

Compuestos bioactivos, actividad antioxidante e inhibición de enzimas hidrolíticas de carbohidratos en pastas elaboradas con maíces nativos mexicanos

Bioactive compounds, antioxidant activity, and starch-hydrolyzing enzyme inhibition of pasta elaborated from Mexican native maize

Berenice Padilla-Gómez ^a, Marycarmen Cortes-Hernández ^b, Gabriela Medina Pérez ^a, Uriel González Lemus ^a, Irma Morales-Rodríguez ^a, Diana Ximena Zepeda-Soto ^{c*}

Abstract:

Native maize varieties from the state of Hidalgo represent an important reservoir of genetic diversity and bioactive compounds with potential for developing high-value-added functional foods. This study evaluated the effects of three native maize varieties from Hidalgo (Amarillo, Villa, and Negro Ancho) on the bioactive and antioxidant properties, inhibition of carbohydrate hydrolytic enzymes, proximate composition, and color of fresh pasta, using a commercial pasta as a control. The content of total phenolic compounds, flavonoids, antioxidant capacity (using the ABTS assay), inhibition of α -amylase and α -glucosidase, proximate composition (moisture, fat, ash, protein, and fiber), and colorimetric parameters (L^* , a^* , and b^*) were determined. Pastas made with native maize varieties showed significant increases ($p < 0.05$) in bioactive compound content and antioxidant capacity compared to the control. Pasta made with the Negro Ancho variety showed the highest content of phenolic compounds (16.33 mg GAE), the highest antioxidant capacity (145.98 mg AEA and 73.57% ABTS radical inhibition), as well as the highest inhibition of α -amylase (21.35%) and α -glucosidase (24.01%). In proximate composition, the Villa variety had the highest protein (9.32%) and ash (5.87%) content, while Negro Ancho had the highest fat content (12.21%). Furthermore, the colorimetric characteristics reflected each variety's pigmentation, with lower luminosity and greater intensity of dark tones observed in pasta made with Negro Ancho. The results demonstrate that the native maize varieties of Hidalgo constitute a raw material with high potential for producing functional pasta by enhancing their nutraceutical and technological properties.

Keywords:

Zea mays L., native maize, functional foods, hypoglycaemic activity, phenolic compounds, agricultural biodiversity.

Resumen:

Las razas de maíz nativo del estado de Hidalgo representan un importante reservorio de diversidad genética y de compuestos bioactivos con potencial para el desarrollo de alimentos funcionales de alto valor agregado. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres razas de maíz nativo de Hidalgo (Amarillo, Villa y Negro Ancho) sobre las propiedades bioactivas, antioxidantes, la inhibición de enzimas hidrolíticas de carbohidratos, la composición bromatológica y el color de pastas frescas, utilizando una pasta comercial como testigo. Se determinaron el contenido de compuestos fenólicos totales y de flavonoides, la capacidad antioxidante mediante el ensayo ABTS, la inhibición de la α -amilasa y de la α -glucosidasa, así como la composición proximal (humedad, grasa, cenizas, proteína y fibra) y los parámetros colorimétricos (L^* , a^* y b^*). Las pastas elaboradas con maíces nativos presentaron incrementos significativos ($p < 0.05$) en el contenido de compuestos bioactivos y en la capacidad antioxidante en comparación con el testigo. La pasta elaborada con la raza Negro Ancho registró el mayor contenido de compuestos fenólicos (16.33 mg EAG), la mayor capacidad antioxidante (145.98 mg EAA y 73.57 % de inhibición del radical ABTS), así como la mayor inhibición de la α -amilasa (21.35 %) y de la α -glucosidasa (24.01 %). En la composición proximal, la raza Villa presentó el mayor contenido de proteína (9.32

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, México. <https://orcid.org/0009-0000-3501-2755>, Email: pa402599@uaeh.edu.mx; <https://orcid.org/0009-0006-6888-7543>; <https://orcid.org/0000-0001-8673-941X> email gabriela_medina@uaeh.edu.mx; <https://orcid.org/0000-0002-7050-0874>, email uriel_gonzalez@uaeh.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0005-3611-4485>, irma_morales@uaeh.edu.mx

^b Programa de Doctorado en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, México. <https://orcid.org/0000-0002-8508-0366>. Email: marycarmencohdz@cinvestav.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela de Posgrado de Tlahuelilpan, Área Académica de Enfermería. 2 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias de la Salud, Área Académica de Nutrición, <https://orcid.org/0009-0008-3538-8144>, ze375259@uaeh.edu.mx.

*autor de correspondencia

%) y de cenizas (5.87 %), mientras que la raza Negro Ancho destacó por su mayor contenido de grasa (12.21 %). Asimismo, las características colorimétricas reflejaron la pigmentación propia de cada raza, observándose una menor luminosidad y una mayor intensidad de los tonos oscuros en la pasta elaborada con Negro Ancho. Los resultados demuestran que las razas de maíz nativo de Hidalgo constituyen una materia prima con un elevado potencial para la elaboración de pastas funcionales, al mejorar sus propiedades nutraceuticas y tecnológicas.

Palabras Clave:

Zea mays L., maíz nativo, alimentos funcionales, actividad hipoglucemiante, compuestos fenólicos, biodiversidad agrícola.

1. Introducción

México es reconocido como el centro de origen, domesticación y diversificación del maíz (*Zea mays* L.), al albergar alrededor de 59 razas nativas que representan una de las mayores reservas de diversidad genética del cultivo a nivel mundial [1]. Estas poblaciones han sido conservadas *in situ* durante miles de años mediante la selección realizada por comunidades campesinas e indígenas, lo que les ha permitido desarrollar una amplia adaptación a diversas condiciones agroecológicas y constituir un patrimonio biocultural de gran importancia para la seguridad alimentaria, la resiliencia de los sistemas agrícolas y el mejoramiento genético del cultivo.

El estado de Hidalgo es una de las regiones con mayor riqueza en maíces nativos de México [2]. Aproximadamente el 95 % de la superficie cultivada en condiciones de temporal corresponde a materiales criollos, mientras que Atotonilco el Grande concentra una de las mayores diversidades raciales registradas en el país [3]. Estas poblaciones continúan siendo conservadas por los agricultores mediante sistemas tradicionales de producción, quienes destinan parte de la cosecha al consumo familiar y otra parte a la conservación de semilla para ciclos agrícolas posteriores. Esta práctica ha permitido preservar materiales con características agronómicas y morfológicas particulares, adaptados a las condiciones ambientales de la región.

Además de su importancia cultural y agrícola, los maíces nativos constituyen una fuente de compuestos con potencial nutraceutico [4]. Diversos estudios han demostrado que las variedades pigmentadas presentan concentraciones elevadas de compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas y otros metabolitos secundarios con actividad antioxidante, capaces de contribuir a la prevención del estrés oxidativo y de las enfermedades crónico-

degenerativas [4-7]. Asimismo, la composición del endospermo, la estructura del almidón y la relación entre amilosa y amilopectina determinan propiedades funcionales relevantes durante el procesamiento de alimentos, como la gelatinización, la formación de geles, la digestibilidad del almidón y la calidad tecnológica de los productos elaborados [7].

En la actualidad, existe un creciente interés en desarrollar alimentos funcionales a partir de materias primas tradicionales que, además de aportar valor nutricional, favorezcan la conservación de la biodiversidad agrícola y el aprovechamiento sostenible de los recursos locales. Entre estos productos, las pastas representan una excelente alternativa debido a su amplia aceptación por los consumidores, su facilidad de procesamiento y la posibilidad de incorporar ingredientes con propiedades bioactivas sin afectar significativamente sus características tecnológicas [7]. La sustitución parcial o total de la sémola de trigo por harinas de maíces nativos podría incrementar el contenido de compuestos antioxidantes y conferir propiedades funcionales adicionales, como la inhibición de enzimas implicadas en la digestión de carbohidratos, lo que contribuiría a reducir la respuesta glucémica de estos alimentos [8-11]

A pesar de la elevada diversidad de maíces nativos presentes en Hidalgo y de su importancia para la conservación de los recursos fitogenéticos, la información sobre su aprovechamiento en el desarrollo de alimentos funcionales sigue siendo limitada. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en su caracterización agronómica, morfológica o física, mientras que existen pocos estudios que evalúen el potencial tecnológico y bioactivo de productos elaborados a partir de estas razas, particularmente en matrices alimentarias como las pastas [12-14].

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres razas de maíz nativo del estado de Hidalgo (Amarillo, Villa y Negro Ancho) sobre las propiedades bioactivas, la capacidad antioxidante, la inhibición de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa, la composición bromatológica y las características colorimétricas de pastas frescas, con la finalidad de generar evidencia científica que contribuya a la revalorización de los maíces nativos hidalguenses y a su incorporación en el desarrollo de alimentos funcionales con mayor valor agregado.

2. Materiales y métodos

2.1 Material vegetal

Se utilizaron tres razas de maíz nativo del estado de Hidalgo: Amarillo (AM), Villa (VI) y Negro Ancho (NA), colectadas durante el ciclo agrícola 2025 en parcelas de productores del municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo, México, región reconocida por su elevada diversidad de maíces nativos. Como material de referencia, se utilizó un híbrido comercial Pioneer® (HC), ampliamente utilizado en la producción de grano destinado a la industria alimentaria.

Las mazorcas fueron desgranadas manualmente y los granos se limpiaron para eliminar impurezas, granos dañados y material extraño. Posteriormente, fueron almacenados en recipientes herméticos a temperatura ambiente hasta su procesamiento. Las principales características de los materiales vegetales utilizados se presentan en la Tabla 1.

2.2 Establecimiento del experimento

Esta investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Ciencia y Tecnología de los Alimentos del Instituto de Ciencias Agropecuarias, ambos pertenecientes a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

2.3 Elaboración de las pastas

Los granos fueron molidos en un molino de martillos hasta obtener una harina con granulometría homogénea. Se prepararon cuatro formulaciones utilizando 70 g de harina de maíz, 30 g de sémola

de trigo, 25 g de huevo entero, 30 g de agua y 1 g de sal, variando únicamente el origen de la harina de maíz. La masa se mezcló durante aproximadamente 10 min; posteriormente, se laminó hasta obtener un espesor cercano a 2 mm, se cortó en forma de fettuccini y se secó en una estufa con circulación de aire a 40 °C durante 24 h. Finalmente, las pastas fueron envasadas en bolsas de polietileno de alta densidad y almacenadas a temperatura ambiente hasta su análisis.

Tabla 1. Características generales de los genotipos de maíz utilizados en la elaboración de pastas frescas. HC: híbrido comercial Pioneer®; AM: raza nativa Amarillo; VI: raza nativa Villa; NA: raza nativa Negro Ancho. Los maíces nativos fueron colectados en el municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo, México, durante el ciclo agrícola de 2025

Genotipo	Tipo de material	Color del grano	Región de colecta	Características sobresalientes
Pioneer® (HC)	Híbrido comercial	Amarillo	Material comercial	Material ampliamente utilizado por la industria; alta uniformidad genética y rendimiento
Amarillo (AM)	Raza nativa	Amarillo intenso	Atotonilco el Grande, Hidalgo	Alto contenido de carotenoides (luteína y zeaxantina), buena adaptación a condiciones de temporal
Villa (VI)	Raza nativa	Crema-amarillo	Atotonilco el Grande, Hidalgo	Buena calidad física del grano, elevada concentración de minerales y proteína
Negro Ancho (NA)	Raza nativa	Negro-morado	Atotonilco el Grande, Hidalgo	Grano pigmentado rico en antocianinas y compuestos fenólicos

La formulación empleada se presenta en la Tabla 1, mientras que el proceso de elaboración se resume en la Figura 1.

Tabla 2. Formulación empleada para la elaboración de pastas frescas. Las cantidades se expresan como porcentaje (%).

Ingrediente	Cantidad g
Harina de maíz	70
Sémola de trigo	30
Huevo entero	25
Agua	25–30
Sal	1

2.4 Composición proximal

La composición proximal de las pastas se determinó según los métodos oficiales de [15]. Se cuantificaron el contenido de humedad (AOAC 935.36), proteína mediante el método Kjeldahl (AOAC 950.36), grasa (AOAC 935.38), cenizas (AOAC 930.22) y fibra cruda (AOAC 950.37). Los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron en porcentaje de base seca

2.5. Determinación del color

El color de las muestras se determinó en función de los valores L^* , a^* y b^* mediante un colorímetro (MINOLTA CM-508 d, Tokio, Japón).

2.6 Preparación de los extractos

Los extractos se obtuvieron siguiendo la metodología establecida por [16] con algunas modificaciones. Se pesaron 3 g de pasta precocida deshidratada (5 min en agua a ebullición y secado a 80 °C durante 12 horas) en tubos de plástico con tapa y se añadió metanol (1:10); a continuación, las muestras se homogeneizaron durante 2 min y, posteriormente, se colocaron en un baño ultrasónico (Branson, 3510R-DTH, Estados Unidos) durante 20 min a 20 °C (40 kHz). Una vez sonicadas, las muestras se centrifugaron a 6000 g durante 15 min a 4 °C en una centrifuga (HERMLE, Z36 HK, Alemania). Finalmente, se recuperó el sobrenadante y se almacenó a 4 °C en la oscuridad hasta su análisis posterior.

2.7 Determinación de compuestos bioactivos

2.7.1 Cuantificación del contenido fenólico

El contenido de fenoles totales en las pastas se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu, descrito por [17], con algunas modificaciones. El reactivo de Folin-Ciocalteu (F9252 Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) se preparó a una concentración de 0,2 N y con 7,5 % de carbonato de sodio (Na_2CO_3 , 17903 Fermont, Monterrey, NL, México). Se tomaron 0,5 mL de cada extracto y se mezclaron con 2,5 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu. Cada prueba se realizó por triplicado y se dejó reposar en la oscuridad durante 10 minutos. Posteriormente, se añadieron 2 mL de carbonato de sodio y la mezcla se dejó reaccionar durante 2 horas a la oscuridad. Finalmente, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Jenway, modelo 6715 UV/Vis, Reino Unido) a 760 nm utilizando agua destilada como blanco. Los resultados se interpretaron mediante una curva de calibración de 0-160 μM /mL utilizando ácido gálico ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_5$, 03251 Fermont, Monterrey, NL, México) como estándar de referencia. Los resultados se expresaron en mg de equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (mg EAG/100 g).

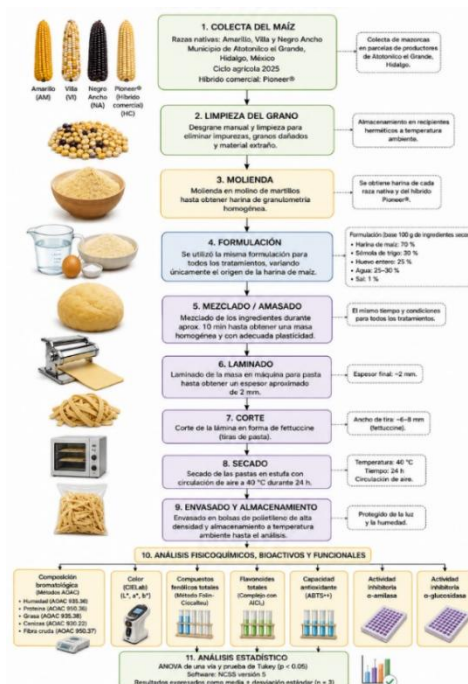


Figura 1. Diagrama de flujo para la elaboración y caracterización de pastas a partir de razas de maíz nativo del estado de Hidalgo.(Elaboración propia)

2.8 Cuantificación del contenido de flavonoides

El contenido total de flavonoides se determinó mediante el método descrito por [18], con algunas modificaciones. Se preparó tricloruro de aluminio (AlCl_3 , 0455 Meyer, Tláhuac, CDMX, México) a una concentración del 2% en metanol puro. Se tomó 1 mL de cada extracto y se añadió 1 mL de la solución de tricloruro de aluminio. Cada prueba se realizó en triplicado y se dejó reposar durante 20 minutos en la oscuridad. Posteriormente, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Jenway, modelo 6715 UV/Vis, Reino Unido) a 415 nm, utilizando metanol puro como blanco.

Los resultados se interpretaron mediante una curva de calibración de 0 a 40 $\mu\text{g/mL}$, utilizando quercetina (Q4951 Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) como estándar de referencia. Los resultados se expresaron en mg de equivalentes de quercetina por 100 g de muestra (mg EQ/100 g).

2.9 Determinación de la actividad antioxidante

2.9.1 Actividad de inhibición del radical libre DPPH•

La inhibición del radical DPPH• se determinó según la metodología descrita por [19], con algunas modificaciones. Primero, se preparó el reactivo DPPH• (D9132 Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) a una concentración de 0,2 mM (7,9 mg de DPPH• disueltos en 100 mL de metanol al 80%). Esta solución se dejó agitando durante 2 h en oscuridad total. Transcurrido este tiempo, se estandarizó ajustando la absorbancia a $0,7 \pm 0,01$ a 515 nm en un espectrofotómetro (Jenway, modelo 6715 UV/Vis, Reino Unido) utilizando metanol al 80%. A continuación, se tomaron 500 μL de cada extracto y se añadieron 2,5 mL del radical DPPH• previamente estandarizado. Este procedimiento se realizó en triplicado y se dejó reaccionar en la oscuridad durante 30 min. Finalmente, se midió la absorbancia a 515 nm. Los resultados se interpretaron utilizando una curva de calibración de 0-30 $\mu\text{g/mL}$ de Trolox (238813 Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) como estándar de referencia. Los resultados se expresaron en mg de equivalentes de Trolox/100 g (mg ET/100 g).

2.10 Inhibición de α -amilasa

Para determinar el porcentaje de inhibición de la enzima α -amilasa, se cuantificó la cantidad de azúcares reductores mediante el método de Miller. El objetivo fue medir la cantidad de azúcares reductores en la muestra como resultado de la actividad hidrolítica de la α -amilasa sobre el sustrato. Según el método de Miller, los azúcares reductores pueden reducir el ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) en determinadas condiciones. Cuando el ácido 3,5-dinitrosalicílico es reducido por azúcares reductores en presencia de calor, se produce un cambio de color similar al del café (de amarillo a café). Los azúcares liberados en la muestra se determinan haciendo una interpolación en la curva patrón del azúcar utilizado, graficando la absorbancia en función de la concentración [20].

La inhibición de la α -amilasa se realizó mediante la técnica propuesta por [21] con modificaciones. En la cual se tomaron 100 μL del extracto metanólico obtenido de las muestras, se mezclaron con 100 μL de buffer de fosfato de sodio 0.02 mol/L (pH 6.9) y 100 μL de una solución de α -amilasa (1 U/mL), y se preincubaron a 37°C durante 10 minutos. Posteriormente, se agregaron 100 μL de almidón soluble al 0.1 % y se incubaron las muestras a 37 °C durante 60 min. La reacción se detuvo al agregar 1 mL de reactivo DNS (1 g de ácido 3,5-dinitrosalicílico, 20 mL de una solución de NaOH 2 mol/L, 50 mL de agua destilada y 30 g de sal de Rochelle). Los tubos con las muestras fueron llevados a ebullición durante 5 minutos y luego colocados en un baño de agua fría; se agregaron 3 mL de agua destilada y se midió la absorbancia de las muestras a 540 nm.

Las lecturas se compararon con el control negativo, en el que el inhibidor fue reemplazado por buffer, y la inhibición de la enzima se calculó en porcentaje.

Para el control positivo se utilizó un inhibidor sintético cuyo principio activo es la acarbosa (2 mM), de la marca Glucobay en distintas concentraciones [22]. Previamente, se elaboró una curva de calibración de dextrosa (Figura 3) para cuantificar la cantidad de azúcares reductores obtenidos mediante la hidrólisis del almidón por acción de la α -amilasa.

2.11 Inhibición de α -glucosidasa

El potencial de inhibición de los extractos sobre la enzima α -glucosidasa se evaluó midiendo la formación de 4-nitrofenol como resultado de la interacción entre la enzima y el sustrato 4-nitrofenil α -D-glucopiranosido (pNPG), de acuerdo con [23] y [24], con modificaciones. En la cual se tomaron 10 μ L de inhibidor (extracto metanólico de las pastas, el cual fue mezclado con 2.6 mL de buffer de fosfato de sodio 0.05 mol/L (pH 6.9) y 25 μ L de una solución de α -glucosidasa; se preincubó a 37°C por 10 minutos. Posteriormente, se agregaron 25 μ L de sustrato pNPG y las muestras se incubaron a 37 °C durante 40 min. La reacción se detuvo al agregar 25 μ L de solución de carbonato de sodio (0.1 M), y la absorbancia de las muestras se midió a 405 nm. Las lecturas se compararon con el control positivo y la inhibición de la enzima se calculó en porcentaje. La acarbosa se utilizó como control positivo. Todos los ensayos se realizaron por triplicado. Para determinar la actividad de la enzima α -glucosidasa, se cuantificó la cantidad de p-nitrofenol liberado durante el ensayo; se midieron los cambios en la hidrólisis de pNPG a pNP por acción de la enzima. La enzima α -glucosidasa hidroliza el sustrato incoloro, produciendo p-nitrofenol libre que, en un medio alcalino (al añadir NaOH), se transforma en un ión nitrofenolado de color amarillo. La coloración es proporcional a la actividad enzimática.

2.12 Análisis estadístico

El estudio se estableció bajo un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos, correspondientes a las pastas elaboradas con harina de un híbrido comercial de maíz (Pioneer®) y de tres razas de maíz nativo del estado de Hidalgo: Amarillo (AM), Villa (VI) y Negro Ancho (NA). El único factor experimental evaluado fue el origen de la harina de maíz empleada en la formulación. Para cada tratamiento se elaboraron tres lotes independientes de pasta, que constituyeron las unidades experimentales ($n = 3$). Cada lote fue preparado de manera independiente, siguiendo el mismo procedimiento de elaboración y bajo condiciones de procesamiento controladas. A partir de cada unidad experimental se realizaron las determinaciones de composición proximal, de parámetros colorimétricos, de contenido de

compuestos bioactivos, de capacidad antioxidante e de inhibición de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa.

Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. Previamente al análisis estadístico, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y, cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software NCSS, versión 5.0 (NCSS Statistical Software, Kaysville, Utah, EE. UU.).

4. Resultados y discusión

4.1 Parámetros de color de las pastas elaboradas con maíces nativos

Los parámetros colorimétricos mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las pastas elaboradas con las distintas razas de maíz (Tabla 3). La pasta elaborada con la raza Negro Ancho presentó el menor valor de luminosidad ($L = 40.55^*$), significativamente inferior al observado en las pastas elaboradas con las razas Amarillo (75.50), Villa (73.94) y el híbrido comercial (72.89). La disminución de la luminosidad indica una coloración más oscura, característica de los maíces pigmentados como resultado de la elevada concentración de compuestos fenólicos y de pigmentos naturales presentes en el pericarpio y en la capa de aleurona del grano ([25]).

Asimismo, la pasta elaborada con Negro Ancho presentó los mayores valores de a^* (8.74) y b^* (4.31), lo que indica una mayor contribución de tonalidades rojizas en comparación con los demás tratamientos. En contraste, la raza Amarillo registró el mayor valor de b^* (35.13), lo que refleja una marcada tonalidad amarilla atribuida a la presencia de carotenoides, principalmente luteína y zeaxantina, pigmentos característicos de los maíces amarillos [26].



Figura 2. Color de las muestras de pasta fresca de maíz nativo.

Tabla 3. Parámetros colorimétricos (L^* , a^* y b^*) de las pastas elaboradas con maíz híbrido comercial (Pioneer®) y con tres razas de maíz nativo del estado de Hidalgo. Los valores corresponden a la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$). L^* = luminosidad (0 = negro, 100 = blanco); a^* = coordenada rojo (+)/verde (-); b^* = coordenada amarillo (+)/azul (-).

Maíz	L^*	a^*	b^*
Negro Ancho	40.55 ^a	8.74 ^a	4.31 ^a
Amarillo	75.50 ^b	6.73 ^b	35.13 ^b
Villa	73.94 ^c	4.59 ^c	31.56 ^c
Testigo	72.89 ^c	4.50 ^c	30.39 ^c

4.2 Composición proximal

La composición proximal de las harinas de los granos utilizados en la elaboración de las masas se presenta en la tabla 4. Los resultados son similares a los reportados por otros autores [27, 28] en maíces pigmentados de varias regiones de México.

Tabla 4. Composición proximal, contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de tres variedades de maíz criollo cónico (base seca)

Parámetro	Pioneer® (HC)	Blanco	Amarillo	Negro
Proteína	8.05 $\pm$ 2.51 ^a	6.93 $\pm$ 0.16 ^a	6.58 $\pm$ 0.10 ^a	5.05 $\pm$ 0.12 ^b
Lípidos	4.8 $\pm$ 2.02 ^a	9.96 $\pm$ 0.02 ^b	9.07 $\pm$ 0.05 ^c	9.89 $\pm$ 0.01 ^{bc}
Cenizas	1.2 $\pm$ 1.55 ^b	1.15 $\pm$ 0.11 ^c	1.33 $\pm$ 0.35 ^b	1.49 $\pm$ 0.01 ^a
Fibra cruda	2.92 $\pm$ 0.10 ^a	3.93 $\pm$ 3.31 ^a	4.22 $\pm$ 1.45 ^b	3.60 $\pm$ 2.91 ^c
Carbohidratos*	85.84 $\pm$ 0.03 ^a	81.19 $\pm$ 0.13 ^b	80.17 $\pm$ 0.03 ^c	81.47 $\pm$ 0.19 ^d
Fenoles totales (mg ácido gálico/100 g)	138.01 $\pm$ 15.14 ^a	201.00 $\pm$ 0.02 ^b	219.18 $\pm$ 1.97 ^c	379.86 $\pm$ 1.66 ^d
ABTS (mM equivalentes de Trolox)	198.53 $\pm$ 15.14 ^a	268.26 $\pm$ 15.14 ^b	299.40 $\pm$ 6.52 ^c	410.45 $\pm$ 11.33 ^d

Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$) en base seca. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). *Carbohidratos calculados por diferencia.

La composición bromatológica de las pastas mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (Tabla 5). El contenido de humedad osciló entre 4.12 y 4.70 %, valores inferiores al 12 % establecido como límite para pastas secas en diversas normativas internacionales, lo que sugiere una adecuada estabilidad durante el almacenamiento [29]. El contenido de grasa mostró diferencias significativas entre los tratamientos. La pasta elaborada con Negro Ancho alcanzó el mayor valor (12.21 %), seguida de Villa (10.83 %), mientras que la de Amarillo presentó el menor contenido (8.78 %). Estas diferencias son consistentes con la variabilidad natural existente entre razas de maíz, ya que la concentración de lípidos depende principalmente del tamaño y proporción del germen [30].

Respecto al contenido de cenizas, la pasta elaborada con la raza Villa presentó el valor más elevado (5.87%), lo que indica una mayor concentración de minerales en comparación con los demás tratamientos. La mayor concentración de proteína también se observó en la pasta elaborada con la raza Villa (9.32%). En cuanto a la fibra cruda, la pasta elaborada con la raza Amarillo presentó el mayor contenido (1.03 %), seguida de Villa (0.98 %), mientras que el híbrido comercial y Negro Ancho mostraron valores inferiores. La raza Amarillo sobresalió por su mayor contenido de fibra [31]. Esta complementariedad demuestra que la selección del genotipo puede orientarse hacia distintos objetivos tecnológicos o nutraceuticos, según el tipo de alimento que se pretenda desarrollar.

Tabla 5. Composición bromatológica de pastas elaboradas con maíz híbrido comercial (Pioneer®) y tres razas de maíz nativo del estado de Hidalgo. Los valores corresponden a la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$). La composición proximal se determinó de acuerdo con los métodos oficiales de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC).

Parámetro	Testigo (Pioneer®)	Amarillo	Villa	Negro Ancho
Humedad (%)	4.12 $\pm$ ^a	4.27 $\pm$ ^b	4.28 $\pm$ ^b	4.70 $\pm$ ^c
Grasa (%)	10.03 $\pm$ ^a	8.78 $\pm$ ^b	10.83 $\pm$ ^c	12.21 $\pm$ ^d
Cenizas (%)	4.93 $\pm$ ^a	3.08 $\pm$ ^b	5.87 $\pm$ ^c	4.21 $\pm$ ^d
Proteína (%)	8.13 $\pm$ ^a	7.27 $\pm$ ^b	9.32 $\pm$ ^c	8.54 $\pm$ ^d
Fibra (%)	0.66 $\pm$ ^a	1.03 $\pm$ ^b	0.98 $\pm$ ^b	0.70 $\pm$ ^a

4.3 Contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante

Las pastas elaboradas con razas de maíz nativo presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, así como en la capacidad antioxidante (tabla 6). La pasta elaborada con la raza Negro Ancho presentó los mayores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides, así como la mayor capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo ABTS, superando significativamente al híbrido comercial Pioneer® y a las demás razas evaluadas. Estos resultados evidencian que las características químicas inherentes de los maíces pigmentados se conservan, al menos parcialmente, durante el procesamiento de la pasta, permitiendo obtener un alimento con mayor potencial funcional [9, 32].

El mayor contenido de compuestos fenólicos observado en la raza Negro Ancho puede atribuirse a la acumulación de metabolitos secundarios presentes en el pericarpio y la capa de aleurona, principalmente ácidos fenólicos, flavonoides y antocianinas. Estos compuestos desempeñan funciones de protección frente a factores ambientales y constituyen una de las principales diferencias bioquímicas entre los maíces pigmentados y los de color claro. En este sentido, [6] reportaron que las harinas obtenidas de maíces nativos pigmentados presentaron concentraciones significativamente superiores de compuestos fenólicos y una mayor actividad antioxidante en comparación con materiales comerciales, atribuyendo estas diferencias al genotipo y a la intensidad de la pigmentación del grano. Los resultados obtenidos también coinciden con lo reportado por [5], quienes observaron una fuerte asociación entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en híbridos mexicanos de maíz. Los autores señalaron que los genotipos con mayor concentración de metabolitos fenólicos presentaron una mayor eficiencia para neutralizar radicales libres, un comportamiento similar al observado en las pastas elaboradas con la raza Negro Ancho.

En relación con los flavonoides, la superioridad observada en las razas nativas, particularmente en Negro Ancho, confirma que estos metabolitos representan una fracción importante del sistema

antioxidante del maíz [33]. La capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo ABTS mostró una tendencia consistente con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, lo que sugiere una estrecha relación entre ambas variables. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en maíces pigmentados, donde la actividad antioxidante depende en gran medida de la concentración y la diversidad de compuestos fenólicos presentes en el grano. De manera similar [7] demostraron que el incremento del contenido fenólico del maíz azul se tradujo en un aumento proporcional de la capacidad antioxidante, lo que confirma la elevada contribución de estos compuestos a la neutralización de radicales libres. Aunque durante la elaboración de alimentos pueden producirse pérdidas de compuestos bioactivos debido a fenómenos de oxidación, lixiviación o degradación térmica, diversos estudios han demostrado que una proporción importante de los compuestos fenólicos permanece unida a la matriz del almidón y de la fibra dietética, conservando parte de su actividad biológica tras el procesamiento. En este sentido, [10] señalaron que las pastas funcionales elaboradas con ingredientes ricos en polifenoles mantienen cantidades apreciables de estos compuestos y conservan una elevada capacidad antioxidante, lo que incrementa su valor nutracéutico.

Tabla 6. Compuestos bioactivos, capacidad antioxidante e inhibición enzimática en pastas de maíz nativo

Maíz	Fenoles (mg EAG)	Flavonoides (mg EQ)	ABTS (mg EAA)	ABTS (% inhibición)	α -amilasa (% inhibición)	α -glucosidasa (% inhibición)
Testigo	11.746 ^a	4.320 ^a	116.232 ^a	33.752 ^a	7.619 ^a	0.357 ^a
Amarillo	15.147 ^b	5.890 ^b	133.465 ^b	61.701 ^b	16.746 ^b	13.253 ^c
Villa	13.198 ^c	5.418 ^c	124.094 ^{bc}	42.167 ^b	15.833 ^b	1.507 ^d
Negro ancho	16.330 ^d	5.890 ^b	145.981 ^d	73.566 ^d	21.349 ^c	24.007 ^e

4.4 Inhibición de enzimas

La inhibición de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las pastas elaboradas con las distintas razas de maíz (tabla 6). La pasta elaborada con la raza Negro Ancho mostró los mayores porcentajes de inhibición frente a ambas enzimas, seguida por

las razas Villa y Amarillo, mientras que el híbrido comercial presentó la menor actividad inhibitoria.

La α -amilasa y la α -glucosidasa desempeñan un papel fundamental en la hidrólisis del almidón y en la liberación de glucosa durante la digestión [34]. La inhibición parcial de estas enzimas disminuye la velocidad de degradación de los carbohidratos complejos, lo que reduce el aumento de la glucosa en sangre tras las comidas. La mayor actividad inhibitoria observada en la pasta elaborada con la raza Negro Ancho probablemente se relaciona con su elevado contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, que fueron significativamente superiores a los de las demás variedades evaluadas. Diversos estudios han demostrado que estos metabolitos secundarios pueden interactuar con los sitios catalíticos de ambas enzimas provocando modificaciones conformacionales que reducen su actividad catalítica [35-38]. Estos resultados son coincidentes con [5] quienes encontraron que las razas mexicanas con mayor contenido de compuestos fenólicos presentaron también una mayor capacidad para inhibir la α -glucosidasa, reportando una correlación positiva entre la concentración de polifenoles y la actividad inhibitoria, sugiriendo que estos metabolitos constituyen los principales responsables del efecto hipoglucemiante observado en los extractos de maíz.

De manera similar, [39] demostraron que extractos ricos en polifenoles inhiben ambas enzimas de manera dependiente de la concentración, destacando que la eficacia inhibitoria aumenta a medida que aumenta el contenido de flavonoides y ácidos fenólicos. Aunque dicho estudio se realizó en extractos vegetales distintos del maíz, los mecanismos moleculares descritos son comparables y respaldan la interpretación de los resultados obtenidos en las pastas elaboradas con maíces nativos.

Es importante destacar que los porcentajes de inhibición obtenidos fueron inferiores a los reportados para inhibidores farmacológicos como la acarbosa, lo cual era de esperarse, dado que las pastas constituyen un alimento y no un medicamento. Sin embargo, una inhibición moderada de la α -amilasa y la α -glucosidasa puede representar una ventaja desde el punto de vista

nutricional, ya que contribuye a disminuir la velocidad de digestión del almidón sin provocar los efectos gastrointestinales frecuentemente asociados a inhibiciones excesivas de estas enzimas.

5. Conclusiones

Las razas de maíz nativo del estado de Hidalgo demostraron ser una materia prima de alto potencial para el desarrollo de pastas frescas, con propiedades nutraceuticas superiores a las obtenidas con un híbrido comercial. La incorporación de las razas nativas modificó significativamente la composición bromatológica, los parámetros colorimétricos, el contenido de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante del producto final.

Entre los materiales evaluados, la raza Negro Ancho destacó por presentar la mayor concentración de compuestos fenólicos y flavonoides, la mayor capacidad antioxidante y la mayor inhibición de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa, lo que evidencia su potencial para el desarrollo de alimentos con propiedades funcionales orientadas al control de la digestión de carbohidratos. Por su parte, la raza Villa mostró el mayor contenido de proteína y cenizas, mientras que la raza Amarillo presentó el mayor contenido de fibra, lo que demuestra que cada raza aporta atributos nutricionales específicos que pueden aprovecharse para diferentes aplicaciones alimentarias.

Los resultados obtenidos confirman que la utilización de maíces nativos no solo incrementa el valor funcional de las pastas, sino que también representa una estrategia para diversificar el aprovechamiento agroindustrial de estos recursos fitogenéticos, contribuyendo a la conservación de la agrobiodiversidad y a la generación de productos con identidad territorial y mayor valor agregado.

Finalmente, este estudio aporta evidencia científica que respalda el uso de razas nativas de maíz de Hidalgo como ingredientes en el desarrollo de alimentos funcionales. Se recomienda que investigaciones futuras evalúen la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de los compuestos fenólicos, el índice glucémico *in vitro* e *in vivo*, la aceptabilidad sensorial y el comportamiento tecnológico durante el almacenamiento, con el fin de consolidar su aplicación a escala industrial.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés

Referencias

- VÁZQUEZ, B.F.P., *El sistema de abastecimiento de semillas de maíz (Zea mays L.) y las perspectivas de las pequeñas empresas en México*. 2025, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.
- Guzmán, F.J.H., et al., *Caracterización de maíces nativos en Tulancingo*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2025. **16**(5): p. 12.
- Valencia-Hernández, L., et al., *Caracterización proximal de maíz cultivado con riego de agua residual y temporal*. Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 2025. **13**(25): p. 151-156.
- Tepixtle-Colohua, V.V., B. Reyes-Trejo, and A.L. Saucedo, *Compuestos químicos funcionales en el maíz morado (Zea mays): una revisión bibliográfica*. Acta botánica mexicana, 2025(132).
- López-Torres, C.A., et al., *Phenolic Profile, Antioxidant Capacity, and Alpha-Glucosidase Inhibitory Activity of High-Oil Corn Doubled-Haploid Hybrids from Mexico*. Molecules, 2026. **31**(10): p. 1654.
- Hernández-Villaseñor, L.A., et al., *Comparison of the Nutritional, Physicochemical, Technological-Functional, and Structural Properties and Antioxidant Compounds of Corn Kernel Flours from Native Mexican Maize Cultivated in Jalisco Highlands*. Crops, 2025. **5**(3): p. 26.
- Ramírez-Esparza, U., et al., *Development of a bioprocess to improve the phenolic compounds content and antioxidant capacity in blue corn grains*. Fermentation, 2025. **11**(3): p. 122.
- Rodríguez, M., *Evaluación de harina de amaranto como ingrediente antioxidante para la preparación de matrices alimentarias funcionales*. 2022, Universidad Nacional de La Plata.
- González Pérez, Y., *Análisis de la calidad nutrimental, compuestos bioactivos y tecnofuncional del maíz azul criollo de la región de Huaquechula, Puebla*.
- Melini, V., F. Melini, and R. Acquistucci, *Phenolic compounds and bioaccessibility thereof in functional pasta*. Antioxidants, 2020. **9**(4): p. 343.
- Aviles-Simental, D., et al., *Impact of Corn, Bean, and Semolina Flour Blends and Processing Methods on the Physical Properties and Antioxidant Activity of Instant Noodles*. Physchem, 2024. **4**(3): p. 356-368.
- Reyna, P.M., *Caracterización física, química, nutracéutica y propiedades tecnofuncionales de tres variedades de maíz (Zea mays) criollo pigmentado (blanco, amarillo y negro)*. 2023.
- Joshi, S., et al., *Quality protein maize: nutritional and bioactive composition, technological attributes and potential food applications*. International Journal of Food Science and Technology, 2022. **57**(9): p. 5600-5610.
- Caballero-Salinas, J.C., et al., *Morphological and agronomic evaluation of short-cycle native maize varieties (Zea mays L.)*. Agro Productividad, 2024.
- Baur, F.J. and L.G. Ensminger, *The association of official analytical chemists (AOAC)*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1977. **54**(4): p. 171-172.
- Peláez-Acero, A., et al., *Bioactive compounds and antibacterial activities in crystallized honey liquefied with ultrasound*. Ultrasonics Sonochemistry, 2021. **76**: p. 105619.
- Vi, S., *Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent*. Methods in Enzymology, 1999. **299**: p. 152-178.
- Azeem, M., et al., *Isolation, identification and quantification of phenolic acids, flavonoids and anthocyanins based on different particle fractions of purple-fleshed sweet potato flour for utilization as industrial applications*. Food Chemistry: X, 2025: p. 103410.
- Pimentel-Moral, S., et al., *Microwave-assisted extraction for Hibiscus sabdariffa bioactive compounds*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2018. **156**: p. 313-322.
- Núñez, R.Á., et al., *Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease*. Multiciencias, 2012. **12**(2): p. 129-135.
- Abirami, A., G. Nagarani, and P. Siddhuraju, *In vitro antioxidant, anti-diabetic, cholinesterase and tyrosinase inhibitory potential of fresh juice from Citrus hystrix and C. maxima fruits*. Food Science and Human Wellness, 2014. **3**(1): p. 16-25.
- Vilcacundo, R., C. Martínez-Villaluenga, and B. Hernández-Ledesma, *Release of dipeptidyl peptidase IV, α -amylase and α -glucosidase inhibitory peptides from quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) during in vitro simulated gastrointestinal digestion*. Journal of Functional Foods, 2017. **35**: p. 531-539.
- Gondi, M. and U. Prasada Rao, *Ethanol extract of mango (Mangifera indica L.) peel inhibits α -amylase and α -glucosidase activities, and ameliorates diabetes related biochemical parameters in streptozotocin (STZ)-induced diabetic rats*. Journal of food science and technology, 2015. **52**: p. 7883-7893.
- Pradeep, P. and Y.N. Sreerama, *Phenolic antioxidants of foxtail and little millet cultivars and their inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase activities*. Food Chemistry, 2018. **247**: p. 46-55.
- Anayansi, E.-A., et al., *La nixtamalización y su efecto en el contenido de antocianinas de maíces pigmentados, una revisión*. Revista fitotecnia mexicana, 2013. **36**(4): p. 429-437.
- Salinas Moreno, Y., et al., *Características fisicoquímicas y contenido de carotenoides en maíces (Zea mays L.) amarillos cultivados en el Estado de México*. Agricultura técnica en México, 2008. **34**(3): p. 357-364.
- Rodríguez Salinas, P.A., *Caracterización del contenido nutricional, compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de maíces pigmentados (Zea mays L.) nativos del sur de Nuevo León*. 2019, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Esparza, L.M.A., et al., *Propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de México*. Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación, 2024. **11**(1): p. 23-39.
- TRIGO-DENOMINACIONES-MASA, Y.P.D., et al., *Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-SALUD.-Secretaría de Salud*.
- Torres-Morales, B., et al., *Selección para contenido de aceite en el grano de variedades de maíz de la raza comiteco de Chiapas, México*. Agrociencia, 2010. **44**(6): p. 679-689.
- González-Cortés, N., et al., *Características y propiedades del maíz (Zea mays L.) criollo cultivado en Aguascalientes, México*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2016. **7**(3): p. 669-680.
- Cázares-Sánchez, E., et al., *Variación en la composición del grano entre poblaciones de maíz (Zea mays L.) nativas de Yucatán, México*. Agrociencia, 2015. **49**(1): p. 15-30.
- Martínez, R.M., et al., *Compuestos bioactivos y actividad antioxidante en poblaciones nativas de maíz pigmentado*. Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América, 2019. **44**(9): p. 549-556.
- Caro Vélez, C.A., *Obtención y caracterización de hidrolizados proteicos de Eisenia fetida con actividad inhibidora de enzimas amilolíticas y su aplicación en la digestión in vitro de productos alimentarios enriquecidos*. 2025.
- Monzón Daza, J.G., *Estudio metabólico de hojas de Passiflora ligularis y su relación con la actividad inhibitoria sobre α -amilasa y α -glucosidasa*.
- Lozada Díaz, Y.S., *Búsqueda de moléculas de origen natural con acción multidiana sobre enzimas pancreáticas digestivas: α -Glucosidasa, α -Amilasa y Lipasa pancreática*.
- Shehadeh, M.B., G.A. Suaifan, and A.M. Abu-Odeh, *Plants secondary metabolites as blood glucose-lowering molecules*. Molecules, 2021. **26**(14): p. 4333.

38. Das, S., et al., *Metabolomic and chemometric study of Achras sapota L. fruit extracts for identification of metabolites contributing to the inhibition of α -amylase and α -glucosidase*. European Food Research and Technology, 2016. **242**(5): p. 733-743.
39. Ćorković, I., et al., *Dietary polyphenols as natural inhibitors of α -amylase and α -glucosidase*. Life, 2022. **12**(11): p. 1692.