

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Optimization of the drying process of the chicozapote fruit (*Manilkara zapota* L.) on the techno-functional and nutraceutical properties

Optimización del proceso de secado del fruto de chicozapote (*Manilkara zapota* L.) sobre las propiedades tecno-funcionales y nutracéuticas

Authors/Autores: Chavez-Millan, E.M., Vázquez-Ontiveros, M.E., Quintero-Soto, M.F., Rios-Herrera, G.D, Badilla-Medina, C.N., Félix-Medina, J.V., Díaz-Peña, I., Salas-López, F., Argüelles-López, O.D.

ID: e1780

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1780>

Received/Fecha de recepción: October 09th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: March 18th 2025

Available online/Fecha de publicación: March 24th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Chavez-Millan, E.M., Vázquez-Ontiveros, M.E., Quintero-Soto, M.F., Rios-Herrera, G.D, Badilla-Medina, C.N., Félix-Medina, J.V., Díaz-Peña, I., Salas-López, F., Argüelles-López, O.D. (2025). Optimization of the drying process of the chicozapote fruit (*Manilkara zapota* L.) on the techno-functional and nutraceutical properties. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1780. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1780>

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.

Artículo original

Optimization of the drying process of the chicozapote fruit (*Manilkara zapota* L.) on the techno-functional and nutraceutical properties

Optimización del proceso de secado del fruto de chicozapote (*Manilkara zapota* L.) sobre las propiedades tecno-funcionales y nutracéuticas

Chavez-Millan, E.M.¹ (ORCID), Vázquez-Ontiveros, M.E.^{1*} (ORCID), Quintero-Soto, M.F.^{1*} (ORCID), Rios-Herrera, G.D.^{1,2} (ORCID), Badilla-Medina, C.N.¹ (ORCID), Félix-Medina, J.V.³ (ORCID), Díaz-Peña, I.³ (ORCID), Salas-López, F.⁴ (ORCID), Argüelles-López, O.D.⁵ (ORCID).

¹ Maestría en Biotecnología Agropecuaria, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, Carretera a Potrerillos del Norote Km 3, 82700, La Cruz, Elota, Sinaloa, México.

² Posdoc Universidad Politécnica de Sinaloa, Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, 82199, Mazatlán, Sinaloa, México.

³ Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, Juan de Dios Bátiz S/N, Guadalupe Victoria, 80220, Culiacán, Sinaloa, México.

⁴ Facultad de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Occidente, UR Culiacán. Blvd. Lola Beltrán y Blvd. Rolando Arjona, 4 de marzo, 80020, Culiacán, Sinaloa, México

⁵ Facultad de Ciencias Químicas Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle Josefa Ortiz de Domínguez, esq. Blvd de las Américas, Ciudad Universitaria, 80010, Culiacán Sinaloa, México.

*Corresponding Author:

Martha Elena Vázquez-Ontiveros. Maestría en Biotecnología Agropecuaria, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, Carretera a Potrerillos del Norote Km 3, 82700, La Cruz, Elota, Sinaloa, México. Email: mvazquez@upmys.edu.mx.

María Fernanda Quintero-Soto. Maestría en Biotecnología Agropecuaria, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra, Carretera a Potrerillos del Norote Km 3, 82700, La Cruz, Elota, Sinaloa, México. Email: mquintero@upmys.edu.mx.

RESUMEN

El chicozapote es una fruta endémica de México, poco conocida y consumida. Esta fruta tiene un alto contenido de nutrientes y compuestos bioactivos que podrían utilizarse para mejorar el valor nutracéutico de otros alimentos al ser una fuente de obtención de compuestos. Sin embargo, el chicozapote tiene una vida útil muy corta. Uno de los procesos más utilizados de conservación es el secado al brindarnos menor susceptibilidad a la degradación microbiana. Por lo tanto, decidimos optimizar el proceso de secado para producir una harina funcional con buenas propiedades tecnofuncionales y nutracéuticas. El objetivo de este estudio fue optimizar el proceso de secado sobre las propiedades tecno-funcionales y nutracéuticas de una harina procesada de chicozapote (OPCF) utilizando un diseño compuesto central rotatable de superficie de respuesta. Los resultados obtenidos en este estudio indican que la mejor combinación de variables del proceso de secado para obtener la HPOC, con mejores valores en el Índice de Absorción de Aceite, el Índice de Absorción y Solubilidad en Agua, la Actividad Antioxidante, Antocianinas Totales y Fenólicos Totales, se observó a una temperatura de secado de 74.1 °C y un tiempo de 12 h, respectivamente. Por lo que concluimos que la optimización del proceso de secado generó efectos beneficiosos en la harina funcional de chicozapote.

PALABRAS CLAVE:

Actividad antioxidante; Compuestos fenólicos totales; Antocianinas totales; Alimentos funcionales; Optimización.

ABSTRACT

Chicozapote is an endemic fruit in Mexico, which is also little known and consumed. This fruit has a high content of nutrients and bioactive compounds that could be used to improve the nutraceutical value of other foods as a source of such compounds. However, chicozapote fruit has a short shelf life. One of the most used conservation processes is drying, which offers less susceptibility to microbial degradation. Therefore, optimizing the drying process to produce functional flour with good techno-functional and nutraceutical properties was decided. This study aimed to optimize the drying process of processed chicozapote flour (OPCF) to preserve its techno-functional and nutraceutical properties using a rotatable central composite design of the response surface. Obtained data indicate that the best combination of drying process variables to obtain OPCF with better values for Oil Absorption Index, Water Absorption and Solubility Index, Antioxidant Activity, Total Anthocyanins, and Total Phenolics, were observed at a drying temperature and time of 74.1 °C and 12 h, respectively. Therefore, it is concluded that optimization of the drying process generated beneficial effects on the functional chicozapote flour.

KEYWORDS:

Antioxidant activity; Total phenolic compounds; Total anthocyanins; Functional foods; Optimization.

INTRODUCCIÓN

El chicozapote (*Manilkara zapota* L.) es una fruta tropical considerada una baya, cuya forma varía de esférica a cónica. Su mesocarpio es carnoso, rico en almidones y pigmentos colorantes, con células cargadas de aceites aromáticos. La piel es áspera y marrón cuando está verde, volviéndose lisa a medida que madura, mientras que la pulpa blanda, jugosa y carnosa es muy dulce, liberando una fragancia suave y agradable (Vargas y Vargas *et al.*, 2015). A nivel mundial, India es el principal país productor, con plantaciones de aproximadamente 163,210 hectáreas y rendimientos de 8.7 toneladas/ha. En México, el chicozapote se cultiva en 13 estados, con una superficie de 2,138 hectáreas y rendimientos de 7.37 toneladas/ha (SIAP, 2024). En México, este árbol se conoce principalmente por su uso nutricional, mientras que en otros países su principal aporte es la extracción de látex para la fabricación de goma de mascar (García-Cuevas *et al.*, 2021). Tradicionalmente, se ha utilizado para tratar tos, úlceras diarreicas, hemorragias, espasmos musculares, dolor, enfermedades pulmonares y desordenes neurológicos, entre otras afecciones médicas (Bashir, 2019). En el caso específico del chicozapote, presenta interés nutricional por ser una fuente de carotenoides, fenoles, y vitaminas C y A, compuestos nutricionales con efectos potencialmente protectores debido a su actividad antioxidante. Además, contiene nutrientes en grandes cantidades como carbohidratos, proteínas, grasas, fibra y minerales (Punia-Bangar *et al.*, 2022). Como fruta, se consume fresca cuando está completamente madura, sirviendo como postre en muchas regiones. Después de ser cortada de la planta, continúa su proceso de maduración, exhibiendo un patrón climatérico. Su vida útil a temperatura ambiente es muy corta, alcanzando su madurez comercial entre 6 y 8 días después de la cosecha. En uno o dos días más, entra en un estado avanzado de maduración y en fase de senescencia, lo que la hace altamente perecedera y difícil de conservar y comercializar (Rivas-Gastelum *et al.*, 2023).

Los alimentos se pierden o desperdician a lo largo de toda la cadena alimentaria, desde la producción agrícola inicial hasta el consumo final en los hogares. En términos generales, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que alrededor de un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o desperdicia a nivel mundial, lo que equivale a 1,050 millones de toneladas al año (FAO, 2013). Una parte significativa de esta pérdida se debe a la falta de medios adecuados de almacenamiento o procesamiento. Esto resalta la importancia de desarrollar procesos de conservación apropiados que

también preserven las características nutricionales presentes en los alimentos (Espinoza-Moreno *et al.*, 2021).

Uno de los procesos más utilizados en la industria es el secado. Este método es uno de los más antiguos para la conservación de alimentos, ya que reduce la susceptibilidad a la degradación microbiana. Además, disminuye el volumen y el peso de la materia prima, lo que resulta en una reducción significativa de los costos de empaque, almacenamiento y transporte (Serna-Cock *et al.*, 2015). Por las razones mencionadas, el objetivo de este estudio fue optimizar el secado del fruto de chicozapote para obtener una harina con buenas propiedades tecno-funcionales y nutraceuticas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron frutos de chicozapote provenientes de la localidad de El Saladito, Elota, Sinaloa (coordenadas geográficas: Latitud 23.8833, Longitud -106.85). Los frutos fueron cosechados en estado de madurez y no presentaban signos de daño biológico ni mecánico.

Producción de harina procesada optimizada de chicozapote (HPOC)

Para el proceso de secado, los frutos de chicozapote fueron lavados y desinfectados. Posteriormente, se les retiró la cáscara, se rebanaron en rodajas de 0.4 cm y se colocaron en bandejas de acero inoxidable. Estas bandejas se introdujeron en un horno de calentamiento (ECOSHEL, 9023A) bajo condiciones de temperatura de secado (DT) y tiempo de secado (Dt) de acuerdo con las diferentes combinaciones proporcionadas por el diseño experimental. Los frutos deshidratados obtenidos de cada tratamiento fueron molidos utilizando un molinillo de café, obteniéndose así 13 harinas deshidratadas de chicozapote correspondientes. Posteriormente, estas harinas fueron evaluadas para las variables de respuesta: Índice de Absorción de Aceite (OAI), Índice de Absorción de Agua (WAI), Índice de Solubilidad en Agua (WSI), Actividad Antioxidante (AoxA), Contenido Total de Antocianinas (TAC) y Contenido Total de Fenoles (TPC).

Índice de Absorción de Aceite, Índice de Absorción de Agua e Índice de Solubilidad en Agua

Los OAI, WAI y WSI se evaluaron de acuerdo con Ruiz-Armenta *et al.* (2022). Se mezclaron muestras de 0.5 g de harina con 3 mL de aceite vegetal, se agitaron en vórtex durante 1 minuto, se dejaron reposar durante 30 minutos y finalmente se centrifugaron (1,600xg/25°C/25 min). Se midió el volumen de aceite libre. La cantidad de aceite absorbido se calculó restando el volumen de aceite libre al volumen inicial de aceite y se expresó como mL de aceite absorbido por gramo de harina. La prueba se realizó por triplicado. Para el WAI y el WSI, se mezclaron muestras de 1 g de harina con 15 mL de agua destilada a 25 °C y se agitaron durante 30 minutos. Luego, la mezcla fue centrifugada (3,000xg/25 °C/10 min) y se recuperaron el sobrenadante y el precipitado. El sobrenadante obtenido del ensayo de WAI se decantó en un recipiente de cristal, se evaporó en un horno (80 °C/12 h) y se pesó. El WAI y el WSI se expresaron como porcentaje de sólidos secos.

Cuantificación del Contenido Total de Antocianinas

Para determinar el contenido total de antocianinas (TAC), se preparó un extracto hidroalcohólico mezclando 1 g de la muestra con 10 mL de etanol frío al 80 % (-20 °C), según lo descrito por Abdel-Aal y Hucl (1999). La mezcla se homogeneizó (500 rpm/30 min) y se centrifugó (10,000xg/10 min). El sobrenadante obtenido después de la centrifugación se utilizó para medir la absorbancia a 535 nm y 700 nm. El TAC se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula, y los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de cianidina-3-glucósido por gramo de peso seco (mg C3GE/g dw) según la ecuación 1.

$$TAC = \left(\frac{A_{535} - A_{700}}{\epsilon} \right) * V_T * PM * \left(\frac{1}{MM} \right) \dots (1)$$

Donde ϵ = Coeficiente de absorción molar de cianidina-3-glucosido ($25,965 \text{ cm}^{-1} \text{ M}^{-1}$), VT = Volumen total (mL), PM = Peso molecular de cianidina-3-glucosido (449.2 g/mol), MM = Peso de la muestra (g).

Cuantificación del Contenido Total de Compuestos Fenólicos de la Extracción

Para la determinación del Contenido Total de Fenoles (TPC), se prepararon extractos metanólicos siguiendo el método descrito por Quintero-Soto *et al.* (2022). Se mezclaron 500 mg de muestra con 20 mL de metanol al 80 % y se sometieron a agitación (60 min/300 rpm). Posteriormente, se hidrolizaron (2 N HCl, 30 min/90 °C) y se centrifugaron (10,000xg/30 min). El sobrenadante se lavó con 40 mL de hexano. Luego, el sobrenadante se mezcló con agua (20 mL) y acetato de etilo (40 mL). Los compuestos fenólicos se recuperaron del acetato de etilo por evaporación. La muestra seca se almacenó a -20 °C hasta su uso.

El TPC se determinó siguiendo el método descrito por Singleton *et al.* (1999). A 0.2 mL del extracto, se le añadieron 2200 μL de reactivo de Folin-Ciocalteu, y la mezcla se dejó reposar durante 3 minutos en oscuridad. Posteriormente, se añadieron 60 μL de una solución de carbonato de sodio al 7 % (p/v) y se incubó durante 90 minutos. La absorbancia de las muestras se midió a 765 nm. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 gramos de peso seco (mg GAE/100 g, dw).

Actividad antioxidante (AoxA)

La actividad antioxidante *in vitro* (AoxA) se determinó utilizando el ensayo ABTS (Quintero-Soto *et al.*, 2022). Se preparó una solución de radical ABTS a 7.4 mmol/L mezclando ABTS con persulfato de potasio a 2.6 mmol/L y se incubó durante 16 horas en la oscuridad a temperatura ambiente (25°C). La solución de radical ABTS se diluyó posteriormente con un tampón fosfato de 10 mmol/L (pH 7.4) hasta alcanzar una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm. Posteriormente, se mezclaron 3 mL de la solución con 0.75 mL de la muestra y se incubaron a temperatura ambiente durante 6 minutos antes de realizar lecturas a 734 nm. La actividad antioxidante (AoxA) se expresó como μmol equivalentes de Trolox (TE)/100 g de muestra (ps).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental compuesto central rotacional (metodología de superficie de respuesta, RSM) con dos factores (variables de proceso) (temperatura de secado [X1 = DT, 40 °C a 80 °C] / tiempo de secado [X2 = Dt, 7 h a 22 h]) y cinco niveles de variación (2 factoriales [codificados: -1, +1], 2 axiales [codificados: -1.414 (- α), +1.414 (+ α)] y 1 central [codificado: 0]), lo que dio lugar a 13 tratamientos (Tabla 1). Los valores para los niveles de las variables independientes se determinaron con base en pruebas preliminares. Las variables dependientes en este estudio fueron: Índice de Absorción de Agua (WAI), Índice de Solubilidad en Agua (WSI), Índice de Absorción de Aceite (OAI), Actividad Antioxidante (AoxA), así como el Contenido Total de Antocianinas (TAC) y Fenoles (TPC).

Optimización

El proceso de secado se optimizó para encontrar los valores máximos de WAI, WSI, AoxA, TPC y TAC, y los valores mínimos utilizando el método numérico. Se aplicó el procedimiento de regresión escalonada, y los términos no significativos ($p > 0.1$) fueron eliminados de un polinomio de segundo orden. Posteriormente, se calculó un nuevo polinomio hasta obtener un modelo predictivo para cada variable de respuesta. El software estadístico Design Expert 7.0.0 se utilizó para los análisis de RSM.

Obtención y evaluación experimental de la harina procesada optimizada de chicozapote

Una vez determinadas las mejores condiciones de temperatura y tiempo, el modelo empleado fue validado experimentalmente secando la fruta bajo las condiciones óptimas predichas: una temperatura de 74.1 °C y un tiempo de secado de 12 horas. Después de obtener las frutas deshidratadas, estas se molieron en un molino de café, obteniendo así harina procesada y optimizada de chicozapote (OPCF). Finalmente, la OPCF se envasó en bolsas de polietileno y se almacenó a temperatura ambiente. Posteriormente, la OPCF fue caracterizada en función de sus propiedades tecno-funcionales y nutraceuticas (WAI, WSI, OAI, AoxA, TPC y TAC).

Tabla 1. Diseño experimental (13 tratamientos) y resultados experimentales del índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI), índice de absorción de aceite (OAI), contenido total de compuestos fenólicos (TPC), contenido total de antocianinas (TAC) y actividad antioxidante (AoxA) de la harina procesada y optimizada de chicozapote (OPCF).

| Tratamientos | Variables procesadas ¹ | | Variables de respuesta ² | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------|-----|--------|---------|--------|
| | DT (°C) | Dt (h) | WAI | WSI | OAI | TPC | TAC | AoxA |
| 1 | 45.86 | 9.20 | 0.33 | 35.14 | 1 | 197.33 | 67.54 | 26.588 |
| 2 | 45.86 | 19.80 | 0.84 | 44.49 | 0.8 | 400.10 | 132.89 | 58.601 |
| 3 | 74.14 | 9.20 | 1.97 | 50.84 | 1 | 510.40 | 138.84 | 60.602 |
| 4 | 74.14 | 19.80 | 2.76 | 54.76 | 0.7 | 276.77 | 100.88 | 42.584 |
| 5 | 60.00 | 7.00 | 0.96 | 40.74 | 1.1 | 303.18 | 105.151 | 45.501 |
| 6 | 60.00 | 22.00 | 2.18 | 50.67 | 1.1 | 396.15 | 124.79 | 47.699 |
| 7 | 40.00 | 14.5 | 0.67 | 38.56 | 1 | 399.27 | 113.58 | 40.934 |
| 8 | 80.00 | 14.5 | 2.56 | 52.02 | 0.5 | 499.93 | 121.86 | 49.402 |
| 9 | 60.00 | 14.5 | 1.94 | 51.31 | 1.2 | 542.76 | 123.53 | 54.618 |
| 10 | 60.00 | 14.5 | 1.92 | 50.82 | 1 | 432.87 | 127.77 | 43.884 |
| 11 | 60.00 | 14.5 | 1.58 | 50.63 | 1 | 448.04 | 143.98 | 50.317 |
| 12 | 60.00 | 14.5 | 1.92 | 51.23 | 1 | 453.66 | 125.80 | 48.500 |
| 13 | 60.00 | 14.5 | 1.65 | 48.37 | 1 | 440.50 | 126.40 | 54.067 |

¹DT = Temperatura de secado; Dt = Velocidad de secado; ²WAI = Índice de absorción de agua (g de gel/g de muestra); WSI = Índice de solubilidad en agua (%); OAI = Índice de absorción de aceite (g de gel/g de aceite); TPC = Compuestos fenólicos totales (mg de equivalentes de ácido gálico [GAE]/100g de muestra); AoxA = Actividad antioxidante (mmol de equivalentes de Trolox [TE]/100g)

Análisis estadístico

Los resultados de las propiedades tecno-funcionales y nutraceuticas se sometieron a un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las comparaciones de medias se realizaron utilizando el método de diferencia mínima significativa (LSD, Least Significant Difference) con un nivel de confianza del 95 %, empleando el programa STATGRAPHICS Plus versión 5.1 (Statistical Graphics Corporation™, Rockville, Maryland, EUA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la metodología de superficies de respuesta (RSM)

Modelado de las variables de respuesta

Las harinas optimizadas obtenidas del proceso de secado mostraron diferentes propiedades tecno-funcionales y nutracéuticas. Los valores máximos y mínimos obtenidos para cada respuesta se presentan en la Tabla 1. Además, la Tabla 2 muestra el análisis de varianza para las respuestas WAI, WSI, OAI, AoxA, TAC y TPC. Se observa que los datos presentaron un modelo de regresión significativo, con valores de $R^2 \geq 0.71$, coeficiente de variación (CV) < 13.88 , valor de F $p < 0.0084$ y sin falta de ajuste.

Índice de Absorción de Agua

La Tabla 2 muestra los modelos estadísticos para cada variable de respuesta evaluada, observando que el tiempo ($p < 0.001$) y la temperatura ($p < 0.0001$) en sus expresiones lineales fueron los factores que tuvieron un efecto en la absorción de agua en OPCF. El modelo matemático para esta variable de respuesta mostró un $R^2 = 0.921$, $CV = 13.88\%$, y un valor de F $p < 0.0001$, con una falta de ajuste significativa ($p = 0.2200$). La siguiente ecuación 2 muestra el modelo matemático utilizado para el WAI.

$$WAI = 2.71 + 0.055 * T + 0.071 * t \dots (2)$$

La Figura 1A muestra el comportamiento del WAI en respuesta al efecto de la temperatura y el tiempo de secado. La mayor absorción de agua ocurrió en las muestras secadas a altas temperaturas y tiempos de secado prolongados, lo que se atribuye a un mayor daño celular en las muestras, lo que provoca un mayor número de moléculas de agua que se unen a los residuos polares de las cadenas (Meda & Ratti, 2005). Techeira *et al.* (2014), al caracterizar harinas de diversas variedades de yuca, encontraron que emplear condiciones de temperatura más altas conduce a un aumento en el WAI. Mencionan que este comportamiento se debe a la presencia de fuerzas intragranulares más débiles, que permiten el paso de moléculas de agua hacia los gránulos de almidón, lo que provoca un aumento en el tamaño. Cornejo y Rosell (2015) han indicado que un alto nivel de proteína también se traduce en una interacción notable con el agua. Un aumento en el WAI se asocia con el lixiviado y solubilidad de la amilosa, así como la pérdida de la estructura cristalina del almidón. Este comportamiento es similar a lo que se encontró en este estudio, donde someter la harina a condiciones de alta temperatura y tiempos de secado prolongados puede afectar la estructura del almidón, resultando en comportamientos similares. García-Pacheco *et al.* (2019) mencionan que la variación en el WAI entre diferentes harinas puede deberse a la relación entre sus concentraciones variables de proteínas, su grado de interacción con el agua y las características que han adquirido según su origen.

Se ha demostrado que el WAI depende principalmente de las proteínas y algunos de sus parámetros, como tamaño, forma, factores estéricos y el equilibrio hidrofílico-hidrofóbico de los aminoácidos en las moléculas, así como de lípidos y carbohidratos (Guerra-Baños *et al.*, 2020). También se observa que, para temperaturas y tiempos de secado bajos, la respuesta muestra valores mínimos. Esto puede explicarse por el mayor contenido de humedad en las muestras, lo que provoca que la cantidad de agua añadida no sea absorbida en grandes cantidades. Además, las bajas condiciones aplicadas no afectaron la estructura de las proteínas, reduciendo la absorción. Un bajo WAI puede indicar que el almidón es de baja calidad, ya que tiende a producir pastas delgadas e inestables. Sin embargo, un WAI muy alto puede afectar negativamente las propiedades mecánicas de la masa (von Atzingen & Machado Pinto e Silva, 2005). El rango de referencia para el índice de absorción de agua se encuentra entre 0.82 y 15.52 g gel/g muestra (Anderson, 1982).

Tabla 2. Resultados del análisis de regresión de los modelos polinomiales de segundo orden para cada una de las variables de respuesta estudiadas.

| Parámetros | Coeficientes de los parámetros de regresión | | | | | |
|-----------------------------|---|------------|------------|-----------|------------|------------|
| | WAI | WSI | OAI | TPC | TAC | AoxA |
| Intercepción | -2.71 | -58.21 | -1.225 | -1905.38 | -416.44 | 11.19E5 |
| Lineal | | | | | | |
| DT | 0.055*** | 2.093*** | 0.089*** | 36.24** | NS | 2683.13** |
| Dt | 0.071*** | 4.046*** | -0.012** | NS | 31.08** | NS |
| Cuadrática | | | | | | |
| DT x DT | NS | -0.012*** | -0.0008*** | NS | -0.0373** | NS |
| Dt x Dt | NS | -0.0770*** | NS | -2.498* | -0.3143** | NS |
| Interacción | | | | | | |
| Dt x Dt | NS | NS | NS | -1.457*** | -0.3443*** | -166.77*** |
| Valor p del modelo | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |
| R ² | 0.92 | 0.97 | 0.71 | 0.85 | 0.90 | 0.85 |
| R ² adj | 0.90 | 0.94 | 0.60 | 0.74 | 0.83 | 0.79 |
| R ² pred | 0.86 | 0.86 | 0.17 | 0.32 | 0.64 | 0.72 |
| Valor p sin falta de ajuste | 0.2200 | 0.3200 | 0.2300 | 0.3400 | 0.5300 | 0.6500 |
| CV (%) | 13.88 | 2.84 | 12.05 | 12.19 | 6.68 | 8.39 |

NS = No significativo ($p > 0.1$); *Significativo en $p < 0.1$; **Significativo en $p < 0.05$; ***Significativo en $p < 0.01$. DT = Temperatura de secado; Dt = Tiempo de secado.

Índice de solubilidad en Agua

El tiempo ($p < 0.001$) y la temperatura ($p < 0.0001$) en su expresión lineal fueron los factores con el efecto más significativo sobre la respuesta del WSI en la harina de chicozapote evaluada. Sin embargo, es notable que los factores en sus expresiones cuadráticas y la interacción también mostraron efectos significativos sobre la respuesta. El modelo obtenido tuvo un $R^2 = 0.9700$, CV = 2.84 % y un valor p de la prueba F < 0.0001 , y no presentó falta de ajuste con un valor p de 0.32.

La siguiente ecuación 3 representa el modelo matemático utilizado para el WSI en agua, en el cual se observa un modelo cuadrático.

$$WSI = -58.207 + 2.093 * T + 4.046 * t - 0.019 * T * t - 0.0118 * T^2 - 0.076 * t^2 \dots (3)$$

En la figura 1B se observa el comportamiento del WSI en respuesta al efecto de la temperatura y el tiempo de secado. Se puede ver que a medida que aumentan tanto los tiempos de secado como las temperaturas, el WSI también aumenta. García-Jimenez y Vázquez (2016) indican que el WSI es un parámetro directamente proporcional a la cantidad de sólidos disueltos en agua, lo cual, a su vez, está relacionado con el grado de secado de la harina. Este es un factor crítico, ya que un largo tiempo de secado rompe las cadenas de almidón y genera cadenas cortas que retienen un mayor número de moléculas de agua. Njintang y Mbofung (2015) afirman que, aunque el secado a altas temperaturas es más eficiente, el proceso impacta negativamente en la calidad del producto en términos de color, funcionalidad y desempeño de la harina durante la reconstrucción. Techeira *et al.* (2014) obtuvieron un comportamiento similar en la harina de yuca. Los valores más altos de solubilidad se obtuvieron en el rango más alto de temperatura, ya que presentan una estructura intragranular más débil, que se rompe más fácilmente bajo estas condiciones, permitiendo la exudación de una mayor cantidad de componentes moleculares en la dispersión.

Índice de Absorción en Aceite

En la figura 1C, se ilustra el comportamiento del OAI de la HPOC en relación con la temperatura y los tiempos de secado. Los factores que tuvieron el efecto más significativo en la respuesta fueron la temperatura y el tiempo en su expresión lineal. El modelo para esta variable de respuesta mostró un $R^2 = 0.7115$, $CV = 12.05\%$, y un valor p de la prueba $F = 0.0084$, y no presentó falta de ajuste con un valor p de 0.23 . La siguiente ecuación 4 representa el modelo matemático utilizado para el índice de solubilidad en agua, en el cual se observa un modelo cuadrático.

$$OAI = -1.225 + 0.088 * T - 0.018 * t - 7.989 \times 10^{-4} * T^2 \dots (4)$$

Se observa que a medida que aumentan los valores de temperatura, la respuesta se ve favorecida, incrementando el OAI hasta alcanzar un máximo. Punia-Bangar *et al.* (2022) mencionan que la fruta tiene grandes cantidades de proteínas, por lo que esta respuesta se explica de acuerdo con los hallazgos reportados por Miquilena *et al.* (2016), quienes mencionan que el OAI es la capacidad de las proteínas de la harina para unirse físicamente a la grasa mediante atracción capilar. Esto ocurre bajo condiciones moderadas dentro de un rango determinado de temperaturas y tiempos de secado para harinas, donde la estructura proteica parece sufrir pequeñas alteraciones estructurales que favorecen la retención física de la grasa. Esto podría ser resultado de la captura física de las grasas por las proteínas a través de la formación de micelas, lo que lleva a un aumento en la respuesta, similar a los resultados de este proyecto. Sin embargo, cuando los valores de temperatura y condiciones de tiempo de secado continúan aumentando, las proteínas comienzan a perder su estructura, lo que posteriormente conduce a una disminución en la respuesta.

El OAI se atribuye a la captura física de grasa dentro de las proteínas, donde los enlaces covalentes, como las fuerzas electrostáticas, interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno, juegan un papel en la interacción lipídica-proteica (Lawal, 2004). Esta propiedad es crucial para la formulación de productos de panadería, productos cárnicos y sustitutos, sopas y alimentos fritos, ya que está relacionada con la capacidad de retención de sabor y la suavidad del producto final (El-Adawy & Taha, 2001). Además, el OAI reduce el desarrollo de la rancidez oxidativa, lo que aumenta la estabilidad durante el almacenamiento (Shate, 2002).

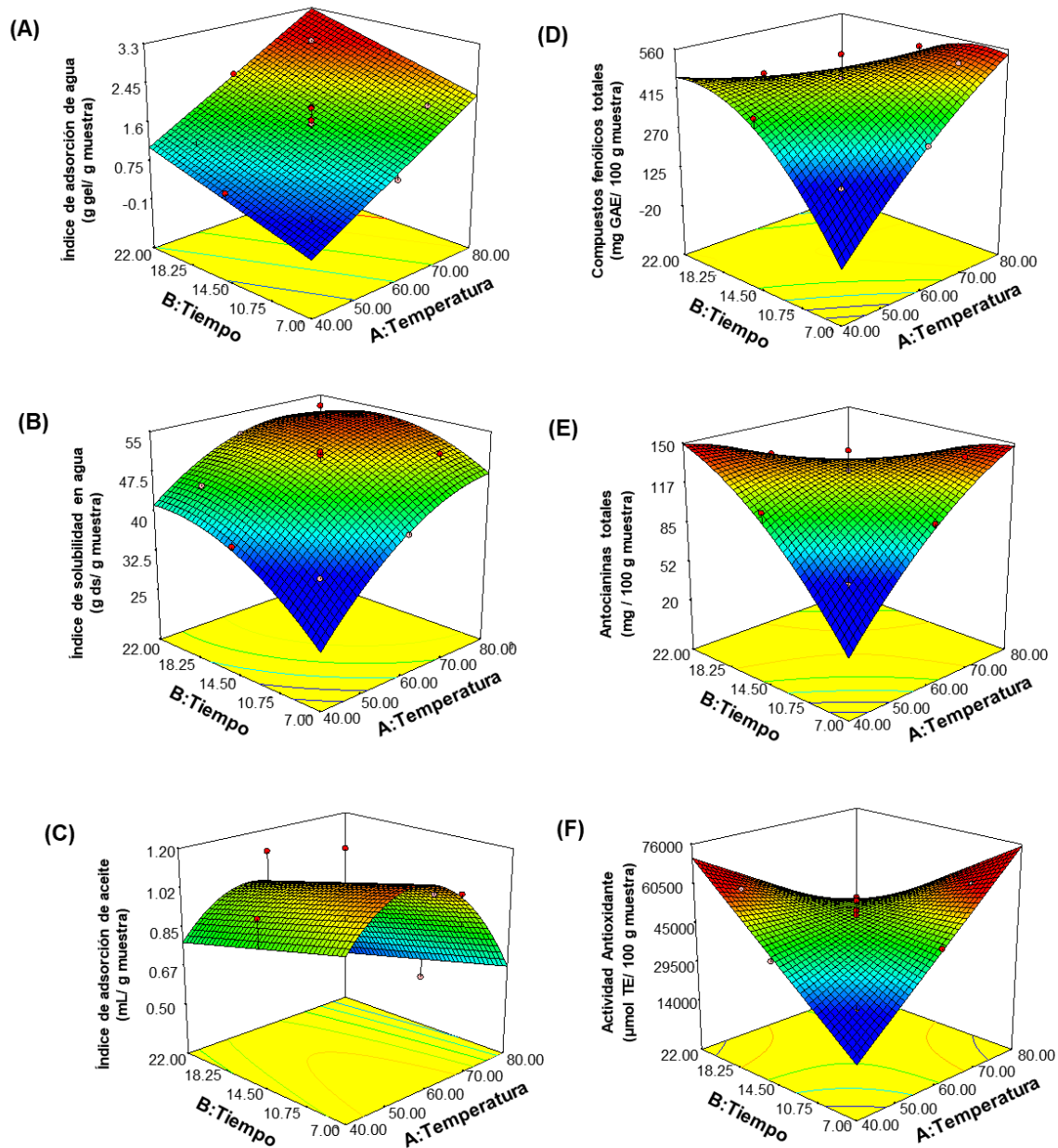


Figura 1. Gráficos de contorno que muestran el efecto de las variables del proceso de secado (temperatura y tiempo) sobre las variables de respuesta: (A) Índice de Absorción de Agua, (B) Índice de Solubilidad en Agua, (C) Índice de Absorción de Aceite, (D) Compuestos Fenólicos Totales, (E) Antocianinas Totales y (F) Actividad Antioxidante de la harina procesada de chicozapote.

Contenido total de fenoles

En este estudio, se encontró que la temperatura ($p = 0.049$) fue el factor que tuvo el efecto más significativo sobre el TPC en su expresión lineal. Además, los factores temperatura y tiempo en su expresión cuadrática también mostraron un efecto significativo sobre la respuesta. El modelo para

esta variable de respuesta presentó un $R^2 = 0.8500$, $CV = 12.19\%$ y un valor p del test $F < 0.0084$. La siguiente ecuación 5 representa el modelo matemático utilizado para determinar el contenido total de fenoles:

$$TFC = -1905.38 + 36.24 * T - 1.46 * T * t - 0.10 * T^2 - 2.49 * t^2 \dots (5)$$

La Figura 1D muestra el comportamiento del TPC bajo la influencia de la variación de temperatura y tiempo de secado. Se puede observar que, bajo altas temperaturas y tiempos de secado cortos, el TPC se ve favorecido. Gómez-Maqueo *et al.* (2020) informaron que el contenido de compuestos fenólicos y carotenoides en los tomates permanece estable durante el procesamiento a altas temperaturas. Además, también informaron que el proceso térmico puede aumentar el contenido de compuestos fenólicos al liberar ácidos fenólicos unidos a los componentes celulares. De manera similar, Kim y Chin (2016) obtuvieron un comportamiento similar en el proceso de secado en el rango de 60 a 70 °C, atribuyendo este efecto a las reacciones de Maillard que ocurren durante el proceso de tostado. Yao *et al.* (2020) han reportado un aumento en el TPC con el incremento de la temperatura debido a la pérdida de enlaces covalentes y componentes celulares, liberando antioxidantes, como ácidos fenólicos, flavonas, fenoles y otros compuestos, que están unidos a macromoléculas debido al tratamiento térmico. Con base en lo anterior, se puede concluir que el efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de compuestos fenólicos depende de la especie y variedad de la materia prima utilizada. Estas variaciones también dependen del método elegido para extraer los compuestos fenólicos y la temperatura y tiempo de procesamiento.

Contenido total de antocianinas

En la figura 1E, se puede observar que los factores con un efecto significativo sobre las antocianinas fueron el tiempo en su término lineal ($p = 0.0446$) y en su término cuadrático ($p = 0.0223$), así como la temperatura ($p = 0.043$) en su término cuadrático y la interacción entre estos factores con $p = 0.0003$. El modelo matemático para esta variable de respuesta mostró valores de $R^2 = 0.9040$, $CV = 6.68\%$, y un valor p de la prueba $F < 0.0019$, con una probabilidad de ajuste significativa ($p = 0.5315$). La siguiente ecuación 6 presenta el modelo matemático utilizado para la determinación del TAC.

$$TAC = -416.44 + 9.92 * T + 31.08 * t - 0.34 * T * t - 0.037 * T^2 - 0.314 * t^2 \dots 6$$

Se puede observar que el TAC aumentó con el incremento de la temperatura. Menchaca-Armenta *et al.* (2020) informaron niveles más altos de antocianinas a temperaturas intermedias-altas (85 a 105 °C), similar a lo observado en este estudio. Yemmireddy *et al.* (2013) proponen que el efecto de la temperatura sobre las antocianinas es una hidrólisis del enlace glucosídico, seguida de una conversión de aglicona a chalcona (pigmentos incoloros). Cabe resaltar que temperaturas superiores a 100 °C resultan en una degradación mucho mayor del color que temperaturas inferiores a 90 °C, debido a que la temperatura puede inducir un aumento en el contenido de factores de transcripción negativos, los cuales se unen a los promotores e inhiben la expresión de los genes de las antocianinas, según Zou *et al.* (2021). La estabilidad de las antocianinas en los alimentos se ve significativamente afectada por la temperatura.

En general, las características estructurales que conducen a un aumento en la estabilidad del pH también contribuyen a la estabilidad térmica. Las antocianinas altamente hidrolizadas son menos estables que las formas metiladas, glucosiladas o acetiladas (Habibi *et al.*, 2020a). La estabilidad térmica de las antocianinas varía con su estructura, pH, la presencia de oxígeno e interacciones con otros componentes del sistema (Habibi *et al.*, 2020b). Wang y Xu (2007) especifican que las antocianinas son inestables cuando se exponen a altas temperaturas.

Actividad Antioxidante (AoxA)

En la figura 1F, se puede observar que los factores que tuvieron un efecto significativo sobre la AoxA fueron la temperatura y el tiempo de secado en sus términos lineales, así como la interacción entre ambos factores con $p = 0.002$. El modelo matemático para esta variable de respuesta mostró valores de $R^2 = 0.8417$, $CV = 8.39\%$, y valor p del test $F = 0.0006$, con una probabilidad de ajuste significativa ($p = 0.648$). La siguiente ecuación 7 presenta el modelo matemático utilizado para la AoxA por el método ABTS de fruta de chicozapote deshidratada:

$$AoxA = -1.189E05 + 2683.13 * T + 10409.53 * t - 166.77 * T * t \dots (7)$$

Los parámetros que tuvieron el mayor efecto sobre la AoxA fueron el tiempo de secado y la temperatura en su expresión lineal. Se puede observar que, a altas temperaturas y bajos tiempos de secado, la respuesta aumenta. Alvis-Celis (2020) explica que el aumento de la AoxA podría deberse a que las altas temperaturas permiten la formación de nuevos compuestos con mayor actividad antioxidante, como los formados en la reacción de Maillard. Giovanelli *et al.* (2001) mencionan que el tratamiento térmico aumenta el nivel de flavonoles libres, los cuales tienen una significativa actividad antioxidante. Krzykowski *et al.* (2020) afirman que el calentamiento es la principal causa de la pérdida de antioxidantes, pero también puede inducir la formación de compuestos como melanoidinas a través de la reacción de Maillard, y estos compuestos tienen efectos antioxidantes. Estos compuestos se generan a altas temperaturas, como 100°C , durante un corto tiempo de secado.

Zapata- Bustamante *et al.* (2014) describieron un comportamiento similar al nuestro al aumentar la temperatura durante el tueste de granos de cacao. Mencionaron que esto ocurre debido a la generación de productos intermedios y melanoidinas causadas por la reacción de Maillard, ya que la actividad captadora de radicales aumenta debido a la presencia de melanoidinas. Sin embargo, es posible observar que a medida que la temperatura continúa aumentando, hay una tendencia decreciente, lo que podría atribuirse a la formación de otros compuestos con menor actividad antioxidante durante la reacción de Maillard a temperaturas más altas. Piga *et al.* (2003) sometieron cultivares de ciruela "presidente" a secado usando dos temperaturas (60 y 85°C) y observaron que la AoxA se duplicó a 85°C . Se encontraron resultados similares en la respuesta de este proyecto. Explican que el aumento de la AoxA podría ser el resultado de dos factores: a) la oxidación parcial de los compuestos fenólicos aumenta el poder antioxidante presente en la muestra (pero es temporal), b) la alta temperatura permite la formación de nuevos compuestos con mayor capacidad antioxidante, como los formados en la reacción de Maillard.

Optimización

El proceso de optimización se realizó para determinar las mejores condiciones de temperatura y tiempo de secado, con el objetivo de obtener una harina deshidratada con buenas propiedades tecno-funcionales y nutraceuticas. Se empleó un método numérico para este procedimiento, y se establecieron diferentes criterios para cada una de las variables de respuesta. Se esperan valores altos para las respuestas de contenido total de compuestos fenólicos, contenido total de antocianinas, actividad antioxidante, índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua. En contraste, se desean valores bajos para el índice de absorción de aceite. Estas variables fueron elegidas para la optimización ya que el desarrollo de un producto alimenticio con buenas características y beneficios para la salud depende de sus propiedades funcionales y nutraceuticas.

En la figura 2, se muestran los gráficos de barras de la deseabilidad individual para las variables de respuesta y la deseabilidad global o combinada del proceso. La deseabilidad máxima tiene un valor de 1, y la deseabilidad mínima tiene un valor de 0. Se puede observar que la deseabilidad individual tanto para la temperatura como para el tiempo de secado fue 1.0, ya que se les asignó un rango como su objetivo, lo que indica que siempre tendrán una deseabilidad de 1.

La AoxA mostró una deseabilidad de 0.881, lo que indica que alcanzó aproximadamente el 88.1 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior de AoxA. El TAC mostró una deseabilidad de 0.887, lo que demuestra que cubrió aproximadamente el 88.7 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior. El TPC presentó una deseabilidad de 0.918, lo que indica que alcanzó el 91.8 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior de TPC. En el caso de OAI, mostró una deseabilidad de 0.541, lo que indica que cubrió aproximadamente el 54.1 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior de OAI. El WSI mostró una deseabilidad de 0.872, lo que indica que alcanzó aproximadamente el 87.2 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior de WSI. El WAI presentó una deseabilidad de 0.784, lo que indica que alcanzó aproximadamente el 78.4 % de la diferencia entre el límite superior y el límite inferior de WAI.

La deseabilidad global (GD) o combinada se presenta mediante la siguiente fórmula 8:

$$GD = (0.881 * 0.887 * 0.918 * 0.541 * 0.784 * 0.802)^{1/6} = DG = 0.802 \dots (8)$$

Con los resultados obtenidos de la optimización numérica, se determinaron las mejores condiciones del proceso, siendo una temperatura de secado (DT) de 74 °C y un tiempo de secado (Dt) de 12 horas. Bajo estas condiciones óptimas, se obtuvieron los siguientes valores predichos para cada uno de los modelos matemáticos: OAI = 0.82 mL de aceite absorbido/g de harina, WAI = 2.24 g gel/g (b.s.), WSI = 52.27 g sólidos secos/100 g sólidos originales, AoxA = 56.57 mmol TE/100 g (b.s.), TAC = 134.36 mg/100 g (b.s.), y TPC = 514.58 mg GAE/100 g (b.s.).

Para la validación de los modelos empleados, se deshidrató fruto de chicozapote bajo las condiciones óptimas determinadas en el proceso. Tras obtener el fruto deshidratado, se produjo harina y se evaluó para verificar los valores predichos.

De la caracterización de la HPOC, se obtuvieron los siguientes valores promedio y desviaciones estándar: OAI = 0.7 ± 0.25 mL de aceite absorbido/g de harina, WAI = 2.259 ± 0.38 g gel/g (b.s.), WSI = 49.90 ± 0.30 g sólidos secos/100 g sólidos originales, AoxA = 64.42 mmol TE/100 g (b.s.), TAC = 131.07 mg/100 g (b.s.), y TPC = 587.77 mg GAE/100 g (b.s.). Al comparar los valores experimentales con los valores predichos por los modelos matemáticos, no se observó una diferencia significativa entre ellos ($p < 0.05$). Por lo tanto, el modelo empleado demostró experimentalmente un buen ajuste para determinar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de secado, obteniendo fruto deshidratado con buenas propiedades tecno-funcionales y nutraceuticas.

Caracterización de la harina procesada optimizada de chicozapote

Propiedades tecno-funcionales

Para extender la vida útil del fruto, sus propiedades tecno-funcionales se modificaron mediante la optimización del proceso de secado, obteniendo una harina funcional y nutraceutica que promueve su uso como ingrediente en el desarrollo de nuevos alimentos, como una forma de valorizar el cultivo. Las propiedades tecno-funcionales evaluadas fueron el índice de absorción de agua (WAI), el índice de solubilidad en agua (WSI) y el índice de absorción de aceite (OAI). El fruto fresco mostró valores bajos de WAI y OAI (0.001 ± 0.00 g gel/g y 0.000 ± 0.00 mL de aceite absorbido/g, respectivamente), lo cual era de esperarse debido a su alto contenido de agua (88.02 %). Por otro lado, para la OPCF, se observaron valores de WAI de 2.259 ± 0.38 g agua/g. Esta propiedad puede estar influenciada por varios factores, uno de ellos, como se mencionó anteriormente, es la composición química de la harina. Martínez-Martí *et al.* (2023) investigaron el índice de absorción de agua de cáscaras de mandarina secadas por aire caliente, reportando valores de 6.6 g agua/g. Los valores más bajos de WAI observados en este estudio podrían deberse a las diferentes condiciones ambientales en las que se desarrollaron los productos, así como a la composición química de cada material. El OAI (0.7 ± 0.25 mL de aceite absorbido/g) obtenido para la OPCF en este estudio es menor al reportado para harina de maíz funcional con caupí obtenida

por extrusión (Sotelo-Díaz *et al.*, 2023). Un menor OAI garantizaría que, si el producto es frito o entra en contacto con aceite, absorberá menos cantidad de este. Esto hace que la OPCF sea una buena opción para la elaboración de alimentos fritos. El WSI determinado para las muestras frescas y procesadas fue de 20.12 ± 0.75 g sólidos secos/100 g sólidos originales y 49.90 ± 0.30 g sólidos secos/100 g sólidos originales, respectivamente. Los valores observados de WSI para la OPCF sugieren que puede ser utilizada en la producción de bebidas funcionales.

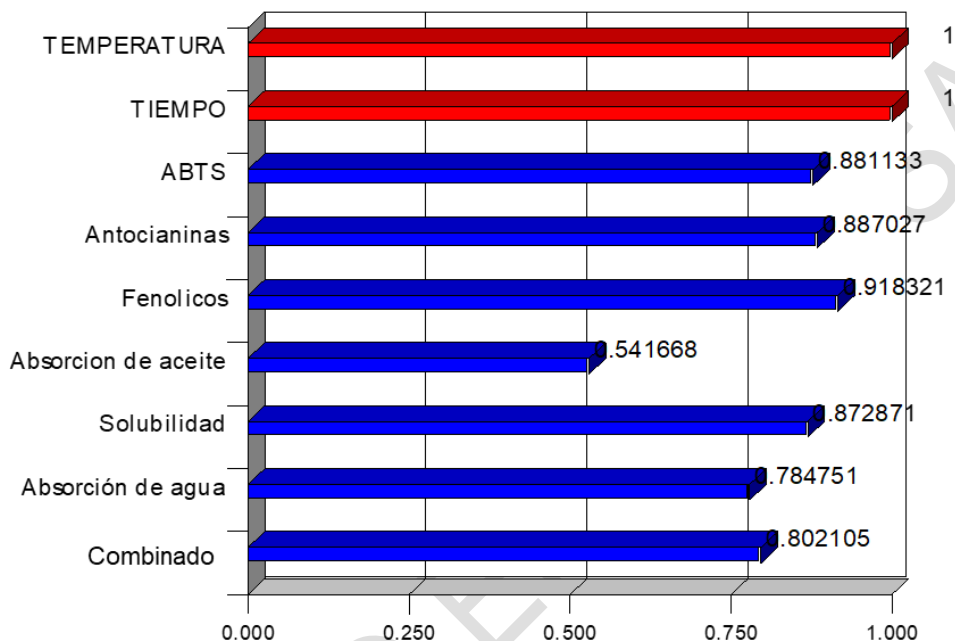


Figura 2. Deseabilidad individual y global (combinada) de las variables del proceso (temperatura y tiempo) y respuestas (índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, índice de absorción de aceite, compuestos fenólicos totales, antocianinas totales y actividad antioxidante) analizadas durante la optimización.

Propiedades Nutraceuticas

En la Figura 3A se muestra el contenido total de compuestos fenólicos (TPC) de la harina procesada optimizada de chicozapote (OPCF), preparada bajo las mejores condiciones del proceso de secado ($DT = 74.1 \text{ }^\circ\text{C} / Dt = 12 \text{ h}$). El TPC de la harina optimizada fue significativamente menor ($p < 0.05$) que el de la harina de chicozapote sin procesar (UPCF) [587.77 vs 691.28 mg GAE/100 g (b.s.); retención= 85.03 %]. Comportamientos similares han sido reportados en microalgas (retención= 50 %) y mango (retención = 47 %) por investigadores como Subbiah *et al.* (2023) y Medeiros *et al.* (2022), quienes atribuyen esta disminución a la degradación de los compuestos fenólicos debido a la exposición prolongada a la temperatura. Sin embargo, a pesar de la disminución observada en el TPC de la harina optimizada, los valores de este estudio son similares a los reportados por Baky *et al.* (2022) para un fruto de la misma familia que el chicozapote (*Manilkara hexandra* = 650 mg GAE/100 g) extraído con solución hidroalcohólica y sin procesar.

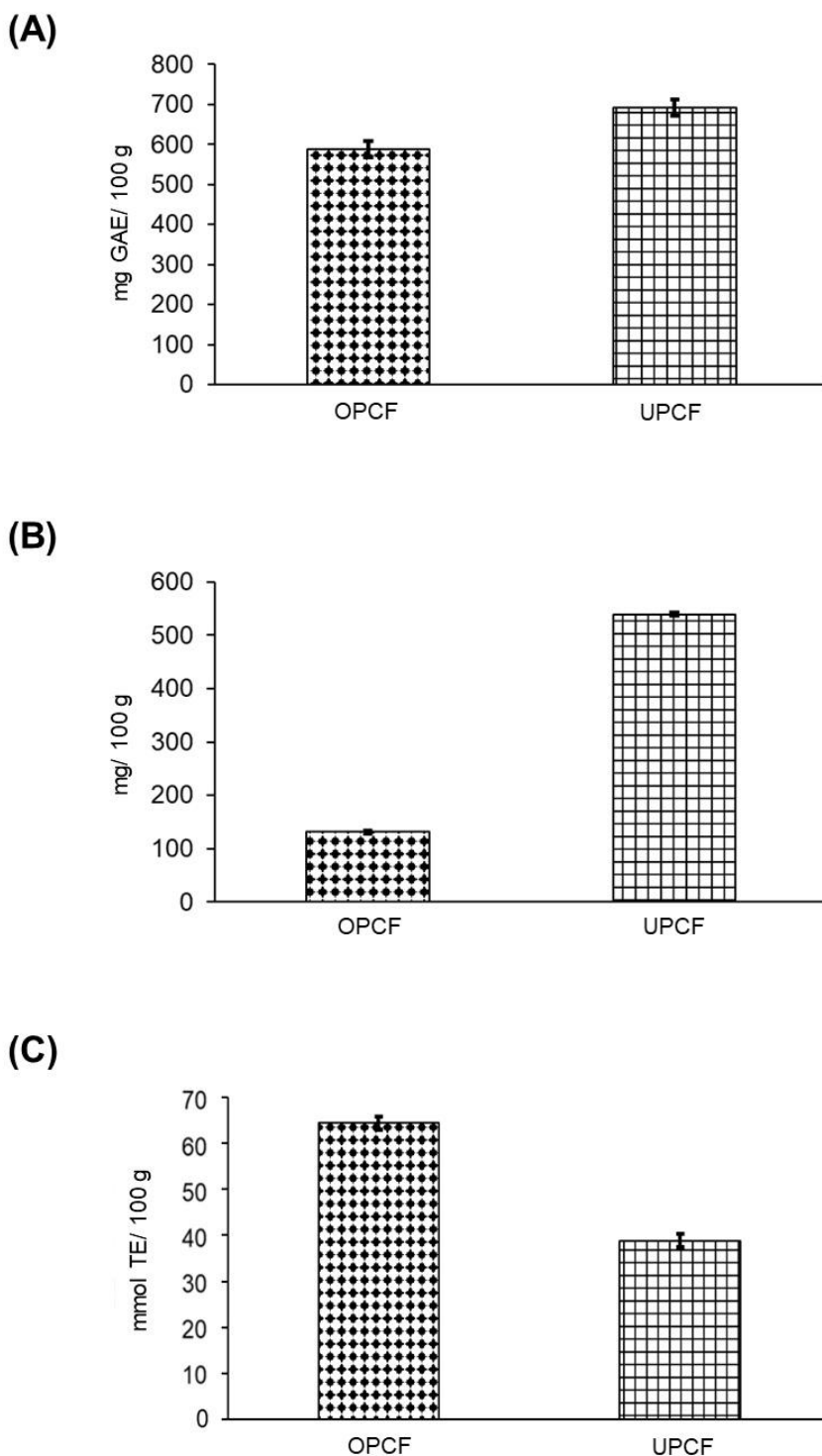


Figura 3. Contenido de compuestos fenólicos (A), antocianinas (B) y actividad antioxidante (C) de una harina procesada optimizada de chichazapote (OPCF) y harina de chichazapote sin procesar (UPCF).

El contenido total de antocianinas (TAC) de la OPCF fue significativamente menor ($p < 0.05$) que el de la UPCF [131.67 vs 539.07 mg/100 g (b.s.); retención = 24.43 %] (Figura 3B). Los bajos valores de retención de TAC se deben al efecto drástico del proceso de secado; temperaturas superiores a 60 °C causan la desnaturalización de las antocianinas (Patras *et al.*, 2010). Los valores observados en este estudio para la UPCF son similares a los obtenidos por Li *et al.* (2023) para rábano rojo fresco (608.91 mg/100 g), pero mayores que los del rábano rojo deshidratado con aire caliente a 60 °C (52.97 mg/100 g) (retención = 9 %). Esto sugiere que el tipo de antocianinas presentes en el chicozapote es más resistente a las temperaturas, o que la matriz en la que se encuentran las protege parcialmente de la degradación.

La AoxA de la UPCF y OPCF se determinó mediante la técnica colorimétrica ABTS (Figura 3C). Los valores obtenidos para las muestras analizadas fueron 38.86 y 64.42 mmol ET/100 g (b.s.) para la UPCF y OPCF, respectivamente [aumento = 65.75 %]. A pesar de la notable disminución en el contenido de fitoquímicos, a la que diversos autores han atribuido la AoxA (Li *et al.*, 2023; Patras *et al.*, 2010; Quintero-Soto *et al.*, 2018; Xu & Chang, 2007), en este estudio se observó un aumento de 1.6 veces en esta actividad. Estos valores son mayores que los reportados por Jiménez-Ortega *et al.* (2024) para 10 suplementos antioxidantes. Esto indica que la OPCF podría ser una buena opción como suplemento alimenticio.

Este comportamiento podría explicarse por el hecho de que durante el proceso de secado se aplican temperaturas que desencadenan una gran cantidad de reacciones en la matriz procesada. Una de las reacciones con mayor impacto es la reacción de Maillard, en la cual los aminoácidos libres presentes en el alimento reaccionan con los azúcares reductores disponibles, formando compuestos que generan ciertos tonos marrones en el alimento (Félix-Medina *et al.*, 2021). Estos compuestos, conocidos como melanoidinas, se han reportado como generadores de AoxA (Quintero-Soto *et al.*, 2022). Estos compuestos, junto con los fitoquímicos, podrían estar actuando de manera sinérgica para incrementar la actividad antioxidante de la OPCF. Sin embargo, se requieren más estudios para confirmar este efecto.

Conclusiones

Los modelos matemáticos predictivos obtenidos para las variables de respuesta analizadas en este estudio fueron adecuados, ya que mostraron valores de $R^2 \geq 0.71$, p-value de $F \leq 0.001$, CV ≤ 13 % y no presentaron falta de ajuste. Las condiciones óptimas encontradas (DT: 74 °C y Dt: 12 h) fueron útiles para producir una harina de chicozapote deshidratada con buenas propiedades tecnofuncionales (capacidad de absorción y solubilidad en agua) y propiedades nutraceuticas (compuestos fenólicos totales, antocianinas totales y actividad antioxidante). Los porcentajes de retención de compuestos fenólicos totales (85.03 %) y el aumento en la actividad antioxidante (65.75 %) después del proceso de secado optimizado del chicozapote sugieren que las condiciones óptimas obtenidas son adecuadas para llevar a cabo el proceso de deshidratación del fruto, extendiendo así su vida útil mientras se preservan en gran medida sus capacidades nutraceuticas.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo: MFQS, MEVO y GDRH. Desarrollo de la metodología: EMCM, CNBM, IDP y JVFM. Gestión del software: MFQS y MEVO. Validación experimental: FSL y ODAL. Análisis de resultados: EMCM, MFQS y MEVO. Redacción y preparación del manuscrito: EMCM. Redacción, revisión y edición: MEVO y MFQS. Gestión del proyecto: MEVO. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión enviada.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra [UPMYS/2023].

Agradecimientos

Los autores agradecen a Joaquín Pérez-Vejar, Noé Jared Álvarez-Sánchez y Ramona Julieta Espinoza-Moreno por su apoyo técnico.

Declaración de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Abdel-Aal, E. S. M., & Hucl, P. (1999). A Rapid Method for Quantifying Total Anthocyanins in Blue Aleurone and Purple Pericarp Wheats. *Cereal Chemistry*, 76(3), 350-354. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>
- Alvis-Celis, R. (2020). Efecto de temperatura y velocidad de secado en la actividad antioxidante de la mashua (*Tropaeolum tuberosum*) en el secado en bandejas. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 3(1), 16-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.25127/ucni.v3i1.587>
- Anderson, R. (1982). Water absorption and solubility and amilograph characteristics of roll cooked small grain products. *Cereal Chemistry*, 59, 265-269. <https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1982/Documents/CC1982a68.html>
- Baky, M. H., Kamal, A. M., Haggag, E. G., & Elgindi, M. R. (2022). Flavonoids from Manilkara hexandra and antimicrobial and antioxidant activities. *Biochemical Systematics and Ecology*, 100, 104375. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2021.104375>
- Bashir, S. (2019). Pharmacological importance of Manilkara zapota and its bioactive constituents. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 18(4), 347-358. <https://doi.org/https://doi.org/10.35588/blacpma.19.18.4.22>
- Cornejo, F., & Rosell, M. C. (2015). Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 1203-1210. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.050>
- El-Adawy, T. A., & Taha, K. M. (2001). Characteristics and composition of different seed oils and flours. *Food Chemistry*, 74(1), 47-54. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00337-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00337-X)
- Espinoza-Moreno, R. J., Reyes-Moreno, C., Gutiérrez-Dorado, R., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Mora-Rochín, S., . . . Perales-Sánchez, J. X. K. (2021). Alimento funcional para adultos mayores producido por extrusión a partir de granos integrales de maíz/frijol común. *Acta Universitaria*, 31, 1-18. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3217>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2013). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved January 2024 from <http://faostat.fao.org/site/636/DesktopDefault.aspx?PageID=636#anchor>
- Félix-Medina, J. V., Gutiérrez-Dorado, R., López-Valenzuela, J. A., López-Ángulo, G., Quintero-Soto, M. F., Perales-Sánchez, J. X. K., & Montes-Ávila, 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, 111053. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111053>
- García-Cuevas, X., Rodríguez-Santiago, B., & Parraguirre-Lezama, C. (2021). Notas Importantes Sobre el Chicozapote (*Manilkara zapota* L. Van Royen). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 18(74), 45-63. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1048>
- García-Jimenez, A., & Vázquez, L. (2016). Masa y harina de maíz nixtamalizado. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2), 78-82. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/1/15.pdf>

- García-Pacheco, Y., Cabrera-Mercado, D., Ballestas-Santos, J. A., & Campo-Arrieta, M. J. (2019). Efecto de diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina de frijol blanco (*Phaseolus lunatus* L.) y la determinación de su potencial uso agroalimentario. *INGE CUC*, 15(2), 132-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.13>
- Giovanelli, G., Zanoni, B., Lavelli, V., & Nani, R. (2001). Water sorción, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, 52(2), 135-141. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00095-4)
- Gómez-Maqueo, A., Escobedo-Avellaneda, Z., & Welti-Chanes, J. (2020). Phenolic Compounds in Mesoamerican Fruits—Characterization, Health Potential and Processing with Innovative Technologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms21218357>
- Guerra-Baños, E. C., Baños Dorantes, M. I., Luna-Jiménez, A. L., González-Cortés, N., & Jiménez-Vera, R. (2020). Caracterización de Harina de Naranja (*Citrus x sinensis*) para Uso Alimentario. *European Scientific Journal*, 16(6), 1857. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p1>
- Habibi, F., Ramezani, A., Guillén, F., Castillo, S., Serrano, M., & Valero, D. (2020a). Changes in Bioactive Compounds, Antioxidant Activity, and Nutritional Quality of Blood Orange Cultivars at Different Storage Temperatures. *Antioxidants*, 9(10), 1016. <https://doi.org/10.3390/antiox9101016>
- Habibi, F., Ramezani, A., Guillén, F., Serrano, M., & Valero, D. (2020b). Blood oranges maintain bioactive compounds and nutritional quality by postharvest treatments with γ -aminobutyric acid, methyl jasmonate or methyl salicylate during cold storage. *Food Chemistry*, 306, 125634. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125634>
- Jiménez-Ortega, L. A., López-Romero, B. J., Heredia-Batiz, J. M., Bastidas-Bastidas, P. J., & Heredia, J. B. (2024). These values are higher than those reported by Jiménez-Ortega et al. (2024) for 10 antioxidant supplements. This indicates that OPCF could be a good option to be used as a dietary supplement. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1585. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1585>
- Kim, H. S., & Chin, K. B. (2016). Effects of Drying Temperature on Antioxidant Activities of Tomato Powder and Storage Stability of Pork Patties. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 36, 51 - 60. <https://doi.org/https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.1.51>
- Krzykowski, A., Dziki, D., Rudy, S., Gawlik-Dziki, U., Janiszewska-Turak, E., & Biernacka, B. (2020). Wild Strawberry *Fragaria vesca* L.: Kinetics of Fruit Drying and Quality Characteristics of the Dried Fruits. *Processes*, 8(10). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr8101265>
- Lawal, O. S. (2004). Functionality of african locust bean (*Parkia globossa*) protein isolate: effects of pH, ionic strength and various protein concentrations. *Food Chemistry*, 86(3), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.036>
- Li, W., Zhang, Y., Deng, H., Fan, X., Yang, H., & Tan, S. (2023). In vitro and in vivo bioaccessibility, antioxidant activity, and color of red radish anthocyanins as influenced by different drying methods. *Food Chemistry*, 18, 100633. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100633>
- Martínez-Martí, J., Panuškova, K., Larrea, V., Bleha, R., Quiles, A., & Hernando, I. (2023). Using different physical treatments to modify the structure and improve the technofunctional properties of clementine by-products. *Food Structure*, 38, 100346. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100346>
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 233-246. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00404.x>
- Medeiros, R., Da Silva Junior, E., Barros, Z., Da Silva, J., Brandao, S., & Azoubel, P. (2022). Convective drying of mango enriched with phenolic compounds from grape residue flour under different impregnation methods. *Food Research International*, 158, 111539. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111539>
- 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. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15312>
- Miquilena, E., Higuera, A., & Rodríguez, B. (2016). Evaluación de propiedades funcionales de cuatro harinas de semillas de leguminosas comestibles cultivadas en Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 33(1), 58-75. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27193>
- Njintang, Y. N., & Mbofung, C. M. F. (2015). *Quinoa: Improvement and Sustainable Production*. Jhon Wiley y Sons Inc.
- Patras, A., Brunton, N. P., O Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, 21(1), 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- Piga, A., Del Caro, A., & Corda, G. (2003). From plums to prunes: influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(12), 3675-3681. <https://doi.org/10.1021/jf021207>
- Punia-Bangar, S., Sharma, N., Kaur, H., Kaur, M., Sandhu, K. S., Maqsood, S., & Ozogul, F. (2022). A review of Sapodilla (*Manilkara zapota*) in human nutrition, health, and industrial applications. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 319-334. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.05.016>
- Quintero-Soto, M. F., Espinoza-Moreno, R. J., Félix-Medina, J. V., Salas-López, F., López-Carrera, C. F., Argüelles-López, O. D., . . . Gómez-Favela, M. A. (2022). Comparison of Phytochemical Profile and In Vitro Bioactivity of Beverages Based on the Unprocessed and Extruded Sesame (*Sesamum indicum* L.) Seed Byproduct. *Foods*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/foods11203175>
- Quintero-Soto, M. F., Saracho-Peña, A. G., Chavez-Ontiveros, J., Garzon-Tiznado, J. A., Pineda-Hidalgo, K. V., Delgado-Vargas, F., & López-Valenzuela, J. A. (2018). Phenolic profiles and their contribution to the antioxidant activity of selected chickpea genotypes from Mexico and ICRISAT collections. *Plant Foods for Human Nutrition*, 122-129. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0661-6>
- Rivas-Gastelum, M. F., Garcia-Amezquita, L. E., Garcia-Varela, R., & Sánchez-López, A. L. (2023). *Manilkara zapota* "chicozapote" as a fruit source of health-beneficial bioactive compounds and its effects on chronic degenerative and infectious diseases, a review. *Frontiers in nutrition*, 10, 1194283. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1194283>
- Ruiz-Armenta, X. A., Ruiz-Armenta, J. E., Espinoza-Moreno, R. J., Gutiérrez-Dorado, R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. d. J., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Aprovechamiento de subproducto de sésamo y extrusión optimizada para obtención de harina funcional con propiedades tecno-funcionales, nutricionales y antioxidante mejoradas. *Acta Universitaria*, 32, 1-20. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3494>
- Serna-Cock, L., Torres-Leon, C., & Ayala-Aponente, A. (2015). Evaluación de Polvos Alimentarios obtenidos de Cáscaras de Mango (*Mangifera indica*) como fuente de Ingredientes Funcionales. *Información tecnológica*, 26(2), 41-50. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200006>
- Shate, S. K. (2002). Dry bean protein functionality. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(2), 175-223. <https://doi.org/10.1080/07388550290789487>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre Agrícola 1980-2018*. Retrieved December from <https://nube.siap.gob.mx/cierreaagricola/>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Sotelo-Díaz, L. I., Igual, M., Martínez-Monzó, J., & García-Segovia, P. (2023). Techno-Functional Properties of Corn Flour with Cowpea (*Vigna unguilata*) Powders Obtained by Extrusion. *Foods*, 12(2), 298. <https://doi.org/10.3390/foods12020298>
- Subbiah, V., Duan, X., Agar, O. T., Dunshea, F. R., Barrow, C. J., & Suleria, H. A. R. (2023). Comparative study on the effect of different drying techniques on phenolic compounds in

- Australian beach-cast brown seaweeds. *Algal Research*, 72(1), 103140. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103140>
- Techeira, N., Sívoli, L., Perdomo, B., Ramírez, A., & Sosa, F. (2014). Caracterización físicoquímica, funcional y nutricional de harinas crudas obtenidas a partir de diferentes variedades de yuca (*Manihot esculenta* Crantz), batata (*Ipomoea batatas* Lam) y ñame (*Dioscorea alata*), cultivadas en Venezuela. *Interciencia*, 39(3), 191-197. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33930206009> (IN FILE)
- Vargas y Vargas, M. d. L., Sauri Duch, E., Tamayo Canul, E., González Novelo, S. A., & Tamayo Cortez, J. (2015). Chicozapote fresco y cortado (*Achras Sapota*) con actividad antioxidante; una demanda actual del consumo de frutas. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36(19), 1315-1324. <https://www.redalyc.org/pdf/141/14132408017.pdf>
- von Atzingen, M. C., & Machado Pinto e Silva, M. E. (2005). Evaluación de la textura y color de almidones y harinas en preparaciones sin gluten. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(5), 319-323. <https://doi.org/10.1080/11358120509487658>
- Wang, W.-D., & Xu, S.-Y. (2007). Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate. *Journal of Food Engineering*, 82(3), 271-275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.01.018>
- 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*, 159-166. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x>
- Yao, L., Fan, L., & Duan, Z. (2020). Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices. *Food Chemistry*, 305, 125477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125477>
- Yemmireddy, V. K., Chinnan, M. S., Kerr, W. L., & Hung, Y.-C. (2013). Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteye blueberries. *LWT-Food Science and Technology*, 50(1), 739-745. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.011>
- Zapata- Bustamante, S., Tamayo-Tenorio, A., & Rojano, B. (2014). Efecto del Tostado Sobre los Metabolitos Secundarios y la Actividad Antioxidante de Clones de Cacao Colombiano: Effect of Roasting on the Secondary Metabolites and Antioxidant Activity of Colombian Cocoa Clones. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 68, 7497-7507. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47836>
- Zou, C., Huang, L., Li, D., Ma, Y., Liu, Y., Wang, Y., . . . Sun, L. (2021). Assembling cyanidin-3-O-glucoside by using low-viscosity alginate to improve its in vitro bioaccessibility and in vivo bioavailability. *Food Chemistry*, 355, 129681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129681>