaron reposar a 25 °C, se molieron (LM 3100, EE. UU.) (malla 80-US = 0.177 mm) y se almacenaron a 4 °C.

Elaboración de mezclas y pan

Para la elaboración del pan, se prepararon mezclas que contenían harina de arroz (RF) al 75 %, fécula de maíz (CS) que varió entre 0 - 24.5 % y harina de amaranto extrudida (EAF) entre 0.5 % y 25 %. Para la producción del pan, se utilizaron 420 g de mezcla, 5 g de levadura, 16 g de azúcar, 5 g de sal, 3 g de polvo de hornear, 5 g de goma xantana, 410 g de leche, 16 g de aceite, 7 g de vinagre y 2 huevos (cada ingrediente se pesó por separado). Los ingredientes se mezclaron durante 8 min (velocidad mínima) con batidora manual (Black & Decker®). Posteriormente se dejó fermentar la masa (60 min / 25 °C), y se horneó a 180 °C durante 40 min en un horno de estufa convencional (Koblentz®). Finalmente, el pan se dejó enfriar a temperatura ambiente para ser evaluado.

Evaluación de variables de respuesta

Contenido de proteína y volumen específico

El contenido de proteína se determinó mediante el Método Micro Kjeldahl (Método 960.52; AOAC 2012), aplicándose un factor de conversión de 6.25 a las muestras de pan. El volumen específico se determinó dividiendo el volumen de la muestra entre su peso (cm³/g), de acuerdo con el método 10-05 de la AACC (1995).

Propiedades sensoriales

Para evaluar la percepción sensorial, se seleccionó un panel de 50 jueces no entrenados, incluidos ambos sexos, edades entre 18 y 35 años, consumidores habituales de pan de trigo. Los atributos evaluados fueron: color de la miga (CmC), color de la corteza (CsC), textura de la miga (CmT), textura de la corteza (CsT), suavidad del pan (BS), sabor del pan (BF) y aceptabilidad global del pan (GAB). La evaluación se realizó utilizando una escala LAM (etiquetada magnitud afectiva), que es una escala hedónica bidireccional de 11 puntos que va desde -100 (que indica el mayor disgusto posible) a +100 (que indica el mayor agrado posible). El punto central de la escala representa cero, lo que significa una opinión neutral (Pohjanheimo, 2010). Posteriormente, estos valores se transformaron a una escala de 0 a 100, donde 0 representa el mayor disgusto imaginable, 100 significa el mayor agrado imaginable y 50 indica una opinión neutral (ni agrado ni desagrado) (Cardello & Schutz, 2004).

Diseño experimental, análisis estadístico, optimización y validación

Diseño experimental: Se utilizó un diseño experimental central compuesto rotatable con tres factores y cinco niveles de variación (2 niveles factoriales, 2 niveles axiales y 1 nivel central) [temperatura de extrusión (ET = 70, 90, 120, 150 y 170 °C), velocidad del tornillo (SS = 50, 88, 145, 201 y 240 rpm) y % de inclusión de EAF (0.5, 5.5, 12.75, 20 y 25)]. A partir de la combinación de los niveles de variación de los factores se obtuvieron 15 tratamientos diferentes (8 tratamientos factoriales, 6 tratamientos axiales y 1 tratamiento central); el tratamiento central (ET= 120 °C, SS= 120 rpm y % EAF = 12.75) se replicó 5 veces con el propósito de estimar el error de la falta de ajuste de los modelos de regresión. En total el diseño experimental constó de 20 tratamientos (Tabla 1). Las variables de respuesta fueron el PC, SV, CmC, CsC, CmT, CsT, BS, BF y GAB.

Análisis estadístico de regresión y varianza: Para investigar la relación entre los factores y las variables de respuesta (modelos matemáticos de regresión) se utilizó regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados de la metodología de superficie de respuesta. Para verificar la significancia de los parámetros del modelo (coeficientes de los modelos de regresión, β) se aplicó análisis de varianza con un $\alpha = 0.05$, asimismo, se estimó la significancia del modelo de regresión completo empleando también $\alpha = 0.05$. Para estimar la bondad de ajuste de los modelos de regresión se emplearon los parámetros estadísticos coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustada ($R^2_{ajustada}$), coeficiente de determinación predicha ($R^2_{predicha}$), coeficiente de variación (CV) y probabilidad de falta de ajuste ($p_{falta\ de\ ajuste}$). Los modelos de predicción obtenidos se emplearon para representar gráficamente el sistema, y con ello poder analizar gráficamente en el sistema el efecto de las variables de proceso (factores) sobre las variables de respuesta.

Optimización: Para la optimización se empleó el método numérico de deseabilidad de la metodología de superficie de respuesta. Para ello, se emplearon los nueve modelos matemáticos de regresión obtenidos para las variables de respuesta, los cuales se emplearon para estimar los valores teóricos de las nueve variables de respuesta en diferentes puntos de la región experimental seleccionados de manera aleatoria. Estos valores predichos fueron transformados en valores de deseabilidad individual para cada variable de respuesta [$d_i(X)$], mediante el empleo de una ecuación de transformación planteada por la metodología de superficie de respuesta para el objetivo de maximizar o minimizar el valor de cada variable de respuesta. Este método de deseabilidad consiste en transformar los valores predichos con los modelos matemáticos $\hat{Y}_i(X)$ en un valor de deseabilidad individual [$d_i(X)$], que toma valores en un rango de 0 a 1 y mide el grado de deseabilidad de la respuesta en relación con el valor óptimo que se intentó alcanzar (en este caso un valor máximo de cada una de las respuestas). El promedio geométrico de las deseabilidades individuales de cada variable de respuesta se usó para determinar la deseabilidad global con la función matemática $D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times d_5 \times d_6 \times d_7 \times d_8 \times d_9)^{1/9}$, donde el valor óptimo ideal es $D = 1$; pero es aceptable un valor de D entre 0.6 y 0.8.

Validación: Para validar las condiciones óptimas, se elaboraron cinco réplicas de la harina de amaranto extrudido con las mejores condiciones de proceso para posteriormente elaborar GFB por quintuplicado con el mejor porcentaje de inclusión

de la EAF; al pan se le evaluó experimentalmente por triplicado cada una de las variables de respuesta. Además, para validar las condiciones óptimas, se construyó un intervalo de confianza teórico para cada respuesta, partiendo de la zona de optimización y utilizando un nivel de confianza del 95%. Para que un modelo pase la prueba de validación es necesario que el promedio de las cinco réplicas de cada respuesta se ubique dentro del rango teórico mencionado anteriormente. El diseño experimental, el análisis estadístico, la optimización y la validación se realizó utilizando el Software Design Expert versión 11 (Design Expert, 2018; Stat-Ease, Inc., 1300 Godward Street Northeast, Suite 6400, Minneapolis, MN 55413, EUA).

Resultados y discusión

Resultados de las variables de respuesta de los 20 tratamientos

Los resultados experimentales de las variables de respuesta exhibieron comportamiento diverso en función de los tratamientos (Tabla 1). Los valores del contenido de proteína (PC) variaron desde 6.7 % hasta 10.7 %. El valor más alto de PC se observó en el tratamiento 14 que incluyó el mayor porcentaje de EAF en el GFB, mientras que el valor más bajo se encontró en el tratamiento 9. De Aguiar *et al.* (2022), elaboraron un pan con 60 % harina de amaranto / 40 % harina de arroz obteniendo una buena aceptación sensorial del pan con un contenido proteínico de 6.9 %. En general, la mayoría de los valores de PC encontrados en este estudio fueron superiores, esta diferencia podría estar asociada a la especie de amaranto utilizado, cantidad y tipo de ingredientes utilizados en la elaboración del pan. Una de las propiedades físicas del pan que influye en la aceptación por parte del consumidor es el color. Este parámetro se ve afectado por las reacciones de pardeamiento no enzimático que ocurren entre un grupo amino de las proteínas y un grupo carbonilo de los azúcares simples (Castro *et al.*, 2017). Esto significa que, un mayor contenido de proteínas en el pan favorece la generación de color, lo que puede influir en la preferencia del producto.

En cuanto al volumen específico (SV), este varió de 1.4 a 2.4 mL/g, en esta variable el valor más alto se encontró en el tratamiento 1 con el menor porcentaje de inclusión de EAF en el GFB y el valor más bajo en el tratamiento 14. El pan con mayor contenido proteínico tuvo el menor volumen específico. Los valores de SV en nuestro pan fueron similares a los reportados por Clerici *et al.* (2009), ellos elaboraron pan utilizando 90 % harina de arroz crudo / 10 % harina de arroz extruido con ácido láctico, obteniendo volúmenes específicos en un rango de 1.63 a 2.25 mL/g. Esta similitud podría deberse al uso de harina de arroz en la elaboración del pan. Sin embargo, nuestros resultados fueron ligeramente inferiores a los informados por De la Barca *et al.* (2010), quienes elaboraron GFB con un SV igual a 3.5 mL/g con 60-70 % de harina de amaranto reventado y 30-40 % de harina de amaranto cruda. Esta diferencia podría deberse a una mayor cantidad de almidón dañado en el amaranto asociado con el proceso de reventado y tostado. Kohyama *et al.* (2022) reportaron que a medida que aumenta el grado de tostado, también aumenta el almidón dañado, por lo que este absorbe más agua en comparación con el almidón intacto. Esta propiedad afecta la textura y la retención de humedad en los productos horneados.

Para el CmC se obtuvieron valores entre 57.93 y 76.60, para el CsC entre 63.22 y 73.38, para la CmT entre 57.41 y 71.15, para CsT entre 56.67 y 70.25, para BS entre 58.75 y 75.17, para BF entre 57.98 y 72.22, el GAB presentó valores entre 55.78 y 73.12, estos valores se encontraron en la escala LAM entre me gusta ligeramente (55.62) y me gusta mucho (78.06). Cabe señalar, que los puntajes más bajos de 4 de las 7 propiedades sensoriales corresponden a CsC, BS, BF y GAB, se encontraron en el tratamiento 8 con condiciones de procesamiento severas de extrusión [ET (149.7 °C), SS (201.5 rpm)] y alto % de EAF (20 %). Con respecto a los valores más altos de las propiedades sensoriales CmC, BS y GAB, se encontraron en el tratamiento 16 en el punto medio del diseño; también notamos que la aceptación por CsC y CsT se vio favorecida a baja temperatura de extrusión (tratamiento 9) de la harina de amaranto. En la Tabla 1, se puede observar que para CmC el puntaje más bajo se encontró en el tratamiento 10 (ET= 170 °C) y el puntaje máximo en el tratamiento 16 (ET= 120 °C), la SS y EAF fue el mismo, por lo tanto, la diferencia entre estos dos tratamientos es la temperatura a la que se extruyó la harina de amaranto, por lo que este parámetro fue de gran importancia. Gómez *et al.* (2011) reportaron que el color de la miga se ve afectado por la reacción de Maillard (esta reacción inicia a alrededor de 120 °C) generada durante el procesamiento térmico para la elaboración del pan.

Modelos de predicción y gráficos de superficie de respuesta

En la Tabla 2 se pueden observar los resultados del análisis de regresión; se obtuvieron modelos matemáticos experimentales significativos ($p < 0.0001$) para cada una de las respuestas con coeficientes de determinación R^2 en un rango de 0.8702 a 0.9221. Los modelos obtenidos presentaron una falta de ajuste no significativa ($p > 0.05$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con los modelos fue inferior al 10%. Estos valores indican que los modelos fueron adecuados y reproducibles. Los modelos incluyeron términos lineales, cuadráticos y de interacción significativos, se puede notar su impacto relativo sobre la respuesta, mediante la comparación de sus coeficientes. Para mejorar los modelos, se eliminaron los términos no significativos, y se dejaron los términos significativos o que eran necesarios para respetar la jerarquía. El análisis de los resultados se centró en 5 de las 9 variables respuestas (PC, SV, CmC, CmT y GAB), basados en los comentarios obtenidos en la evaluación sensorial, los cuales estaban dirigidos a observaciones con respecto a la miga del pan. Sin embargo, las variables de respuestas CsC, CsT, BS y BF, si fueron consideradas para describir el comportamiento de GAB.

Para el PC se obtuvo un modelo cuadrático significativo ($F = 18.06$, $p < 0.0001$). El EAF tuvo un efecto positivo para el término lineal ($F = 13.97$, $p < 0.0001$) y término cuadrático ($F = 7.87$, $p = 0.0149$). El término lineal es 141 % mayor que el término cuadrático, es decir, el factor lineal de EAF es dos veces más importante para el PC que el cuadrático. Este modelo explicó el 89.29 % de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores de PC del GFB. En el modelo cuadrático ($F = 16.55$, $p < 0.0001$) obtenido para el SV, el término con mayor coeficiente fue el SS ($F = 39.75$, $p < 0.0001$) con un efecto negativo en la respuesta, es decir, a SS mayor SV menor. Además, el término cuadrático de la ET ($F = 33.91$, $p < 0.0001$) presentó un efecto importante sobre la SV, por lo que la SV se vio favorecida en las ET intermedias. Para la propiedad CmC del pan, evaluada sensorialmente, se obtuvo un modelo cuadrático ($F = 20.21$, $p < 0.0001$). El término lineal negativo de ET fue el que tuvo mayor efecto

($F = 33.96$, $p < 0.0001$) en la aceptación por el color de la miga de pan, es decir, valores altos de ET, disminuyeron la aceptación por parte del CmC del pan. El modelo de predicción explicó el 90.32 % de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores de CmC del pan. Para la propiedad CmT del pan, evaluada sensorialmente, se obtuvo otro modelo cuadrático ($F = 14.57$, $p < 0.0001$). El modelo obtenido para CmT fue similar al de CmC. Sin embargo, en este modelo el que presentó mayor efecto fue el término lineal de EAF ($F = 34.30$, $p < 0.0001$), es decir, valores altos de EAF disminuyeron la aceptación por parte del CmT, aunque también el efecto de la interacción ET*EAF ($F = 19.17$, $p = 0.0006$) fue de gran importancia, por lo que la aceptación por parte del CmT dependió de la ET a la que se extruyó la EAF. Para la propiedad GAB se obtuvo un modelo cuadrático ($F = 14.57$, $p < 0.0001$) similar al de CmC y CmT. En este modelo, el término con mayor efecto fue la interacción negativa de ET*EAF ($F = 22.47$, $p = 0.0004$), es decir, el efecto sobre la GAB de estas dos variables independientes está condicionado entre sí por ambas variables.

Una vez obtenidos los modelos matemáticos, se generaron gráficos de superficie de respuesta y de contorno (Figura 1). En la Figura 1B se observó que los valores más altos de PC se encontraron en contenidos altos de EAF a ET intermedia, esto podría deberse a que a estas temperaturas podría estar presente una mayor cantidad de almidón dañado, lo que resulta en una mayor cantidad de azúcares disponibles para la fermentación de la levadura, y por tanto más producción de CO₂ (Schober *et al.*, 2005), por lo que al final, el pan presentó menos carbohidratos debido a su liberación en forma de CO₂ y más proteínas por un efecto de concentración. De manera similar, se observó para SV (Figura 1E) es menor en ET intermedia donde observamos que hubo mayor PC.

Por otro lado, la calidad sensorial del pan, incluyendo su color marrón y su sabor característico, se debe en gran medida a la reacción de Maillard, que ocurre cuando el grupo amino de una proteína, un aminoácido o péptido, reaccionan con azúcares reductores, como la glucosa y la maltosa (Camire *et al.*, 1990). Esta reacción, junto con la caramelización, genera una variedad de compuestos conocidos como productos de la reacción de Maillard (MRP) (Capuano *et al.*, 2008). La formación de estos MRP es un proceso complejo influenciado por factores como el tiempo, la temperatura, el pH y los tipos específicos de aminoácidos y azúcares presentes (Liu *et al.*, 2020). La lisina y el triptófano son especialmente responsables del oscurecimiento intenso que se observa en el pan durante este proceso (Bertrand *et al.*, 2018). En nuestro estudio, los puntajes de aceptación de CmC [Figura 1 (G-I)] y CmT [Figura 1 (J-L)] se vieron favorecidos con ET de baja a intermedia y porcentajes de inclusión inferiores al 15% de EAF en el pan. La disminución en la aceptación de la CmC del pan con la inclusión de EAF a altas temperaturas podría deberse a que bajo estas condiciones se favorecen las reacciones de Maillard (Singh *et al.*, 2007), lo que se presentó como un cambio de color en la CmC del pan. Además, el uso de amaranto, pseudocereal rico en lisina, como ingrediente para la elaboración del pan podría haber influido en un mayor oscurecimiento. La lisina es uno de los aminoácidos más reactivos, por lo que cuanto más lisina, más reacción de Maillard (Sahagún & Gómez, 2018).

Tabla 1. Resultados experimentales de las variables de respuesta evaluadas para pan libre de gluten producido con diferentes niveles de inclusión de harina de amaranto extrudido bajo condiciones variables de extrusión.

Tratamiento ¹	Factores					Variables de respuesta						
	ET ²	SS ³	EAF ⁴	PC ⁵	SV ⁶	CmC ⁷	CsC ⁸	CmT ⁹	CsT ¹⁰	BS ¹¹	BF ¹²	GAB ¹³
1	90	88	5.5	7.88	2.42	72.32	71.25	65.95	67.05	66.91	63.85	67.12
2	150	88	5.5	7.97	2.34	75.32	69.65	71.15	68.98	69.48	61.55	70.40
3	90	201	5.5	7.61	1.84	73.80	66.22	68.97	67.34	72.03	69.05	67.12
4	150	201	5.5	8.65	2.00	69.34	65.98	67.67	63.86	70.38	66.33	66.19
5	90	88	20	9.04	2.05	71.52	67.50	69.92	66.55	70.98	72.22	71.25
6	150	88	20	8.54	1.86	62.81	65.92	57.41	60.04	60.78	60.69	58.13
7	90	201	20	8.45	1.75	68.53	65.47	64.20	68.60	67.38	67.32	66.23
8	150	201	20	9.73	1.92	59.35	63.22	57.85	58.20	58.75	57.98	55.28
9	70	145	12.75	6.66	2.41	73.45	73.38	70.43	70.25	71.50	68.41	69.21
10	170	145	12.75	8.24	2.13	57.93	70.37	60.85	56.67	64.22	59.42	58.38
11	120	50	12.75	8.54	2.13	73.94	67.75	68.33	69.96	70.08	69.29	69.33
12	120	240	12.75	9.31	1.41	74.86	64.32	70.97	69.07	68.91	66.95	66.13
13	120	145	0.5	8.13	1.90	72.88	64.23	68.60	67.52	68.27	66.33	66.75
14	120	145	25	10.74	1.66	64.45	63.32	59.43	62.98	65.22	65.12	63.05
15	120	145	12.75	8.35	1.94	75.03	69.73	68.09	66.28	72.91	65.83	66.60
16	120	145	12.75	9.23	1.81	76.60	71.16	70.11	70.20	75.17	69.76	73.12
17	120	145	12.75	8.23	1.76	72.67	69.73	68.55	69.52	72.31	70.93	71.40
18	120	145	12.75	8.58	1.90	75.60	70.12	68.66	68.68	73.32	67.13	68.67
19	120	145	12.75	8.75	1.96	74.98	70.28	69.91	66.09	71.55	70.11	69.88
20	120	145	12.75	8.85	1.99	72.73	68.62	66.18	67.62	70.72	67.62	67.82

¹Diseño experimental central compuesto rotatable con tres factores y cinco niveles de variación; 20 tratamientos. ²ET = temperatura de extrusión (°C), ³SS = velocidad de tornillo (rpm) y ⁴EAF = harina de amaranto extrudido (%), ⁵PC = contenido de proteína (% db), ⁶SV = volumen específico del pan (mL/g), ⁷CmC = color de la miga, ⁸CsC = color de la corteza, ⁹CmT = textura de la miga, ¹⁰CsT = textura de la corteza, ¹¹BS = suavidad del pan, ¹²BF = sabor del pan, ¹³GAB = aceptación global del pan.

Tabla 2. Coeficientes de regresión codificados y análisis de varianza de modelos de predicción experimentales que muestran la relación entre variables de proceso (ET, SS y EAF) y variables de respuesta (PC, SV, CmC, CsC, CmT, CsT, BS, BF and GAB).

Coeficientes	PC ¹	SV ²	CmC ³	CsC ⁴	CmT ⁵	CsT ⁶	BS ⁷	BF ⁸	GAB ⁹
Intercepto									
β_0	9.72	1.85	74.52	69.85	68.76	68.36	72.68	68.31	69.04
Lineal									
β_1	0.3340**	-0.0310 ^{NS}	-3.33**	-0.7860*	-2.27**	-3.02**	-2.21**	-3.00**	-2.92**
β_2	0.1675 ^{NS}	-0.1737**	NS	-1.41**	NS	-0.4486 ^{NS}	-0.1151 ^{NS}	-0.1142 ^{NS}	-1.28*
β_3	0.5874**	-0.1045**	-3.13**	-0.9188**	-2.91**	-1.57**	-1.91**	-0.3379 ^{NS}	-1.91**
Cuadrático									
β_{11}	-0.4597**	0.1548**	-3.17**	0.6811*	-1.25*	-1.85**	-1.84**	-1.80**	-1.98**
β_{22}	NS	NS	NS	-1.38**	NS	NS	-1.26*	NS	NS
β_{33}	0.2428*	NS	-2.12**	-2.18**	-1.83**	-1.21*	-2.23**	-1.16*	-1.59**
Interacción									
β_{12}	0.3417*	0.0765 ^{NS}	NS	NS	NS	-1.16 ^{NS}	NS	NS	NS
β_{23}	NS	0.0844*	NS	NS	NS	NS	-1.46*	-2.20**	NS
β_{13}	NS	NS	-2.05	NS	-2.85**	-1.92**	-2.47**	-1.98**	-3.30**
p modelo	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
p falta de ajuste	0.6674	0.3483	0.1996	0.3780	0.2230	0.5646	0.4424	0.8973	0.8338
CV (%)	3.85	5.20	2.98	1.45	2.76	2.48	2.33	2.37	2.96
R ²	0.8929	0.8842	0.8920	0.9221	0.8702	0.8915	0.9140	0.8964	0.8778
R ² ajustada	0.8435	0.8308	0.8534	0.8862	0.8239	0.8282	0.8515	0.8360	0.8215
R ² predicha	0.7085	0.6927	0.7044	0.7661	0.7192	0.6597	0.6725	0.7628	0.7376

¹PC = contenido de proteína (% db), ²SV = volumen específico del pan (mL/g), ³CmC = color de la miga, ⁴CsC = color de la corteza, ⁵CmT = textura de la miga, ⁶CsT = textura de la corteza, ⁷BS = suavidad del pan, ⁸BF = sabor del pan, ⁹GAB = aceptación global del pan. * nivel de significancia a $p \leq 0.05$. ** nivel de significancia a $p \leq 0.01$. NS no significativo ($p > 0.05$).

Por otro lado, la disminución en la aceptación de CmT con el aumento de la proporción de harina de amaranto en la formulación a partir del 15 % de EAF se relacionó con las proteínas presentes en la harina resultando un pan con textura gomosa (De Aguiar *et al.*, 2022). Finalmente, los resultados de la evaluación sensorial de la GAB se relacionaron con el sabor y características de la corteza del pan.

En Figura 1M se puede observar que el GAB alcanza sus valores máximos alrededor de los 95 °C; valores superiores a los 95 °C, GAB disminuye a mayor ET; Esto podría deberse a que el amaranto a altas temperaturas produce un sabor a nuez que podría resultar desagradable en algunos productos horneados (Ayo *et al.*, 2001). Asimismo, GAB disminuye con el aumento de SS del extrusor. Dalbhagat *et al.* (2019) realizaron una revisión del efecto del proceso de extrusión en productos a base de arroz. Ellos mencionaron que a cualquier temperatura y un alto tiempo de residencia (es decir, baja velocidad del tornillo) dentro del extrusor, aumenta el daño del almidón y con ello aumenta el índice de absorción de agua del producto alimenticio. Por lo tanto, se puede decir que, la harina de amaranto extrudida a SS bajas, debido a su alto grado de absorción de agua, podría afectar de manera negativa el volumen y atributos sensoriales del pan. También se puede observar que, a temperaturas intermedias de extrusión, la GAB disminuye con el contenido de EAF, partiendo de un valor del 15% del contenido de dicho EAF (Figura 1O). Esto podría atribuirse a que, en ET intermedia, la adición de altos contenidos de EAF (superiores al 15 %) aumenta la dureza de la corteza y el número de grietas presentes en la misma, características que los jueces mencionaron como indeseables en el pan. El análisis de las gráficas de la GAB [Figura 1 (M-O)] parece indicar que el uso de EAF como ingrediente para la producción de GFB favorece la aceptación sensorial general de GFB a ET inferior a 120 °C y bajo SS.

Optimización

El impacto de las variables del proceso (ET, SS y EAF) en la variable de optimización Deseabilidad Global (D) se puede observar en los gráficos de contorno (**Figura 2**). La D es una elección razonable, ya que si cualquier $d_i(x) = 0$, la deseabilidad global sería $D = 0$, lo que indica que el pan no es aceptable.

El procedimiento lógico para llevar a cabo la optimización del proceso consistió en estimar valores de las variables respuesta en múltiples puntos de la región experimental mediante el uso de sus respectivos modelos de regresión obtenidos del análisis de regresión y varianza realizado previamente. Las condiciones óptimas [mejores valores de las condiciones del proceso (ET, SS y EAF)] se obtienen utilizando el siguiente criterio: Valores de deseabilidad global (D) entre 0.6 y 0.8 son apropiados para sistemas alimentarios, siendo el valor óptimo ideal $D = 1$. En esta figura se puede observar que la región con los valores más altos de deseabilidad global (D) se encuentran a temperaturas de extrusión inferiores a 120 °C, velocidades del tornillo extrusor inferiores a 150 rpm y contenidos de harina de amaranto en la formulación, utilizada para elaborar la GFB, entre 10 y 20 %. Las condiciones óptimas se obtuvieron seleccionando el punto central de dicha región de optimización mencionada anteriormente.

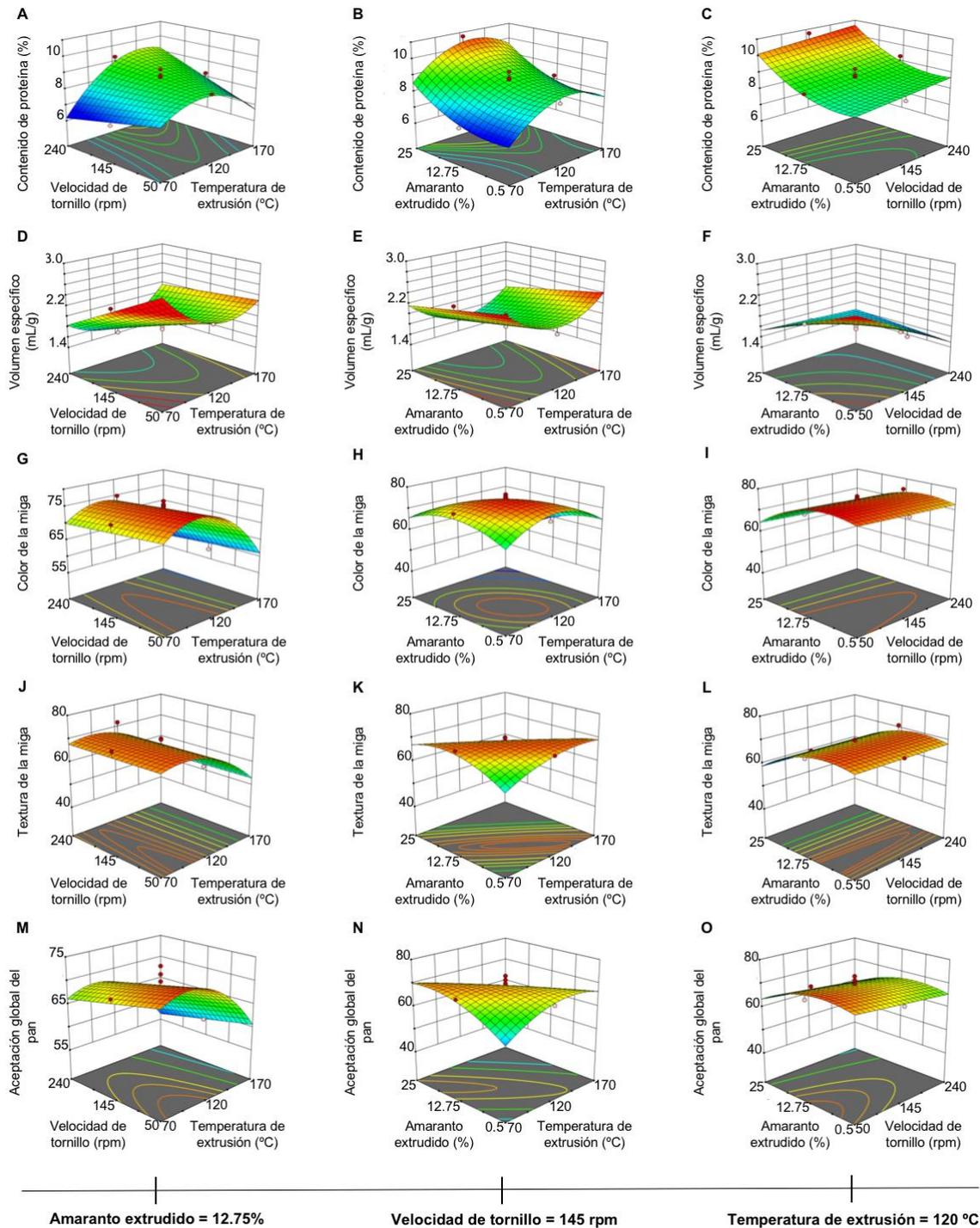


Figura 1. Gráficos de superficie de respuesta y contornos que muestran el efecto de las variables del proceso [temperatura de extrusión (ET), velocidad del tornillo (SS), harina de amaranto extruido (EAF)] sobre las variables de respuesta (A-C) contenido de proteína, (D-F) volumen específico, (G-I) color de la miga, (J-L) textura de la miga y (M-O) aceptación global del pan.

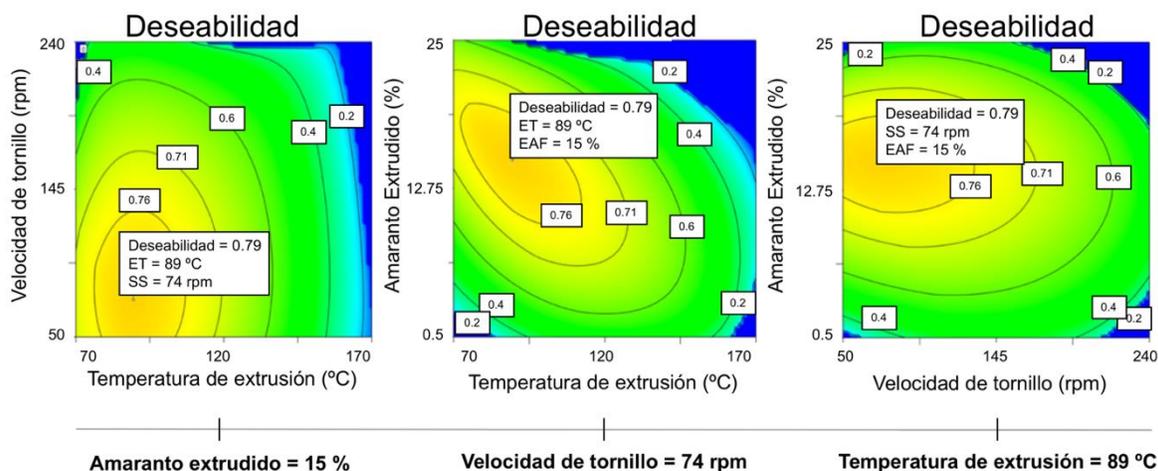


Figura 2. Gráficos de contornos que muestran el efecto de las variables del proceso (temperatura de extrusión, ET; velocidad del tornillo, SS; harina de amaranto extruida, EAF) sobre la deseabilidad global. Se seleccionó la Deseabilidad Global más alta ($D = 0.79$) para obtener la mejor combinación de variables de proceso (ET = 89 °C/ SS = 74 rpm/ EAF = 15 %).

El valor óptimo de Deseabilidad Global seleccionado fue $D = 0.79$ y el cual se ubica en las mejores condiciones del proceso. Los valores óptimos seleccionados de ET, SS y EAF para obtener pan sin gluten con los valores más altos posibles de PC, SV, CmC, CsC, CmT, CsT, BS, BF y GAB fueron ET = 89 °C, SS = 74 rpm y EAF = 15 %.

Los valores de deseabilidad individual para cada una de las variables de respuesta asociados con la Deseabilidad Global óptima seleccionada fueron: $d_{PC} = 0.41$, $d_{SV} = 0.88$, $d_{CmC} = 0.91$, $d_{CsC} = 0.71$, $d_{CmT} = 0.89$, $d_{CsT} = 0.88$, $d_{BS} = 0.79$, $d_{BF} = 0.91$, $d_{GAB} = 0.93$, y donde se puede observar que la mayoría de las deseabilidades individuales estuvieron arriba de 0.63 que es considerado como aceptable y bueno (López-Ríos & Rudnykh, 2018). El valor de Deseabilidad Global óptimo obtenido con estas deseabilidades individuales fue de 0.79. En este caso, la deseabilidad global está cerca de 0.8, lo que indica que la combinación de variables de proceso parece lograr resultados favorables para todas las respuestas. Sin embargo, la deseabilidad individual indicó que la combinación fue más efectiva para maximizar el SV, CmC, CsC, CmT, CsT, BS, BF y GAB que para maximizar el PC. También, se encontraron los valores óptimos de las variables de proceso, a partir de los valores predichos por los modelos matemáticos.

Los valores predichos para el contenido de proteína (PC) y volumen específico (SV) del GFB adicionada con el contenido óptimo (15%) de harina de amaranto extruida (HAE), preparada con las mejores condiciones de extrusión (ET y SS), fueron de 9.34 % y 2.30 mL/g, respectivamente. Mientras que, los atributos de calidad sensorial predichos para este GFB, preparado con las condiciones de proceso óptimas, fueron: color de la miga (CmC) = 74.9, color de la corteza (CsC) = 70.4, textura de la miga (CmT) = 69.7, textura de la corteza (CsT) = 68.6, suavidad del pan

(BS) = 71.7, sabor del pan (BF) = 71.0. La aceptabilidad global del pan (GAB) se correlacionó positivamente con los atributos sensoriales mencionados anteriormente, obteniendo un valor de 71.9 para este atributo sensorial, el cual se ubica entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho” en una escala LAM.

Validación

En la Tabla 3 se muestran los valores predichos por los modelos matemáticos, el intervalo de confianza del 95 % obtenido a partir de ellos y los resultados de las variables de respuesta evaluadas experimentalmente al pan obtenido de las cinco réplicas empleando la condición óptima encontrada. Al contrastar los resultados experimentales con los valores predichos, se observó que estos últimos cayeron dentro del rango teórico, lo que sugiere que las condiciones óptimas fueron adecuadas y reproducibles. Esto indica que el modelo utilizado fue capaz de predecir con precisión los resultados observados experimentalmente, lo que respalda la validez y la utilidad de las condiciones establecidas.

Díaz-Corona *et al.* (2024) evaluaron el efecto de un tratamiento con agua caliente optimizado en la conservación de berenjenas frescas, encontrando que la aplicación de la condición óptima fue la más adecuada para mantener la calidad de las berenjenas. En este artículo ellos realizaron optimización y validación, similar a lo que nosotros hicimos en nuestro trabajo de investigación reportado en el presente manuscrito. De manera similar, Félix-Medina *et al.* (2020) realizaron la optimización y validación de las variables del proceso de extrusión y el nivel de inclusión de harina de frijol para desarrollar botanas de segunda generación (directamente expandidas); estos investigadores también validaron las condiciones óptimas del proceso encontrando que estas fueron adecuadas y reproducibles. Menchaca-Armenta *et al.* (2020) utilizaron la optimización para determinar las mejores condiciones de extrusión para elaborar harinas de maíz nixtamalizado extrudidas y con ellas producir tortillas con buenas propiedades tecnofuncionales y sensoriales. En esta investigación, los resultados de optimización también pasaron la prueba de validación. Los resultados de estas investigaciones demuestran la robustez de la metodología de superficie de respuesta como técnica de optimización para encontrar las mejores condiciones de procesos de diferente índole (por ejemplo, tratamiento hidrotérmico, extrusión, etc.), las cuales fueron adecuadas y altamente reproducibles, ya que las condiciones óptimas pasaron la prueba de validación.

Conclusiones

En el presente estudio se encontró que tanto la temperatura de extrusión como la velocidad del tornillo son factores cruciales en el proceso de cocción por extrusión de la harina de amaranto. Estos parámetros influyen significativamente en las características finales del GFB. Se determinaron las condiciones óptimas de extrusión de la harina de amaranto y su porcentaje óptimo de inclusión de EAF en la mezcla compuesta para la producción de GFB con propiedades nutricionales mejoradas y buenas propiedades tecno-funcionales y sensoriales. Además, esta mezcla representa una harina alternativa para el consumo no sólo de pacientes celíacos sino también de pacientes que presentan otras reacciones adversas a alimentos como intolerancia al gluten no celíaca y alergia al trigo.

Tabla 3. Contraste de los resultados experimentales con los valores teóricos predichos para cada una de las variables de respuesta evaluadas en pan sin gluten fortificado con la proporción óptima (15 %) de harina de amaranto extrudido (EAF) obtenida con las mejores condiciones de temperatura de extrusión y velocidad tornillo (ET = 89 °C/ SS = 74 rpm).

Variables de respuesta	Valores predichos	Intervalo de confianza teórico del 95%	Valores experimentales
Contenido de proteína (% db)	9.34	8.75 a 9.93	9.44
Volumen específico (mL/g)	2.30	2.11 a 2.47	2.27
Color de la miga	74.89	71.74 a 78.05	74.28
Color de la corteza	70.42	68.86 a 71.98	71.88
Textura de la miga	69.70	66.81 a 72.60	71.76
Textura de la corteza	68.58	65.57 a 71.59	71.44
Suavidad del pan	71.72	69.05 a 74.40	70.83
Sabor del pan	70.98	68.52 a 73.44	73.00
Aceptación global del pan	71.87	68.88 a 74.87	72.78

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado, R.; desarrollo de la metodología, López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado R, Perales Sánchez, J.X.K., Pineda Hidalgo, K.V.; manejo de software, Gutiérrez Dorado, R.; validación experimental, López Olivas, Z.V.; análisis de resultados, López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado, R., Perales Sánchez, J.X.K.; Manejo de datos, López Olivas, Z.V., Gutiérrez Dorado R, Perales Sánchez, J.X.K., escritura y preparación del manuscrito, López Olivas, Z.V.; redacción, revisión y edición, Gutiérrez Dorado, R., Perales Sánchez, J.X.K., Reyes Moreno, C.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo, fue financiada con fondos propios.

Declaración de consentimiento informado

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los sujetos involucrados en el estudio.

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 la alumna Zaida Viviana López Olivas para los estudios de posgrado en ciencia y tecnología de alimentos.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- American Association of Cereal Chemists [AACC]. (1995) Approved Method of the AACC. 9th Edition, St. Paul.
- Asociación de Químicos Analíticos Oficiales [AOAC]. (2012). Métodos oficiales de análisis, 19ª ed. Washington.
- Ayo, J. A. (2001). The effect of amaranth grain flour on the quality of bread. *International Journal of Food Properties*, 4(2), 341–351. <https://doi.org/10.1081/ijfp-100105198>
- Bertrand, E., El Boustany, P., Faulds, C. B., & Berdagué, J. L. (2018). The Maillard Reaction in Food: An Introduction. *In Reference Module in Food Science*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.21459-5>
- Caio, G., Volta, U., Sapone, A., Leffler, D. A., De Giorgio, R., Catassi, C., & Fasano, A. (2019). Celiac disease: a comprehensive current review. *BMC medicine*, 17(1), 142. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1380-z>
- Camire, M. E., Camire, A., & Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 29(1), 35-57.
- Capuano, E., Ferrigno, A., Acampa, I., Ait-Ameur, L., & Fogliano, V. (2008). Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. *European Food Research and Technology*, 228, 311–319. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0936-5>
- Cardello, A. V., & Schutz, H. G. (2004). Research note numerical scale-point locations for constructing the LAM (Labeled Affective Magnitude) scale. *Journal of Sensory Studies*, 19(4), 341-346. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2004.tb00152.x>
- Castro, W., Oblitas, J., Chuquizuta, T., & Avila-George, H. (2017). Application of image analysis to optimization of the bread-making process based on the acceptability of the crust color. *Journal of Cereal Science*, 74, 194-199.
- Clerici, M., Arioldi, C., & El-Dash, A. (2009). Production of acidic extruded rice flour and its influence on the qualities of gluten-free bread. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 42(2), 618-623. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2008.08.010>
- Dalbhagat, C. G., Mahato, D. K., & Mishra, H. N. (2019). Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.001>
- De Aguiar, E. V., Santos, F. G., Centeno, A. C. L. S., & Capriles, V. D. (2022). Defining Amaranth, Buckwheat and Quinoa Flour Levels in Gluten-Free Bread: A Simultaneous Improvement on Physical Properties, Acceptability and Nutrient Composition through Mixture Design. *Foods*, 11(6), 848. <https://doi.org/10.3390/foods11060848>
- De la Barca, A. M., Rojas-Martínez, M. E., Islas-Rubio, A. R., & Cabrera-Chávez, F. (2010). Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), 241–246. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0187-z>
- Díaz-Corona, D. A., López-López, M. E., Ayón-Reyna, L. E., Caro-Corrales, J., Gutiérrez-Dorado, R., Bastidas-Bastidas, P. D. J., & Vega-García, M. O. (2024). Characterization of an optimized hot water treatment for eggplant as a non-chemical mean to maintain postharvest quality: validation of its effect on bioactive compounds and antioxidant capacity. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-11.
- Fasano, A., & Catassi, C. (2012). Clinical practice. Celiac disease. *The New England Journal of Medicine*, 367(25), 2419–2426. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1113994>
- Félix-Medina, J. V., Montes-Ávila, J., Reyes-Moreno, C., Perales-Sánchez, J. X. K., Gómez-Favela, M. A., Aguilar-Palazuelos, E., & Gutiérrez-Dorado, R. (2020). Second-generation snacks with high nutritional and antioxidant value produced by an optimized extrusion process from corn/common bean flours mixtures. *LWT*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109172>
- Gómez-Valdez, L. C., Gutiérrez-Dorado, R., Gómez-Aldapa, C. A., Perales-Sánchez, J. X. K., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Mora-Rochín, S., & Reyes Moreno, 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., Jiménez S., Ruiz E., & Oliete B. (2011). Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality. *Food Science and Technology*, 44(10), 2231-2237. 406-413.
- Juan, R., Pastor, J., Alaiz, M., Megías, C., & Vioque, J. (2007). Caracterización proteica de las semillas de once especies de amaranto. *Grasas y Aceites*, 58(1), 49-55.
- Kohyama, N., Ichinose, Y., Kaneko, S., & Matsuki, J. (2022). Changes in starch, β -glucan, physicochemical properties, and flavor compounds in barley flour by roasting. *Food Science and Technology Research*, 28(5), 363-371. <https://doi.org/10.3136/fstr.FSTR-D-22-00054>
- Liu, X., Xia, B., Hu, L. T., Ni, Z. J., Thakur, K., & Wei, Z. J. (2020). Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: A review. *Food Frontiers*, 1, 382–397. <https://doi.org/10.1002/fft2.43>
- López-Ríos, V. I., & Rudnykh, S. I. (2018). Elección de la función de deseabilidad para diseños óptimos bajo restricciones. *Revista EIA* 15(30), 13-24.

- Masure, H. G., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2016). Current and forward looking experimental approaches in gluten-free bread making research. *Journal of Cereal Science*, 67, 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.09.009>
- Menchaca-Armenta, M., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Quintero-Ramos, A., Ledesma-Osuna, A. I., Frutos, M. J., & Morales-Rosas, I. (2020). Effect of extrusion conditions on the anthocyanin content, functionality, and pasting properties of obtained nixtamalized blue corn flour (*Zea mays* L.) and process optimization. *Journal of Food Science*, 85(7), 2143-2152.
- Moreno, C. R., Fernández, P. C. R., Rodríguez, E. O. C., Carrillo, J. M., & Rochín, S. M. (2018). Changes in Nutritional Properties and Bioactive Compounds in Cereals During Extrusion Cooking. *Extrusion of Metals, Polymers, and Food Product*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68753>
- Pohjanheimo, T. (2010). Sensory and non-sensory factors behind the liking and choice of healthy food products. *Functional Foods Forum*; Department of Biochemistry and Food Chemistry, University of Turku.
- Rybicka, I., Doba, K., & Bińczak, O. (2019). Improving the sensory and nutritional value of gluten-free bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(9), 2661-2667. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14190>
- Sahagún, M., & Gómez, M. (2018). Assessing influence of protein source on characteristics of gluten-free breads optimising their hydration level. *Food and Bioprocess Technology*, 11(9), 1686–1694. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2135-0>
- Schober, T. J., Messerschmidt, M., Bean, S. R., Park, S. H., & Arendt, E. K. (2005). Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. *Cereal chemistry*, 82(4), 394-404. <https://doi.org/10.1094/cc-82-039>
- Sciari, L. S., Steffolani, M. E., & Leon, A. E. (2016). El rol del gluten en la panificación y el desafío de prescindir de su aporte en la elaboración de pan. *Agriscientia*, 33(2), 61-74.
- Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 42(8), 916-929. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>
- Soriano-García, M., & Aguirre-Díaz, I. S. (2019). Nutritional functional value and therapeutic utilization of Amaranth. In *Nutritional value of amaranth*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86897>
- Ziena, H. M., Shamsia, S. M., Mahgoub, S. A., & Emara, M. A. (2019). Nutritious biscuits for celiac patients: Effect of different cereals and legumes blends. *Alexandria Science Exchange Journal*, 40, 340-346. <https://doi.org/10.21608/asejaiqisae.2019.36524>