

Propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de México

Nutritional, physicochemical, and functional properties, phenolic compounds, and antioxidant activity of three accessions of native blue corn flours from Mexico

Luis Miguel Anaya-Esparza* ^{1*};
Victor Manuel Gómez-Rodríguez ²;
Humberto Ramírez-Vega ³;
Salvador Hernández-Estrada ⁴;
Luis Alfonso Hernández-Villaseñor ⁵;
Blanca Zuamí Villagrán de la Mora ⁶

DOI: <https://doi.org/10.26495/z1k1kc46>



Resumen

En la actualidad, los estudios en harinas de maíces nativos pigmentados en México son escasos, lo que limita su uso potencial en la industria alimentaria. El objetivo de este trabajo fue determinar las propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de México. La metodología empleada fue la siguiente: las accesiones de maíz se secaron y molieron con malla de 0.5 mm. Se evaluó la composición nutrimental, las propiedades fisicoquímicas, las propiedades funcionales, los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante. Los resultados mostraron que las harinas presentan alto contenido de proteína (8.37-9.10%), carbohidratos (76.61-77.50%), grasas (3.97-4.13%), cenizas (1.09-1.16%) con bajo contenido de humedad (8.16-9.52%). Presentaron valores de actividad de agua de 0.36-0.40, sólidos solubles totales de 1.33-1.83 °Brix, pH de 6.32-6.43 y acidez titulable de 0.19%, sus atributos de color corresponden a la escala azul-gris. Las harinas contienen fenoles solubles (10.68-17.14 mg EAG g⁻¹), flavonoides (12.16-17.71 mg ECAT g⁻¹) y antocianinas (0.28-0.36 mg EC3G g⁻¹) que presentan actividad antioxidante por ABTS (17.63-24.66 mM ET g⁻¹), FRAP (11.18-30.01 mM ET g⁻¹) y DPPH (21.99-22.87 mM ET g⁻¹). Muestran solubilidad en agua de 5.70-6.92%, absorción de agua de 2.15-2.37%, absorción de aceite de 4.65-4.76%, así como capacidad emulsificante de 9.45-12.76% y espumante de 11.75-16.81%. En conclusión, las harinas de maíces nativos de color azul de México tienen gran potencial para utilizarse como ingredientes en la elaboración de alimentos y bebidas con propiedades funcionales.

Palabras clave:

Compuestos bioactivos, maíz nativo, maíz pigmentado, propiedades tecnológicas, usos industriales.

¹ Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, luis.aesparza@academicos.udg.mx

² Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, victor.gomez@cualtos.udg.mx

³ Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, humberto.rvega@academicos.udg.mx

⁴ Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, salvador.hernandez9918@alumnos.udg.mx

⁵ Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, luis.hvillasenor@academicos.udg.mx

⁶ Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México, blanca.villagran@academicos.udg.mx

*Autor de correspondencia: luis.aesparza@academicos.udg.mx

Abstract

Currently, studies on pigmented native corn flours in Mexico are scarce, limiting their potential use in the food industry. This study aimed to determine the nutritional, physicochemical, and functional properties, phenolic compounds, and antioxidant activity of flours from three accessions of blue corn, native to Mexico. The methodology was as follows: the corn accessions were dried and ground with a 0.5 mm mesh. Nutritional composition, physicochemical properties, functional properties, phenolic compounds, and antioxidant capacities were evaluated. The results showed that the flours have high protein content (8.37-9.10%), carbohydrates (76.61-77.50%), fats (3.97-4.13%), ash (1.09-1.16%) with low moisture content (8.16-9.52%). They presented water activity values of 0.36-0.40, total soluble solids of 1.33-1.83 °Brix, pH of 6.32-6.43, titratable acidity of 0.19%, and color attributes corresponding to the blue-gray scale. The flours contain soluble phenols (10.68-17.14 mg EAG g⁻¹), flavonoids (12.16-17.71 mg ECAT g⁻¹) and anthocyanins (0.28-0.36 mg EC3G g⁻¹) that present antioxidant activity by ABTS (17.63-24.66 mM ET g⁻¹), FRAP (11.18-30.01 mM ET g⁻¹) and DPPH (21.99-22.87 mM ET g⁻¹). They showed a water solubility of 5.70-6.92%, water absorption of 2.15-2.37%, oil absorption of 4.65-4.76%, emulsifying capacity of 9.45-12.76%, and foaming capacity of 11.75-16.81%. In conclusion, native blue corn flours from Mexico have great potential as ingredients in producing foods and beverages with functional properties.

Keywords:

Bioactive compounds, native corn, pigmented corn, technological properties, industrial applications.

1. INTRODUCCIÓN

México es el centro de origen, domesticación y diversificación del maíz (*Zea mays* L.). Es un cultivo vital para la dieta, la sociedad, la cultura y la economía del país (Revilla et al., 2022; Rodríguez-Salinas et al., 2020). Así mismo, es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, con una producción de 1,156,216 millones de toneladas en 2022. En ese mismo año, México produjo aproximadamente 28 millones de toneladas de maíz, lo que lo convierte en el séptimo productor de este cereal a nivel mundial (USDA, 2024). El maíz posee una alta diversidad en perfiles nutrimentales, físicoquímicos y compuestos fitoquímicos. México cuenta amplia gama de razas de maíz pigmentado de diferentes colores, donde destacan los maíces blancos, amarillos, rojos, negros y azules (Salinas-Moreno et al., 2021; Quiñones-Muñoz et al., 2022; Ramírez -Vega et al., 2022).

En México, el maíz se consume principalmente en forma de tortilla, pero también se utiliza en la elaboración de extruidos y bebidas (Serna-Saldivar, 2021). No obstante, se pueden obtener harinas de maíz para la elaboración de diversos alimentos (tamales, gorditas, huaraches, champurrado y atole) o bien utilizarse como ingrediente en la producción de otros productos alimenticios. En este contexto, los maíces que se utilizan principalmente a nivel industrial son los híbridos de color blanco y amarillo por los altos rendimientos que ofrecen; mientras que, los maíces nativos pigmentados en la mayoría de las ocasiones se producen y consumen de manera local por sus bajos rendimientos de producción (Vázquez-Carrillo et al., 2023).

Además de los beneficios nutricionales de los maíces pigmentados debido al aporte de proteína, grasas y carbohidratos, estos maíces contienen compuestos bioactivos (flavonoides, ácidos fenólicos, antocianinas y carotenoides) (Paulsmeyer et al., 2022), los cuales se han relacionado con la reducción del riesgo de padecer diversas enfermedades crónicas no transmisibles como la obesidad, diabetes, hipertensión y cáncer (Zhang et al., 2019). Así mismo, los polifenoles contribuyen a las propiedades organolépticas de los alimentos debido a su astringencia, amargor, formación de turbidez y modulación de los cambios de color (Weber, 2020). El procesamiento industrial y las aplicaciones alimentarias de la harina de maíz dependen de sus propiedades físicoquímicas como actividad de agua, pH, sólidos

solubles totales, acidez titulable y color; así como las propiedades funcionales como solubilidad, capacidad de absorción de agua y aceite, capacidad de formación de espuma, capacidad de emulsión y densidad aparente, entre otras (Filipčev et al., 2022). La evaluación de tales propiedades proporciona información útil sobre su uso potencial en la industria alimentaria (Hasmadi et al., 2020).

Diversos estudios han demostrado que las harinas de maíces nativos pigmentados, particularmente de maíces de color azul, son fuente importante de nutrientes y compuestos bioactivos; los cuales presentan propiedades fisicoquímicas y tecnológicas adecuadas para emplearse en la elaboración de alimentos potencialmente funcionales (Hernández-Santos et al., 2023; An et al., 2023; Adebo et al., 2021; Colombo et al., 2021; Salvador-Reyes et al., 2020; Méndez-Lagunas et al., 2020; Vázquez-Carrillo et al., 2018). En este contexto, México posee la mayor diversidad de razas de maíz de América, con 64 razas reconocidas por las autoridades mexicanas (CONABIO, 2020), algunas de las cuales presentan fenotipos pigmentados. Actualmente, el uso de maíces nativos pigmentados enfrenta dos grandes problemas, el desconocimiento sobre sus propiedades fisicoquímicas, nutricionales y tecnofuncionales del maíz nativo, así como la pérdida de sustitución de variedades locales por cultivares modernos o cultivos más rentables. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar la composición nutrimental, propiedades fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de harina de maíz nativo de 3 genotipos de color azul de México.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material vegetal

La accesión azul México (AM), se colectó de la localidad de Taborda, municipio de Temoaya, Estado de México; el azul Chihuahua (AC) se colectó de la localidad de Basaseachi, municipio de Ocampo, Chihuahua; y el azul Oaxaca (AO), se colectó en el mercado del municipio de Asunción Nochixtlán, Oaxaca. Las tres accesiones pertenecen a la raza Cónico (Figura 1). Posteriormente, las accesiones se sembraron en Campo Experimental Centro Altos de Jalisco (CECEAJAL) del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México (102° 43' 50" W, 20° 52' 57" N; altitud, 1927 m.s.n.m.). El clima es templado y subhúmedo, con una temperatura media anual ≤ 18 °C y una precipitación pluvial promedio de junio a octubre de 850 mm. El tipo de suelo es un suelo isotérmico de mezcla fina, Udic Rhodustalf, según Etchevers (1994). La siembra se llevó a cabo los días 24 de junio de 2022, a una densidad de siembra de 60,000 plantas ha⁻¹. La fertilización inorgánica aplicada durante la siembra fue de 300 kg ha⁻¹ de fertilizante N (urea) y 150 kg ha⁻¹ de fertilizante P (fosfato diamónico). Se aplicó fertilización adicional con 45 kg de urea durante la etapa de crecimiento V5. La siembra se realizó de forma manual una vez que el suelo estuvo húmedo para asegurar la emergencia de las plantas. El herbicida aplicado fue atrazina + S-metolaclor a 5 L ha⁻¹ (Primagram Gold, Syngenta, Budapest, Hungría). Para prevenir el daño radicular se utilizó teflutrina (Force TM1.5 G, Syngenta) a dosis de 10 kg ha⁻¹.

Una vez cosechado, los granos se secaron y almacenaron en un lugar fresco, seco y en oscuridad hasta su uso. Para la obtención de las harinas, los granos se molieron en un molino rotativo de impacto (Retsch SR300, Alemania) con malla de 0.5 mm. Posteriormente, el polvo se tamizó a tamaño de partícula de 500 μm con un tamiz #35 (HUMBOLDT, AASHTO M92).



Figura 1. Acciones de maíz empleado en el trabajo. Maíz azul México (a), azul Chihuahua (b) y azul Oaxaca (c).

Fuente: elaboración propia.

2.2 Composición nutrimental

El contenido de humedad (método 930.15, gravimetría en estufa), proteína (método 968.06, Kjeldhal), grasas (método 920.39, Soxhlet) y cenizas (método 942.05, calcinación en mufla) se determinaron de acuerdo con lo establecido por la AOAC (2016). El contenido de azúcares totales se calculó por diferencia (Dongmo et al., 2020). Los resultados se expresaron en porcentaje.

2.3 Propiedades fisicoquímicas

El potencial de hidrógeno (pH) se determinó de acuerdo con la metodología establecida por la AOAC (2005), basado en la inmersión de electrodo. La muestra (10 g) se homogenizó en agua destilada (100 mL) y se agitó durante 30 min. Transcurrido el tiempo, se procedió con la lectura. El potenciómetro (HANNA HI 207) se calibró con solución buffer de referencia pH 7 y pH 4.

La determinación de la acidez titulable se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido por el método 942.15 de la AOAC (2005). 10 g de muestra se mezclaron con 100 mL agua destilada (pH 7) y se pusieron en agitación magnética durante 30 min. Transcurrido el tiempo, la solución se filtró con papel Whatman #40. Posteriormente, se le agregaron 5 gotas de fenolftaleína al 1% a la solución filtrada y se procedió a la titulación con NaOH 0.1 N hasta obtener un pH de 8.1. Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido málico de acuerdo con lo propuesto por Valle-Moysén et al. (2017).

Los sólidos solubles totales se determinaron utilizando un refractómetro digital (ATAGO, PAL87S) de acuerdo con la metodología de la AOAC (2005) con ligeras modificaciones. 1 gramo de muestra se mezcló con 2 mL de agua destilada y se agitó en vortex durante 1 min. Posteriormente, se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min y se recolectó el sobrenadante, luego se colocaron tres gotas de la muestra en el prisma del equipo y se procedió a su lectura. El equipo se calibró con agua destilada y los resultados se expresaron como °Brix.

Los atributos de color se determinaron con un colorímetro digital (FRU, WR10QC), siguiendo las indicaciones del fabricante y los resultados se expresaron en el espacio de color CIELab. Mientras que, la actividad de agua se determinó con un medidor de actividad de agua portátil (VTSYIQI, VTS160A), siguiendo las indicaciones del fabricante.

2.4 Cuantificación de polifenoles solubles totales, flavonoides totales y antocianinas

Para la cuantificación de fenoles solubles totales (FST), se pesaron 500 mg de muestra y se mezclaron con 10 mL solución de extracción [metanol acidificado al 2% (HCl 2N):agua en proporción 80:20] y se colocó durante 20 min en ultrasonido (BRANDSON, 3800). Posteriormente, se centrifugó (HERMLE, Z326K) a 6000 rpm durante 15 min a 4 °C, se recolectó el sobrenadante y se aforó a 10 mL con la solución de extracción. Para la reacción, en una microplaca de 96 pocillos se mezclaron 12 µL del extracto, 12 µL de reactivo Folin-Ciocalteu, 116 µL de Na₂CO₃ y 164 µL de agua destilada, se puso en agitación en un agitador de placas durante 15 min en oscuridad y se procedió a la lectura en un lector de microplacas (ACCURIS Instruments, SmartReader MR-9600) a 750 nm (Pérez-Jiménez et al., 2008). Se utilizó una curva de calibración con ácido gálico (R²: 0.9983) y los resultados se expresaron como mg ácido gálico equivalente por gramo de muestra seca (mg EAG g⁻¹ MS).

Para la determinación de flavonoides (FLA), se siguió la metodología propuesta por Manzanares-Tenorio et al. (2022) con ligeras modificaciones. A partir de la extracción realizada para FST, en un tubo de ensayo se colocaron 100 µL de extracto, 430 µL de NaNO₂ al 5% y se dejó reposar por 5 min. Posteriormente, se adicionaron 30 µL de AlCl₃ al 10% y se dejó reposar por 1 min. Transcurrido el tiempo, se agregan 440 µL de NaOH 1 M. Posteriormente, se colocaron 200 µL en una microplaca y se realizó la lectura a 490 nm en un lector de microplacas. Se utilizó una curva de calibración de catequina (0.5–0.03125 mg/mL; R²: 0.9997) y los resultados se expresaron como mg equivalentes de catequina por gramo de muestra seca (mg ECAT g⁻¹ MS).

Para la cuantificación de antocianinas totales (ANT), se siguió la metodología propuesta por Rochín-Medina et al. (2021) con ligeras modificaciones. La muestra (1 g) se mezcló con 20 mL de etanol:agua (95:5)-HCl al 1 N (85:15 v/v) y se sometió a ultrasonido durante 20 min. Posteriormente, la solución se centrifugó (6000 rpm por 10 min a 4 °C) y se recolectó el sobrenadante. Se colocaron 200 µL y se cuantificó la absorbancia a 535 nm y 700 nm en un lector de microplacas. El contenido de antocianinas totales se determinó utilizando (1).

$$AT = \frac{A_{535} - A_{700}}{\varepsilon} \times \text{Volumen extracto} \times PM \times \frac{1}{\text{Peso muestra}} \quad (1)$$

Donde AT: concentración de antocianinas totales mg equivalentes de Cianidina-3-glucósido/gramo de muestra seca (mg EC3G g⁻¹ MS); ε: absorción molar de Cianidina-3-glucósido, 25965 cm⁻¹ M⁻¹; PM: peso molecular de Cianidina-3-glucósido, 449.2 g/mol.

2.5 Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se realizó a partir de los extractos metanólicos obtenidos para FST en un lector de microplaca (placas de 96 pocillos) y se utilizó Trolox como estándar. Los resultados se expresaron como mM equivalente de Trolox por gramo de muestra seca (mM ET g⁻¹ MS). Para el método de reducción del radical 2,2-Azinobis (3-etilbenzotiazolin-6 sulfonato) (ABTS), se utilizó la metodología propuesta por Re et al. (1999). En una placa se colocaron 35 µL del extracto y 265 µL de solución ABTS (7 mM), se agitaron durante 10 min en oscuridad y la lectura se realizó a 730 nm (R²: 0.9924).

Por su parte, para el método de la reducción del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), se utilizó la metodología propuesta por Sánchez-Moreno (1998). En una placa se mezclaron 40 µL del extracto con 260 µL de solución DPPH (190 µM), se agitaron durante 10 min en oscuridad y la lectura se realizó a 517 nm (R²: 0.9995). Mientras que, el método de reducción del ion férrico (FRAP) se determinó siguiendo lo propuesto por Benzie y Strain (1996), en una placa se mezclaron 264 µL de solución de

FRAP [buffer de acetato de sodio 0.3 M, pH 6, cloruro férrico hexahidratado (20 mM) y 2,4,6-tripiridil-s-triazina (10 mM) en proporción 10:1:1 v/v/v], 36 μ L de extracto y 9 μ L de agua destilada, se agitaron durante 30 min en oscuridad y la lectura se realizó a 595 nm (R^2 : 0.9976).

2.6 Propiedades tecnológicas-funcionales

La determinación del índice de solubilidad de agua (ISA) se realizó siguiendo lo propuesto por Anderson et al. (1970), con algunas modificaciones. En un tubo cónico de polipropileno de 50 mL se mezclaron 2.5 g de muestra con 30 mL de agua destilada y se agitó en vortex durante 1 min. Posteriormente, se colocó a baño de agua a 30 °C durante 30 min con agitación constante a 70 rpm, se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min y el gel sedimentado se separó por decantación y al sobrenadante se desecó a 110 °C en un horno de convección por 24 h. El ISA se calculó a partir de (2) y los resultados se expresaron en porcentaje.

$$\text{ISA (\%)} = \frac{\text{Peso del residuo de centrifugación}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2)$$

Por su parte, el índice de absorción de agua (IAA) se determinó a partir del peso del sedimento, los resultados se calcularon a partir de (3) (Anderson et al., 1970) y se expresaron como cantidad de agua absorbida por gramo de muestra seca (g g^{-1} MS).

$$\text{IAA} = \frac{(\text{Peso del residuo de centrifugación})}{(\text{Peso de la muestra}) - (\text{Peso del residuo de evaporación})} \quad (3)$$

La capacidad de absorción de aceite se determinó de acuerdo con lo propuesto por Nasrin et al. (2015) con ligeras modificaciones. En un tubo cónico de 50 mL se colocaron 2.5 g de muestra con 30 mL de aceite de maíz y se agitó en vortex durante 1 min. Posteriormente, se centrifugó a 10000 rpm durante 30 min. Por último, se registró el peso del sedimento formado y los resultados se calcularon por diferencia de pesos y se expresaron como g de aceite absorbido por g de muestra seca (g g^{-1} MS).

La capacidad emulsificante se llevó a cabo conforme la metodología propuesta por Yasumatsu et al. (1972). En un tubo cónico de 50 mL se mezclaron 2 g de muestra, 20 mL de agua destilada y 20 mL de aceite de canola, las muestras se agitaron a 70 rpm durante 20 min. Posteriormente, los tubos se centrifugaron a 10000 rpm por 10 min. Con ayuda de un vernier digital se midió la altura de la emulsión formada y los resultados se calcularon a partir de (4) y se expresaron en porcentaje.

$$\text{Capacidad emulsionante (\%)} = \frac{\text{Altura de la capa de emulsión}}{\text{Altura de la capa total}} \times 100 \quad (4)$$

La capacidad espumante se determinó siguiendo la metodología de Piornos et al. (2015). En un tubo cónico de 50 mL se colocó la muestra al 1% p/v con agua y homogenizaron en vortex durante 1 min y posteriormente se mezclaron en un homogeneizador de alta velocidad (LANKAI, FSH-2A) a 12500 rpm durante 1 min a temperatura ambiente. Posteriormente, se midió la altura de la espuma con ayuda de un vernier digital y los resultados se calcularon a partir de (5) y se expresaron en porcentaje.

$$\text{Capacidad espumante} = \frac{V2 - V1}{V1} \times 100 \quad (5)$$

Donde V2 es la altura en mm de la solución después de homogeneización y V1 es la altura inicial de la solución.

2.7 Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como la media \pm desviación estándar de tres experimentos independientes por triplicado. El análisis de datos se llevó a cabo mediante Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía ($\alpha = 0.05$) seguido de una Prueba de Tukey ($p < 0.05$) para comparación de medias. Además, se realizó un análisis de componentes principales y de clúster jerárquico para evidenciar las relaciones entre las variables dependientes e independientes. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico STATISTICA v.12 (Statsoft®, Tulsa, USA).

3. RESULTADOS

3.1 Composición nutrimental

En la Tabla 1 se presenta el contenido nutrimental de harinas de maíces nativos azul México (HAM), azul Oaxaca (HAO) y azul Chihuahua (HAC). En general, todas las muestras exhiben diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para todos los parámetros evaluados. El contenido de humedad se encuentra en un rango de 8.16 a 9.52%, siendo HAO el de mayor valor. Por su parte, HAM y HAC tienen el mayor contenido de proteína (9.10% y 9.06%). El contenido de carbohidratos totales se encuentra en un rango de 76.61 a 77.50%, donde HAM tiene el mayor contenido (77.50%); mientras que, las grasas se encuentran en un rango de 3.97 a 4.13%, siendo HAM el de mayor valor. Las cenizas presentan un rango de 1.09 a 1.16%, donde HAC presenta el mayor contenido.

Tabla 1. Contenido nutrimental de harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	Humedad (%)	Proteína (%)	Carbohidratos totales (%)	Grasas (%)	Cenizas (%)
HAM	8.16 \pm 0.04 ^c	9.10 \pm 0.01 ^a	77.50 \pm 0.01 ^a	4.13 \pm 0.04 ^a	1.09 \pm 0.01 ^a
HAO	9.52 \pm 0.02 ^a	8.37 \pm 0.09 ^b	76.64 \pm 0.11 ^b	3.97 \pm 0.02 ^b	1.13 \pm 0.02 ^a
HAC	9.09 \pm 0.11 ^b	9.06 \pm 0.01 ^a	76.61 \pm 0.14 ^b	4.06 \pm 0.03 ^{ab}	1.16 \pm 0.01 ^b

Los datos son la media \pm desviación estándar (n=9). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

3.2 Parámetro fisicoquímicos

En la Tabla 2 se presentan los valores de actividad de agua (A_w), sólidos solubles totales (SST, °Brix), pH y acidez titulable (% ácido málico) de HAM, HAO y HAC. Los valores de A_w se encontraron en un rango de 0.36 a 0.40 con diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestras. Para SST, las muestras presentan diferencias significativas ($p < 0.05$). HAO presentó la mayor concentración (1.83 °Brix), seguido de HAM y HAC (1.36 y 1.33 °Brix). En lo que respecta al pH, HAM y HAC presentan valores similares (6.32 y 6.34, $p > 0.05$); mientras que, HAO exhibe el pH mayor (6.43). Además, no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) para la acidez titulable (0.19 % ácido málico).

Tabla 2. Valores de actividad de agua, pH, sólidos solubles totales y acidez titulable en harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	Aw	SST (°Brix)	pH	Acidez titulable (% ácido málico)
HAM	0.36 ± 0.01 ^b	1.36 ± 0.11 ^b	6.32 ± 0.01 ^b	0.19 ± 0.02 ^a
HAO	0.39 ± 0.01 ^a	1.83 ± 0.15 ^a	6.43 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.01 ^a
HAC	0.40 ± 0.01 ^a	1.33 ± 0.23 ^b	6.34 ± 0.01 ^b	0.19 ± 0.01 ^a

Los datos son la media ± desviación estándar (n=9). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3 se muestran los atributos de color, que incluyen los valores de luminosidad, parámetros a^* y b^* de HAM, HAO y HAC. En general, se observan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre muestras, excepto para el parámetro a^* ($p > 0.05$). El parámetro de luminosidad se encuentra en un rango de 24.15 a 26.84. Para el parámetro a^* , los valores se encuentran en un rango de 2.54 a 3.44; mientras que, el parámetro b^* de 1.21 a 1.76.

Tabla 3. Atributos de color (L, a, b) en harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	Luminosidad	a^*	b^*
HAM	26.84 ± 0.02 ^a	3.28 ± 0.02 ^a	1.76 ± 0.11 ^a
HAO	24.15 ± 0.26 ^b	2.54 ± 0.01 ^b	1.49 ± 0.10 ^a
HAC	26.55 ± 0.77 ^a	3.44 ± 0.11 ^a	1.21 ± 0.20 ^a

Los datos son la media ± desviación estándar (n=9). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

3.3 Contenido de fenoles solubles, flavonoides y antocianinas totales

El contenido de fenoles solubles totales (FST), flavonoides totales (FLA) y antocianinas totales (ANT) de HAM, HAO y HAC se muestran en la Tabla 4. En general, se observaron diferencias estadísticas entre las muestras de harina de maíz para los parámetros evaluados ($p < 0.05$). El contenido de FST se encontró en un rango de 10.68 a 17.14 mg EAG g⁻¹ MS, siendo HAM la muestra con mayor concentración de FST. Por su parte, HAM presenta la mayor concentración ($p < 0.05$) de FLA (17.71 mg ECAT g⁻¹ MS), seguido de HAO (13.31 mg ECAT g⁻¹ MS) y HAO (12.16 mg ECAT g⁻¹ MS). En lo que respecta al contenido de AT, HAC tiene la mayor concentración (0.36 mg EC3G g⁻¹ MS), seguido de HAO (0.30 mg EC3G g⁻¹ MS) y HAM (0.28 mg EC3G g⁻¹ MS).

Tabla 4
Contenido de polifenoles solubles totales, flavonoides totales, antocianinas totales en harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	FST (mg EAG g ⁻¹ MS)	Flavonoides totales (mg ECAT g ⁻¹ MS)	Antocianinas totales (mg EC3G g ⁻¹ MS)
HAM	17.14 ± 0.49 ^a	12.16 ± 0.53 ^c	0.28 ± 0.01 ^c
HAO	11.46 ± 1.14 ^b	13.31 ± 0.45 ^b	0.31 ± 0.01 ^b
HAC	10.68 ± 0.41 ^a	17.71 ± 0.41 ^a	0.36 ± 0.01 ^a

Los datos son la media ± desviación estándar (n=9). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

EAG: equivalente ácido gálico; ECAT: equivalente catequina; EC3G: equivalente cianidina-3-glucósido.

Fuente: elaboración propia.

3.4 Actividad antioxidante

Respecto a la capacidad antioxidante (Tabla 5), todas las muestras presentan diferencias significativas ($p < 0.05$) para los métodos de ABTS y FRAP, pero no para DPPH ($p > 0.05$). En lo referente a ABTS, HAC y HAM presentaron la mayor actividad antioxidante (24.66 y 22.87 mM ET g^{-1} MS) seguido por HAO (17.63 mM ET g^{-1} MS). En el método FRAP, la mayor actividad la presentó HAC (30.01 mM ET g^{-1} MS), seguido de HAM (23.72 mM ET g^{-1} MS) y HAO (11.18 mM ET g^{-1} MS). Por su parte, la actividad antioxidante para el método DPPH presentó un rango de 21.99 a 22.87 mM ET g^{-1} MS.

Tabla 5. Actividad antioxidante de harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	ABTS (mM ET g^{-1} MS)	FRAP (mM ET g^{-1} MS)	DPPH (mM ET g^{-1} MS)
HAM	22.87 ± 1.19^a	23.72 ± 0.19^b	21.99 ± 0.43^a
HAO	17.63 ± 0.52^b	11.18 ± 0.97^c	22.87 ± 0.42^a
HAC	24.66 ± 0.30^a	30.01 ± 0.31^a	22.51 ± 0.14^a

Los datos son la media \pm desviación estándar ($n=9$). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

3.5 Propiedades tecno-funcionales

En la Tabla 6 se muestran el comportamiento de las propiedades tecno-funcionales de harinas de maíces nativos de color azul. Respecto al índice de solubilidad en agua, las muestras presentan diferencias significativas ($p < 0.05$), donde HAO exhibe la mayor solubilidad (6.92%), seguido de HAC (6.14%) y HAM (5.70%). Mientras que, en el índice de absorción de agua ($p < 0.05$), HAM tiene la mayor capacidad de absorber agua (2.37 g g^{-1}), seguido de HAO y HAC (2.15 y 2.16 g g^{-1}). Por su parte, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) entre las muestras para la capacidad de absorción de aceite (4.51 a 4.76 g g^{-1}). En lo referente a la capacidad emulsificante, la mayor capacidad emulsificante la presenta HAM (12.76%), seguido de HAO (9.83%) y HAC (9.83%) con diferencias significativas ($p < 0.05$). Tendencia similar se observó en la capacidad espumante en las muestras, donde HAM presenta la mayor capacidad espumante (16.81%) seguido de HAO (11.88%) y HAC (11.75%).

Tabla 6. Propiedades tecno-funcionales en harinas de maíces nativos de color azul.

Muestra	Índice de solubilidad en agua (%)	Índice de absorción de agua (g g^{-1})	Capacidad de absorción de aceite (g g^{-1})	Capacidad emulsificante (%)	Capacidad espumante (%)
HAM	6.92 ± 0.11^a	2.37 ± 0.03^b	4.65 ± 0.12^a	12.76 ± 0.37^a	16.81 ± 0.96^a
HAO	5.70 ± 0.04^c	2.15 ± 0.01^a	4.65 ± 0.04^a	9.45 ± 0.65^b	11.88 ± 0.72^b
HAC	6.14 ± 0.02^b	2.16 ± 0.01^a	4.76 ± 0.02^a	9.83 ± 0.12^b	11.75 ± 0.66^b

Los datos son la media \pm desviación estándar ($n=9$). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: elaboración propia.

3.6 Análisis de componentes principales y clúster jerárquico

En la Figura 2a se muestra el comportamiento de las variables de estudio mediante análisis de componentes principales. Los dos componentes principales (CP) explican el 100% de la varianza (CP1: 64.59% y CP2: 35.41%). En general, las variables más importantes en el componente 1 (de derecha a izquierda) son humedad (0.99), DPPH (0.99), pH (0.90), fenoles solubles totales (-0.85), sólidos

solubles totales (0.79), actividad de agua (0.77), índice de solubilidad en agua (-0.99), grasa (-0.98), capacidad emulsionante (-0.94), índice de absorción de agua (-0.92), capacidad espumante (-0.89), carbohidratos totales (-0.89), luminosidad (-0.87), proteína (-0.84), acidez titulable (-0.82), a^* (-0.71), ABTS (-0.65). Mientras que, en el componente 2 los parámetros más importantes son b^* (-0.99), capacidad absorción de aceite (-0.99), flavonoides totales (-0.96), antocianinas totales (-0.89), FRAP (-0.80) y cenizas (-0.77). Adicionalmente, en la Figura 2b se presenta el análisis de clúster jerárquico, en donde se aprecian dos grupos, el primero corresponde a HAO y el segundo está conformado por HAC y HAM.

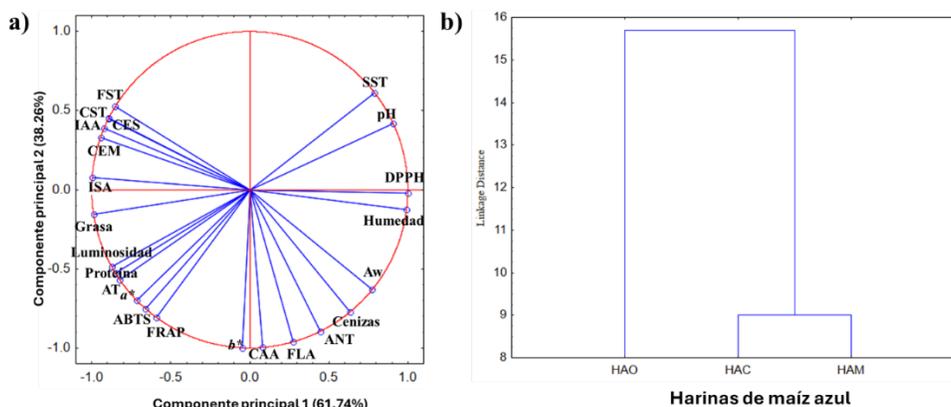


Figura 2. Análisis de componentes principales (a) y clúster jerárquico (b) del comportamiento de las variables de respuesta en harinas de maíces nativos de color azul. CST: carbohidratos solubles totales, CES: capacidad espumante, IAA: índice de absorción de agua, CEM: capacidad emulsificante, ISA: índice de solubilidad del agua, FST: fenoles solubles totales, CAA: capacidad de absorción de aceite, AT: acidez titulable, ANT: antocianinas totales, Aw: actividad de agua, SST: sólidos solubles totales, FLA: flavonoides.

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

La composición nutrimental en las harinas del maíz es de interés debido a la importancia del grano en la dieta de los humanos y sus usos en los sistemas agroindustriales y pecuarios. Los contenidos de proteína, carbohidratos totales y grasa fueron mayores en HAM, en comparación de HAO y HAC. Estos resultados son similares a los reportados por Vázquez-Carrillo et al. (2018) en maíz nativo azul cultivado en la Ciudad de México; así como por lo reportado por Salvador-Reyes et al. (2020), en maíces peruanos pigmentados. Por otro lado, Libron et al. (2021) reportaron contenidos mayores que los reportados en este estudio respecto a proteína (9.28-15.87 %) y grasa (4.36-5.67 %) en maíces pigmentados de Filipinas. Estas diferencias se deben al genotipo de las muestras, así como a las condiciones agroclimáticas y de manejo del cultivo en cada región.

La actividad de agua (Aw) es un parámetro importante en la industria alimentaria debido que valores bajos de este parámetro pueden utilizarse para el control del desarrollo de microorganismos, además de reacciones enzimáticas y no enzimáticas involucradas en el deterioro de los alimentos durante su almacenamiento. Las harinas de maíz nativo de color azul presentaron valores bajos de Aw (0.36-0.40), los cuales concuerdan con lo reportado en 5 maíces nativos pigmentados de Perú con valores de Aw de 0.34 (Salvador-Reyes et al., 2021); sin embargo, García-Campos et al. (2020) reportaron una Aw de 0.7 en dos maíces nativos rojos y azules del Altiplano de México. Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones de procesamiento y/o almacenamiento de las harinas.

Los sólidos solubles totales (SST) indican el contenido de azúcares solubles en los alimentos. Las harinas de maíz mostraron valores de SST de 1.4-1.8 °Brix, valores similares a lo reportado por

Balseiro et al. (2015) en harinas de maíz colombiano (1.30 °Brix). No obstante, se han reportado valores de 0.2 °Brix en harinas de maíces híbridos (Adebo et al., 2021). Valores bajos de este parámetro pueden asociarse con el tiempo de almacenamiento del grano, ya que a mayor tiempo de almacenamiento puede disminuir la concentración de SST debido a su conversión en almidón o bien puede ser empleado en la respiración del grano (Machado-Filho et al., 2018).

El pH y la acidez titulable se asocian con la presencia de ácidos orgánicos en los alimentos; sin embargo, estos parámetros pueden utilizarse como indicadores de calidad de las harinas, ya que cambios en este parámetro pueden asociarse con crecimiento microbiano e influir en el comportamiento de las propiedades funcionales (Milán-Carrillo et al., 2004). Las harinas de maíz evaluadas en este estudio presentan valores de pH similares a los reportados por Salvador-Reyes et al. (2021) en maíces nativos de Perú (6.15-6.34) y por Hernández-Santos et al. (2023) en harina de maíz nativo de Oaxaca (6.4). En relación con la acidez titulable, Salvador-Reyes et al. (2021) reportan valores similares (0.13-0.30 %) a los aquí encontrados (0.2 %).

El color en las harinas de maíz es considerado un indicador de calidad, principalmente desde el punto de vista comercial, ya que pueden mejorar los atributos sensoriales de los alimentos elaborados a partir de maíz (Colombo et al., 2021). Los valores de luminosidad, a^* y b^* se encuentran en la escala de color azul-gris, valores similares se reportaron en harinas de maíz azul cultivado en Turquía. No obstante, el color del maíz depende de la acumulación de pigmentos que, a su vez, dependen de las características genéticas y prácticas agronómicas (Mutlu et al., 2017).

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios producidos por las plantas como mecanismo de defensa frente depredadores. Sin embargo, se ha demostrado que dietas ricas en estos compuestos aportan beneficios a la salud del consumidor debido a las actividades biológicas que presentan. El maíz es uno de los cereales con mayor contenido de compuestos fenólicos (Villareal-Rodríguez et al., 2022). En este contexto, las harinas de maíz azul contienen fenoles solubles (10.68 – 17.74 mg EAG g⁻¹ MS), flavonoides (12.16 – 17.71 mg ECAT g⁻¹ MS) y antocianinas (0.28 – 0.36 mg EC3G g⁻¹ MS). Los valores reportados en este estudio para FST fue mayor a lo reportado en harina de azul proveniente del Estado de Oaxaca, México (3.07 mg EAG g⁻¹ MS) y de Texcoco, México (2 mg EAG g⁻¹ MS) (Méndez-Lagunas et al., 2020; Camelo-Méndez et al., 2017). Adicionalmente, el contenido de flavonoides totales en harinas de maíz azul se ha reportado en un rango de 0.094–38.03 mg ECAT g⁻¹ MS (Hernández-Santos et al., 2022; Zilic et al., 2016). Por su parte, el contenido de antocianinas totales en harina de maíz azul se ha reportado en un rango de 0.0069–1.07 mg EC3G g⁻¹ MS (Robles-Plata et al., 2023; Hernández-Santos et al., 2022; Camelo-Méndez et al., 2017; Zilic et al., 2016). Las diferencias en la concentración en FST, FLA y ANT pueden deberse al genotipo de maíz, altitud, temperatura, estrés abiótico, etapa de maduración, etapa de recolección, entre otros (Colombo et al., 2021).

Adicionalmente, las harinas presentan actividad antioxidante por diferentes métodos, tales como ABTS, FRAP y DPPH, lo cual se debe a la diversidad de compuestos bioactivos que contienen. Diversos autores han reportado que los maíces pigmentados (principalmente los de color azul) son fuente de compuestos antioxidantes capaces de inhibir radicales libres, lo que protege a las células del estrés oxidativo (Villareal-Rodríguez et al., 2022; Colombo et al., 2021; Camelo-Méndez et al., 2017; Zilic et al., 2016). En este contexto, las harinas de maíz nativo de color azul se pueden utilizar como ingrediente en la elaboración de alimentos con potencial funcional.

En general, las propiedades tecno-funcionales de las harinas de maíz determinan la aplicación potencial en la industria alimentaria. El índice de solubilidad de agua (ISA) es utilizado para determinar la cantidad de materia disuelta en agua y es un indicador de degradación de componentes de la matriz alimentaria, en particular de moléculas de almidón. En este trabajo HAO (5.70%) presenta el menor

valor de ISA en comparación con HAM y HAC (6.14 y 6.92%). Estos valores son menores a lo reportado por Hernández-Santos et al. (2023) quienes reportaron un ISA de 15.24% en harina de maíz azul. Sin embargo, se han reportado harinas de maíz con valores de ISA de 10.99 a 31.18% (Patil et al., 2021). Las diferencias pueden atribuirse a la estructura y morfología de los gránulos de almidón, así como a la presencia de proteínas, fibras y otros compuestos (Hernández-Santos et al., 2023). Por su parte, HAM (2.37%) tiene mayor capacidad de absorción de agua en comparación con HAO y HAC (2.15 y 2.16%), esta propiedad está relacionada con la integridad del almidón en presencia de agua, sugiriendo que a mayor valor de IAA, mayor es el grado de gelatinización del almidón. En la literatura se han reportado valores de IAA en un rango de 1.04 a 2.44% en harinas de maíz amarillo (Mejía-Terán et al., 2024), así como valores de hasta 5.87% en harinas de maíz amarillo sometidas a microondas (An et al., 2023) y de 2.45 a 9.02% en harina de maíz destinada a la elaboración de extruidos (Patil et al., 2021). Valores altos en este parámetro son deseables en la industria panadera, ya que permite el uso de un mayor volumen de agua en las preparaciones, lo que mejora el amasado y la frescura del producto final (Hernández-Santos et al., 2023).

La capacidad de absorción de aceite es una propiedad importante en los alimentos ya que los lípidos mejoran el sabor, textura y color, parámetros importantes para la industria panadera, cárnica y de productos fritos. Las harinas evaluadas presentan una capacidad de absorción de aceite en un rango de 4.65–4.75 g de aceite g⁻¹ MS. Estos valores son mayores a lo reportado por Hernández-Santos et al. (2023) en harinas de maíz azul (2.34%). Esta propiedad depende de la concentración de proteína, fibra y almidón; no obstante, en maíces nativos la capacidad de absorción de aceite se ve influenciada por la relación amilosa-amilopectina y la longitud de sus cadenas (Khan et al., 2020).

La capacidad emulsificante está relacionada con la capacidad de las proteínas para estabilizar la interfase aceite-agua debido a la hidrofobicidad de sus cadenas. HAM mostró los valores más altos (12.7%) y la menor, HAC (9.83%). Estos valores son mayores a los reportados en otros trabajos como Hernández-Santos et al. (2023) quienes reportan un 2.25% de capacidad emulsificante en harina de maíz azul de Oaxaca, México. Esta variable es de interés por sus aplicaciones en la industria alimentaria, especialmente en la fabricación de productos que requieren una alta capacidad de emulsificación, como en sopas y bebidas instantáneas (Mejía-Terán et al., 2024).

La capacidad espumante de diversas materias primas es importante en la preparación de alimentos ya que ayudan a mantener la estructura antes y después del procesamiento. La capacidad espumante en las muestras evaluadas fue de 5.72–6.77%, estos resultados son menores a los reportados por Hernández-Santos et al. (2023) en harina de maíz azul (30.49%). Sin embargo, en harina de maíz amarillo se han reportado valores de 2.30% (Asouzu et al., 2023). La capacidad espumante depende de la cantidad de proteína en las harinas, las cuales pueden reducir la tensión superficial y actuar como surfactantes o tensoactivos (Petkova et al., 2020); no obstante, la solubilidad de las muestras juega un papel importante en este parámetro (Hernández-Santos et al., 2023). De acuerdo con Keramaris et al. (2023), la capacidad espumante de las harinas de maíz puede verse afectada por el procesamiento de la muestra, particularmente cuando son sometidas a calor.

Los análisis de componentes principales y clúster jerárquico permiten evidenciar el comportamiento de las variables de estudio y a su vez agrupar las harinas de maíz de acuerdo con sus diferencias o similitudes. En general, HAM y HAC tienden a ser similares entre sí. Lo anterior, puede deberse a que HAO presenta la mayor concentración de proteína, sólidos solubles totales y flavonoides totales. El análisis estadístico multivariado se ha aplicado para destacar el efecto de la fermentación sobre el perfil sensorial de pan a base de maíz (Pontonio et al., 2019). Además, para estudiar el efecto de la adición de aceites esenciales sobre las propiedades tecnológicas y nutrimentales en granos de maíz (Goudoum et al., 2012).

Estos resultados proveen información de interés sobre las propiedades nutrimentales, fisicoquímicas, funcionales y tecnológicas de harinas de tres accesiones de maíz azul de México. Lo anterior, implica que dichas accesiones deben formar parte de programas de mejoramiento para conservar y utilizar dichas propiedades en el desarrollo y producción de alimentos y bebidas con potencial funcional.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran la idoneidad de las harinas de maíz nativo de color azul cultivados en México para su uso en la industria alimentaria como fuente de componentes nutricionalmente activos (proteína, carbohidratos y grasas) y compuestos antioxidantes (fenoles solubles, flavonoides y antocianinas); además, de presentar excelentes propiedades fisicoquímicas y tecnológicas-funcionales para el desarrollo de alimentos y bebidas potencialmente funcionales o nutraceúticas.

Esto implica que las accesiones aquí evaluadas se deben emplear en programas de mejoramiento genético para su conservación, propagación y caracterización por el potencial que exhiben para aplicaciones en la industria de los alimentos. Adicionalmente, faltan más estudios sobre el uso de estas harinas en la elaboración de alimentos y bebidas; así como la caracterización de harinas de maíces nativos pigmentados de otros colores.

FINANCIAMIENTO: Este trabajo de investigación se realizó con financiamiento propio.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecemos a *Ernesto Emmanuel Hermosillo Martín* y a *José Rodolfo López Orozco* por su apoyo técnico como parte de las actividades del Programa “Incorporación temprana a la investigación”, del Centro Universitario de Los Altos de la Universidad de Guadalajara. Asimismo, agradecemos a *Sofía López González* de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por su apoyo técnico como parte de las actividades desarrolladas en el XXIX Verano de Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2024, del Programa Delfin.

REFERENCIAS

- Adebo, O. A., Oyedeji, A. B., Adebisi, J. A., Chinma, C. E., Oyeyinka, S. A., Olatunde, O. O., Green, E., Njobeh, P. B., & Kondiah, K. (2021). Kinetics of phenolic compounds modification during maize flour fermentation. *Molecules*, 26(21), 6702. <https://doi.org/10.3390/molecules26216702>
- An, N., Li, D., Wang, L., & Wang, Y. (2023). Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocolloids*, 143, 108939. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108939>
- Anderson, R. A., Conway, H. F., & Peplinski, A. J. (1970). Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming. *Starch - Stärke*, 22(4), 130-135. <https://doi.org/10.1002/star.19700220408>
- AOAC. (2005). Official Method of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International. MD: AOAC International Gaithersburg.
- AOAC. (2016). Official Method of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International. MD: AOAC International Gaithersburg.
- Asouzu, A. I., Oly-Alawuba, N. M., & Umerah, N. N. (2020). Functional properties and chemical composition of composite flour made from cooking banana (*Musa paradisiaca*) and yellow maize (*Zea mays*). *Research Journal of Food and Nutrition*, 4(2), 6-12. <https://doi.org/10.22259/2637->

5583.0402002

- Balseiro, G., Taron, A., & Garcia-Zapateiro, L. A. (2015). Nutritional properties of different composite flours from maize (*Zea mays*) variety ica v109 and pearl millet (*Pennisetum glaucum*) malted with calcium chloride and gibberellic acid. *European Food Research & Technology*, 240(3), 471-475. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2345-2>
- Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Camelo-Méndez, G. A., Agama-Acevedo, E., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. (2017). Functional study of raw and cooked blue maize flour: Starch digestibility, total phenolic content and antioxidant activity. *Journal of Cereal Science*, 76, 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.009>
- Colombo, R., Ferron, L., & Papetti, A. (2021). Colored corn: An up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use. *Molecules*, 26(1), 199. <https://doi.org/10.3390/molecules26010199>
- CONABIO. 2022. Razas de maíz de México Recuperado de <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Cd. de México. México. Contenido: Cecilio Mota Cruz, Rosa María González Amaro, Caroline Burgeff, Cuauhtémoc Enríquez García, Oswaldo Oliveros Galindo y Francisca Acevedo Gasman / Colaboradores externos: José de Jesús Sánchez González (CUCBA, UdG), Juan Manuel Hernández Casillas (CIRCE, INIFAP), Rafael Ortega Paczka (UACH), Hugo Perales Rivera (ECOSUR).
- Culetu, A., Susman, I. E., Duta, D. E., & Belc, N. (2021). Nutritional and functional properties of gluten-free flours. *Applied Sciences*, 11(14), 6283. <https://doi.org/10.3390/app11146283>
- Dongmo, H., Tambo, S. T., Teboukeu, G. B., Mboukap, A. N., Fotso, B. S., Djuidje, M. C. T., & Klang, J. M. (2020). Effect of process and variety on physico-chemical and rheological properties of two corn flour varieties (Atp and Kassai). *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100075>
- Etchevers, B. (1994). *Transactions: 15th World Congress of Soil Science*, Acapulco, Mexico, July 1994. International Society of Soil Science.
- Filho, G. C. M., Nascimento, I. R., Sakai, T. R. P., Rocha, W. S., & Santos, M. M. D. (2018). Brix e produção de espigas de milho verde em função de épocas de adubação nitrogenada. *Applied Research & Agrotechnology*, 11(1). <https://doi.org/10.5935/paet.v11.n1.04>
- Filipčev, B., Đalović, I., Nježić, Z., Šimurina, O., Bekavac, G., & Pojić, M. (2022). Physical and milling properties of maize. En Purewal, S. S., Kaur, P., Bangar, S. P., Sandhu, K. S., Singh, S. K., & Kaur, M (Eds). *Maize: Nutritional Composition, Processing, and Industrial Uses*. (1st ed.). (pp. 1-38) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003245230-1>
- García-Campos, A. U., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., Jiménez-Guzmán, J., Fabela-Morón, M. F., De la Paz Salgado-Cruz, M., De Jesús Cortés-Sánchez, A., Villanueva-Carvajal, A., & Díaz-Ramírez, M. (2020). Caracterización físico-química de maíz (*Zea mays* L.) criollo (azul y rojo) del Estado de México. *Agro Productividad*, 13(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1728>
- Goudoum, A., Tinkeu, L. S. N., Ngassoum, M. B., & Mbofung, C. M. (2012). Variation in

- technological and nutritional parameters of maize treated with essential oils during storage. *African Journal of Food Science*, 6(2), 34-40. <https://doi.org/10.5897/ajfs11.198>
- Hasmadi, M., Noorfarahzilah, M., Noraidah, H., Zainol, M., & Jahurul, M. (2020). Functional properties of composite flour: a review. *Food Research*, 4(6), 1820-1831. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).419](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).419)
- Hernández-Santos, B., Lerdo-Reyes, A. A., Téllez-Morales, J. A., & Rodríguez-Miranda, J. (2022). Chemical composition, techno-functional properties, and bioactive components of blends of blue corn/purple sweet potato for its possible application in the food industry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(2), 1909-1920. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01767-7>
- Keramaris, A., Papadopoulos, V., Kasapidou, E., & Mitlianga, P. (2023). A comprehensive analysis on nutritional and antioxidant characteristics of a traditional roasted maize flour (Furniko) of pontic greeks: Comparative study to related flour products. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78(2), 476-482. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01078-2>
- Libron, J. A. M. A., Cardona, D. E. M., Mateo, J. M. C., Beltran, A. K. M., Tuaño, A. P. P., & Laude, T. P. (2021). Nutritional properties and phenolic acid profile of selected Philippine pigmented maize with high antioxidant activity. *Journal of Food Composition and Analysis*, 101, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103954>
- Manzanarez-Tenorio, L. E., Ruiz-Cruz, S., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Márquez-Ríos, E., Del Toro-Sánchez, C. L., & Suárez-Jiménez, G. M. (2022). Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (*Opuntia gosseliniana*) en dos etapas de coloración. *Biotecnia*, 24(3), 101-106. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1662>
- Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Mateus, E. L., & Sotelo-Díaz, I. (2024). Techno-functional and physicochemical properties of corn flours as potential food ingredients. *Applied Food Research*, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100427>
- Méndez-Lagunas, L. L., Cruz-Gracida, M., Barriada-Bernal, L. G., & Rodríguez-Méndez, L. I. (2020). Profile of phenolic acids, antioxidant activity and total phenolic compounds during blue corn tortilla processing and its bioaccessibility. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4688-4696. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04505-3>
- Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Cuevas-Rodríguez, E., Garzón-Tiznado, J., & Reyes-Moreno, C. (2004). Nixtamalized flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of alkaline processing. *Plant Foods for Human Nutrition*, 59(1), 35-44. <https://doi.org/10.1007/s11130-004-4306-6>
- Mutlu, C., Arslan-Tontul, S., Candal, C., Kilic, O., & Erbas, M. (2017). Physicochemical, thermal, and sensory properties of blue corn (*Zea mays* L.). *Journal of Food Science*, 83(1), 53-59. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14014>
- Nasrin, T. A. A., Noomhorm, A., & Anal, A. K. (2014). Physico-chemical characterization of Culled plantain pulp starch, peel starch, and flour. *International Journal of Food Properties*, 18(1), 165-177. [doi:10.1080/10942912.2013.828747](https://doi.org/10.1080/10942912.2013.828747)
- Patil, S., Kaur, C., Puniya, M. K., Mahapatra, A., Dhakane-Lad, J., Jalgaonkar, K., & Mahawar, M. K. (2021). Functional properties of extruded corn flour. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(1), 167-174. <https://doi.org/10.46592/turkager.2021.v02i01.012>

- Paulsmeyer, M. N., Vermillion, K. E., & Juvik, J. A. (2022). Assessing the diversity of anthocyanin composition in various tissues of purple corn (*Zea mays* L.). *Phytochemistry*, 201, 113263. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113263>
- Pérez-Jiménez, J., Arranz, S., Tabernero, M., Díaz-Rubio, M. E., Serrano, J., Goñi, I., & Saura-Calixto, F. (2008). Updated methodology to determine antioxidant capacity in plant foods, oils and beverages: extraction, measurement and expression of results. *Food Research International*, 41(3):274-285.
- Petkova, B., Tcholakova, S., Chenkova, M., Golemanov, K., Denkov, N., Thorley, D., & Stoyanov, S. (2020). Foamability of aqueous solutions: Role of surfactant type and concentration. *Advances in Colloid and Interface Science*, 276, 102084. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102084>
- Pontonio, E., Dingo, C., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2019). Maize milling by-products: from food wastes to functional ingredients through lactic acid bacteria fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00561>
- Ramírez-Vega, H., Vázquez-Carrillo, G., Muñoz-Rosales, G. M., Martínez-Loperena, R., Heredia-Nava, D., Martínez-Sifuentes, J. Á., Anaya-Esparza, L. M., & Gómez-Rodríguez, V. M. (2022). Physical and chemical characteristics of native maize from the Jalisco highlands and their influence on the nixtamalization process. *Agriculture*, 12(9), 1293. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091293>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Revilla, P., Alves, M. L., Andelković, V., Balconi, C., Dinis, I., Mendes-Moreira, P., Redaelli, R., De Galarreta, J. I. R., Patto, M. C. V., Žilić, S., & Malvar, R. A. (2022). Traditional foods from maize (*Zea mays* L.) in Europe. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.683399>
- Robles-Plata, V. T., Saldivar, S. S., De Dios Figueroa-Cárdenas, J., Rooney, W. L., Dávila-Vega, J. P., Chuck-Hernández, C., & Escalante-Aburto, A. (2023). Biophysical, nutraceutical, and technofunctional features of specialty cereals: pigmented popcorn and sorghum. *Foods*, 12(12), 2301. <https://doi.org/10.3390/foods12122301>
- Rochín-Medina, J. J., Mora-Rochín, S., Navarro-Cortez, R. O., Tovar-Jimenez, X., Quiñones-Reyes, G., Ayala-Luján, J. L., & Aguayo-Rojas, J. (2021). Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sembradas en el estado de Zacatecas. *Acta Universitaria*, 31, e3059. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3059>
- Rodríguez-Salinas, P. A., Zavala-García, F., Urías-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., & Niño-Medina, G. (2019). Chromatic, nutritional and nutraceutical properties of pigmented native maize (*Zea mays* L.) genotypes from the northeast of Mexico. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(1), 95-112. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04086-0>
- Salinas-Moreno, Y., Esquivel-Esquivel, G., Ramírez-Díaz, J. L., La Torre, I. A., Bautista-Ramírez, E., & Santillán-Fernández, A. (2021). Selección de germoplasma de maíz morado (*Zea mays* L.) con potencial para extracción de pigmentos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(3), 309. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.3.309>
- Salvador-Reyes, R., & Clerici, M. T. P. S. (2020). Peruvian andean maize: General characteristics, nutritional properties, bioactive compounds, and culinary uses. *Food Research International*, 130, 108934. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108934>

- Salvador-Reyes, R., Rebellato, A. P., Pallone, J. A. L., Ferrari, R. A., & Clerici, M. T. P. S. (2021). Kernel characterization and starch morphology in five varieties of Peruvian Andean maize. *Food Research International*, 140, 110044. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110044>
- Sánchez-Moreno, C., Larrouri, J. A., & Saura-Calixto., (1998). A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Journal of Science Food & Agriculture*, 76:270-276.
- Serna-Saldivar, S. O. (2021). Understanding the functionality and manufacturing of nixtamalized maize products. *Journal of Cereal Science*, 99, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103205>
- USDA. (2024). Northwest Africa wheat: Varying weather conditions; Mixed results for MY 2024/25. United States Department of Agriculture. Recuperado el día 03 de mayo 2024, de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
- Vázquez-Carrillo, M. G., Aparicio-Eusebio, L. A., Salinas-Moreno, Y., Buendía-Gonzalez, M. O., & Santiago-Ramos, D. (2018). Nutraceutical, physicochemical, and sensory properties of blue corn polvorones, a traditional flour-based confectionery. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73(4), 321-327. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0692-z>
- Vázquez-Carrillo, M. G., Toledo-Aguilar, R., Aragón-Cuevas, F., Salinas-Moreno, Y., Palacios-Rojas, N., & Santiago-Ramos, D. (2023). From maize to tlayuda, a traditional big-flat leathery tortilla. Effect of two nixtamalization processes on some physicochemical and nutraceutical properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100661>
- Villarreal-Rodríguez, G., Escajeda-García, J., Amaya-Olivas, N., Chávez-Flores, D., Neder-Suárez, D., Soto, J. G. A., Quintero-Ramos, A., Ruíz-Anchondo, T., & Hernández-Ochoa, L. (2022). Determination of phenolic compounds in blue corn flour (*Zea mays* L.) produced and/or metabolized by *Colletotrichum gloeosporioides* in a fermentation process. *Fermentation*, 8(6), 243. <https://doi.org/10.3390/fermentation8060243>
- Weber, F. (2021). Noncovalent polyphenol–macromolecule interactions and their effects on the sensory properties of foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(1), 72-78. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c05873>
- Yasumatsu, K., Sawada, K., Moritaka, S., Misaki, M., Toda, J., Wada, T., & Ishii, K. (1972). Whipping and emulsifying properties of soybean products. *Agricultural And Biological Chemistry*, 36(5), 719-727. <https://doi.org/10.1080/00021369.1972.10860321>
- Zhang, Q., De Mejia, E. G., Luna-Vital, D., Tao, T., Chandrasekaran, S., Chatham, L., Juvik, J., Singh, V., & Kumar, D. (2019). Relationship of phenolic composition of selected purple maize (*Zea mays* L.) genotypes with their anti-inflammatory, anti-adipogenic and anti-diabetic potential. *Food Chemistry*, 289, 739-750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.116>
- Žilić, S., Kocadağlı, T., Vančetović, J., & Gökmen, V. (2016). Effects of baking conditions and dough formulations on phenolic compound stability, antioxidant capacity and color of cookies made from anthocyanin-rich corn flour. *Food Science & Technology*, 65, 597-603. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.057>