

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Parámetros Morfológicos y Fenoles Totales en Poblaciones de Maíz
Pigmentado (*Zea mays* L.)

Por:

ALONDRA VALENTINA ALVAREZ TENANGO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Parámetros Morfológicos y Fenoles Totales en Poblaciones de Maíz
Pigmentado (*Zea mays* L.)

Por:

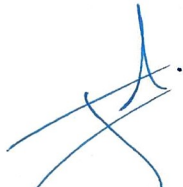
ALONDRA VALENTINA ALVAREZ TENANGO

TESIS

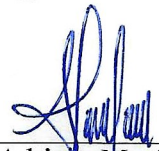
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



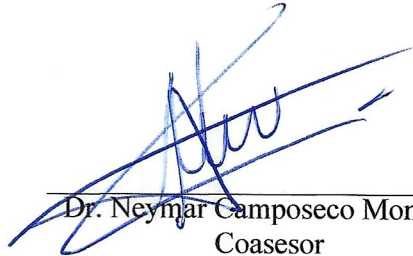
Dr. Josué Israel García López
Asesor Principal



Dra. Adriana Morfín Gutiérrez
Asesor Principal Externo



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dr. Neymar Camposeco Montejo
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reforma de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Alondra Valentina Alvarez Tenango

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por brindarme el tiempo y la vida indispensables para conseguir mi propósito, por siempre guiarme a cualquier lugar, por protegerme cuando me encontraba lejos de mi hogar y por darme las fuerzas para continuar avanzando.

A mi Alma Terra Mater

Por ser el espacio donde crecí no solo académicamente, sino también como persona. Por darme las herramientas, el conocimiento y sobre todo las oportunidades con las que logré alcanzar esta meta.

A mi asesor

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis asesores, Dr. Josué Israel García López y la Dra. Adriana Morfín Gutiérrez, por su invaluable apoyo, orientación y paciencia a lo largo de la realización de esta tesis. Su compromiso y dedicación han sido fundamentales en este proceso, brindándome no solo su conocimiento y experiencia, sino también su tiempo y esfuerzo para guiarme en cada etapa de este trabajo. Agradezco profundamente sus consejos, sugerencias y correcciones, que me han permitido mejorar y fortalecer este proyecto.

A mis padres

A mis queridos padres, Alondra Tenango Leana y Valentino Alvarez Acosta, quienes han sido mi mayor apoyo y fuente inagotable de amor y motivación. Gracias por cada sacrificio, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y la dedicación. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible. Este logro es suyo y mío, porque cada paso que he dado ha estado respaldado por su amor incondicional.

Con gratitud y aprecio

Valentina.

DEDICATORIA

A mis padres

Dedico esta tesis a mi madre Alondra Tenango Leana y a mi padre Valentino Alvarez Acosta dado que, sin ellos no hubiera llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida. Gracias por ser mi apoyo en cada paso de este largo camino, por su paciencia, consejos y la fé que tuvieron en mí. Cada página de esta tesis lleva consigo el fruto de su dedicación y entrega. Les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado. Espero que este trabajo sea un reflejo de su amor y del orgullo que siento de ser su hija.

A mis hermanas

Gracias por ser mi compañía en este viaje, por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado en cada etapa de mi vida. Sus palabras de aliento, su confianza en mí y su cariño han sido un motor que me ha impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Cada logro que alcanzo también es suyo, porque con su amor y apoyo han contribuido a que este sueño se haga realidad. Espero que este trabajo sea una pequeña muestra de lo mucho que valoro su presencia en mi vida y de cuánto las llevo en mi corazón.

A mi novio

A mi amado Carlos Rodrigo Arciniega, gracias por ser mi compañero en esta aventura, por siempre estar a mi lado animándome en los momentos más difíciles y celebrando cada pequeño logro conmigo. Por tu apoyo incondicional y por recordarme por qué inicié este camino. Este logro es tan tuyo como mío, porque sin ti no habría sido posible. Gracias por ser mi compañero, mi motivación y mi refugio. Te dedico este trabajo con todo mi corazón, esperando que sientas tanto orgullo como yo al ver lo que hemos logrado juntos.

A mis amistades

A mis queridos amigos y amigas, quienes han sido una parte fundamental de este viaje. Gracias por su compañía, por cada palabra de aliento, por los momentos de risa que aliviaron el estrés y por su apoyo incondicional en los momentos difíciles. Su amistad ha sido un pilar de fortaleza y motivación a lo largo de este camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hipótesis.....	2
1.2 Objetivo general	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Generalidades del maíz	3
2.1.1 Origen del maíz	3
2.2 Taxonomía del maíz.....	3
2.3 Parámetros morfológicos de la planta de maíz.....	4
2.3.1 Tallo.....	4
2.3.2 Hojas.....	4
2.3.3 Raíz.....	4
2.3.4 Flores	5
2.3.5 Fruto.....	5
2.3.6 Semilla.....	5
2.4 Estructura del grano de maíz.....	5
2.4.1 Pericarpio.....	6
2.4.2 Endospermo	6
2.4.3 Embrión	7
2.5 Etapas de desarrollo y crecimiento de la planta de maíz.....	7
2.6 Razas de maíces pigmentados	8
2.7 Propiedades nutricionales de maíz pigmentado	9
3. Importancia del maíz en México.....	9
3.1 Principales estados productores de maíz	10
4. Fenoles totales en plantas de maíz	10
4.1 ¿Qué son los polifenoles?.....	10
4.2 ¿Qué son las antocianinas?.....	11
4.3 Función de los metabolitos secundarios de las plantas	12

4.4 Ruta del ácido shikímico	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1 Material genético.....	14
3.2 Establecimiento del experimento	14
3.4 Variables de respuesta morfológicas.....	15
3.5 Muestra de grano para análisis nutracéuticos.....	16
3.6 Extracción y cuantificación de fenoles totales	16
3.7 Análisis estadístico.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1 Parámetros agronómicos	18
4.2 Comparación de medias para la altura de planta, mazorca y diámetro de tallo	18
4.3 Longitud y ancho de hoja	19
4.4 Rendimiento y contenido total de fenoles	20
5. CONCLUSIONES.....	23
6. LITERATURA CITADA	24

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos de poblaciones de maíz cultivado en invernadero.	18
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para rendimiento y contenido de fenoles totales en poblaciones de maíz cultivado en invernadero.	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen representativa de la estructura de una semilla de maíz.....	7
Figura 2. Principales estados productores de maíz.	10
Figura 3. Localización del invernadero dónde se estableció el experimento.	14
Figura 4. Croquis del experimento en invernadero.....	15
Figura 5. Altura de planta, mazorca y diámetro de tallo en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).	19
Figura 6. Longitud de hoja (a) y ancho de hoja (b) en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).	20_Toc191564190
Figura 7. Rendimiento (a) y contenido de fenoles totales (b) en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).	22

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de grano, algunos componentes morfológicos de la planta que están relacionados con el crecimiento y el contenido de fenoles totales en cuatro poblaciones de maíz. Todos los genotipos fueron cultivados durante el ciclo agrícola primavera-verano 2023, en condiciones de invernadero en suelo agrícola con una capa previa de lombricomposta. La siembra se realizó de forma manual en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones de 18 semillas por metro lineal, en cuatro camas de 12.80 m dividiéndose en parcelas de 1.60 cada una. En la etapa de madurez fisiológica se determinó la altura de planta (AP) y de mazorca (AM), diámetro de tallo (DT), longitud de hoja (LH), ancho de hoja (AH) y el rendimiento de grano por planta (g/planta). Además, los granos cosechados fueron utilizados para la cuantificación de fenoles totales (mg GAE/100 g). Los resultados indican que, para AP, la población 3 fue la que obtuvo el mejor registro, superando en promedio en 12.6% a las demás poblaciones. En cuanto AM, las poblaciones 3 y 4 destacan en este parámetro. Para DT la población 4 presentó un valor promedio superior del 16.4% en comparación con las demás poblaciones. En cuanto a la longitud de hoja, la población 2 presentó los mejores valores con 136 cm, superando en promedio 14.7 a las demás poblaciones. Para el ancho de la hoja, la población 4 resultó con 9.87 cm, superando en promedio en 9.6% al resto de las poblaciones. En cuanto al rendimiento, todas las poblaciones de maíz fueron estadísticamente iguales, mientras que para la concentración de fenoles totales se observó que todas las poblaciones fueron estadísticamente diferentes, la población 4 presentó la mayor concentración (1296.79 mg GAE kg⁻¹), superando en promedio de 24.4 % a las demás poblaciones. En general, estos resultados permiten identificar una variabilidad importante en cuanto a las respuestas agronómicas debido a la variabilidad genética entre poblaciones.

Palabras clave: *Zea mays* L., rendimiento, parámetros agronómicos, polifenoles.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los cultivos de mayor consumo en México es el maíz, el cual es considerado un cereal básico en nuestra alimentación, con productos derivados como las tortillas, botanas, tostadas, tamales, entre otros, que forman parte de nuestra dieta diaria (Bello-Pérez et al., 2016). Una de las razas de maíz poco explotadas son los maíces pigmentados, aquellos que presentan granos con coloración roja, morada, azul y negra. Este tipo de maíz presenta altos contenidos nutricionales e interesantes propiedades nutraceuticas (antioxidantes), que los hacen promisorios para la obtención de productos con mejores contenidos nutricionales (Hidalgo-Ramos et al., 2007). En México los principales estados productores de maíz pigmentado son Campeche, Chiapas, Jalisco, Chihuahua, Guerrero, Puebla y Michoacán y el Estado de México, con una producción que supera las 200 mil toneladas anuales. Sin embargo, la producción de cereales pigmentados apenas representa el 0.5 % de la producción total en México, siendo el maíz de color azul el más sobresaliente (INIFAP, 2020).

Recientemente, las variedades de maíz pigmentado han sido objetos de estudio debido a que presentan propiedades nutricionales y antioxidantes, que son atribuidas a sus altos contenidos en antocianinas, lo cual podría provocar un efecto benéfico para nuestra salud (Robles-Plata et al., 2023). López-Martínez, L.X., y col, realizaron un estudio para determinar el contenido de antocianinas en diferentes razas de maíz pigmentado y posteriormente lo compararon con maíz blanco, amarillo y naranja. En los resultados se observó que los fenotipos, blanco, amarillo y naranja mostraron los menores niveles de antocianina (1.54-70.2 mg), mientras que los maíces pigmentados presentaron valores de 93–851 mg para el color morado, 76–120 mg para el color negro y 85–154 mg para el rojo (Lopez-Martinez et al., 2009). Por otra parte, Martínez-Martínez, R., y col, determinaron el contenido fenólico total en maíz azul, rojo y amarillo, observando valores de 123.550 mg, 113.458 mg y 77.34 mg respectivamente (Martínez-Martínez & Chávez-Servia, 2015).

Debido a lo anterior, surge la necesidad de estudiar a los maíces pigmentados. Durante la realización de este trabajo de investigación se analizarán los parámetros morfológicos y fenoles totales para estas poblaciones de maíz, ya que algunos compuestos derivados de estos últimos son asociados a propiedades nutraceuticas, como son; las actividades antioxidantes, que proporcionan alimentos con funciones preventivas para enfermedades como el cáncer, la

diabetes, la obesidad y los trastornos neurodegenerativos (Maldonado-Astudillo et al., 2021) (Bañuelos-Pineda et al., 2018).

1.1 Hipótesis

H_i: Por la diversidad genética del maíz, se presentarán diferencias significativas en cuanto a los parámetros agronómicos y el contenido de fenoles totales entre las poblaciones en estudio.

H₀: No existen diferencias entre poblaciones en los parámetros agronómicos y el contenido de fenoles totales entre las poblaciones evaluadas.

1.2 Objetivo general

Determinar el crecimiento de componentes morfológicos y la concentración de fenoles totales (mg GAE/100 g) en poblaciones de maíz.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del maíz

2.1.1 Origen del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta de la familia Poaceae o Graminae. Los primeros habitantes mesoamericanos domesticaron el teocintle y los pastos con características similares al maíz, generando el cultivo de maíz. La domesticación del maíz inicio hace aproximadamente 10,000 años y actualmente es un proceso que continua mediante el manejo y selección de variedades nativas por parte de los agricultores. A nivel mundial, México ha sido considerado como el centro de origen y de diversificación del maíz, debido a que la mayor diversidad de maíz se encuentra en nuestro país. Además, los teocintles, maicillos y gramíneas continúan evolucionando constantemente, por lo que México cuenta con gran diversidad genética y fenotípica de esta planta, lo que es esencial para su supervivencia y adaptabilidad (CONABIO, 2020).

2.2 Taxonomía del maíz

El maíz es uno de los granos alimenticios con mayor antigüedad y es la única especie que se cultiva de su género. Otras especies del género *Zea* y subespecies, como el caso del teocintle solo son utilizadas como pastos (Orellana y Dardón, 2022).

La clasificación taxonómica del maíz es:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Zea*

2.3 Morfología de la planta de maíz

Las plantas nos ofrecen una infinidad de formas particulares, por lo que en esta sección conoceremos específicamente la morfología de una planta de maíz.

2.3.1 Tallo

La planta de maíz posee un tallo simple, erecto, con escasas ramificaciones o macollos, tiene entrenudos, nudos y médula esponjosa, puede alcanzar una longitud de 1 a 5 metros (Kato et al., 2009). El tallo puede ser de color claro e incluso de color morado. Crece por medio del desarrollo del coleóptilo. Los entrenudos inician a elongarse de manera acelerada y entran a una etapa de crecimiento y elongación acelerados (Ávila-Miramontes et al., 2014).

2.3.2 Hojas

Las hojas son lanceoladas y nacen alternamente en los nudos a lo largo del tallo, se enlazan al tallo por medio de una vaina que rodea el entrenudo y la yema floral es cubierta. El tamaño y ancho de las hojas varía en función de las condiciones climáticas (Kato et al., 2009).

2.3.3 Raíz

La planta de maíz se compone principalmente de dos tipos de raíz; la raíz primaria (fibrosas), y la raíz secundaria (adventicias) (Kato et al., 2009). Las raíces primarias crecen por medio de la radícula de la semilla y dejan de crecer cuando la plúmula rompe la superficie del suelo. Mientras que las adventicias crecen por medio del primer nudo exactamente en el extremo del mesocotilo, alcanzando un total entre siete y diez nudos debajo de la superficie del suelo. Las adventicias tienen como función la fijación y absorción de agua y nutrientes. Además, las raíces adventicias y seminales conforman aproximadamente el 52% de la masa total de las raíces de la planta de maíz. Ambas raíces le brindan soporte y fijación al suelo a la planta de maíz (Paliwal, 2001).

2.3.4 Flores

El maíz es una planta monoica que consta de dos tipos de inflorescencia; la primera de ellas es la inflorescencia masculina, que se conoce como panícula (o espiga) con tonalidad roja, morada, verde y amarilla. La segunda es la inflorescencia femenina, conocida como mazorca (Kato et al., 2009), que se desarrolla desde las yemas apicales dentro de las axilas de las hojas, cubierta con 12 a 14 hojas modificadas. La caña que detiene a la mazorca posee nudos e internudos pequeños que cambian de tamaño en función del tipo de maíz. Cuando la mazorca presenta ramificaciones laterales, tiene un carácter no deseable. Por otro lado, la panoja tiene una forma ramificada y está compuesta por la espiga central, esta crece en la zona de crecimiento apical, justo en la parte más alta de la planta. Esta espiga alcanza un aproximado de 30 o 40 espiguillas (Ávila-Miramontes et al., 2014).

2.3.5 Fruto

El grano de maíz es propiamente el fruto en una planta de maíz. Un grano está formado por un pericarpio, que se refiere a una capa de células que están pegadas al endospermo, conocida como capa de aleuronas, el endospermo abarca la parte más grande del grano y es considerado un tejido de reserva formado por una gran cantidad de células con granos de almidón. Existen diferentes tipos de granos de maíz, dependiendo de su forma, tamaño, consistencia y color (Ávila-Miramontes et al., 2014).

2.3.6 Semilla

Cariópside individual que es incorporado en el raquis cilíndrico u olote, compuesto por estructuras pericarpio, endospermo y embrión (Kato et al., 2009).

2.4 Estructura del grano de maíz

El grano de maíz está formado principalmente por tres partes comestibles: el salvado, el endospermo y el germen. El salvado (pericarpio) es una de tantas capas superficiales comestibles que posee el grano, está enriquecido con fibra, antioxidantes, vitaminas B,

minerales como zinc, hierro, magnesio y compuestos fitoquímicos. El germen representa el núcleo de la semilla, en el cual sucede el desarrollo. Proporciona lípidos, vitamina E, vitaminas B, antioxidantes y fitoquímicos. Finalmente, el endospermo consiste en la parte más grande del grano e incluye carbohidratos, proteínas y muy poco de vitaminas y minerales (CIMMYT, 2020). La estructura del grano será descrita a mayor detalle a continuación.

2.4.1 Pericarpio

El pericarpio representa la capa externa del grano, aporta el 5-6% del peso total del grano y resiste el vapor y el agua. Está formado por cuatro partes delgadas:

- *Epicarpio*. Es la envoltura superficial del grano y está constituida de células con paredes gruesas.
- *Mesocarpio*. Formada por capas con escasas células, donde la capa externa tiene pared gruesa y la interna es pared plana.
- *Células cruzadas*. Capas de células con pared delgada y con varios espacios intercelulares.
- *Células tubulares*. Capas de células alargadas y paralelas.

2.4.2 Endospermo

El endospermo tiene la mayor parte del peso total del grano seco, contando con un 80-82% en peso para la mayoría de las clases de maíz, suministrando almidón y proteína para que germine la semilla. El principal uso del almidón es para elaborar edulcorantes, bioplásticos, entre otros productos. El endospermo es formado por tres clases de células:

- *Capa de aleurona*. Constituida por una célula y contiene proteínas, aceites, minerales y vitaminas.
- *Endospermo corneo*. Integrado por células largas que tienen apariencia irregular.
- *Endospermo harinoso*. Se encuentra en el centro del grano y está formado por células grandes.

2.4.3 Embrión

El embrión conocido como germen, representa entre el 8 y el 12% del peso total del grano. Un embrión está formado por el escutelo y el eje embrionario. El *escutelo* le proporciona alimento durante el proceso de germinación. Mientras que el *eje embrionario* cuenta con dos estructuras principales, la plúmula que tiene de 5 a 6 hojas y da nacimiento a un brote, y la radícula, que corresponde a la raíz principal que emerge en el proceso de germinación de la semilla y ayuda a la captación inicial de agua y nutrientes que se encuentran en el suelo (Martínez y Jiménez, 2023).

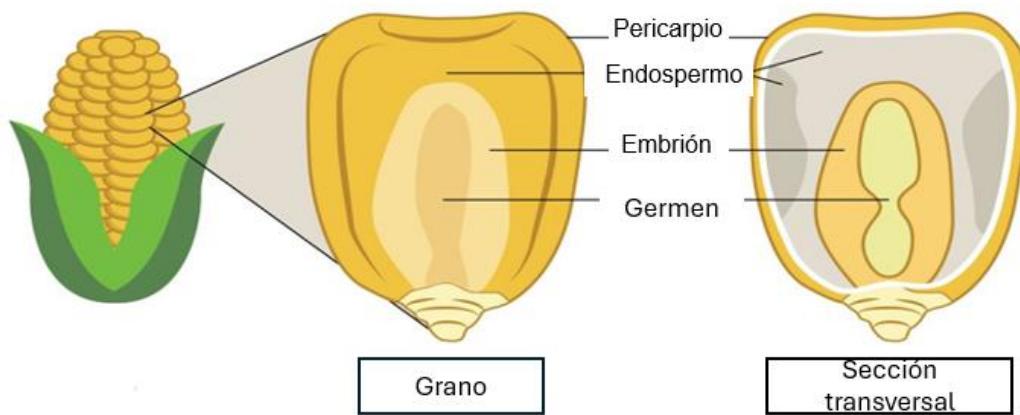


Figura 1. Imagen representativa de la estructura de una semilla de maíz.

2.5 Etapas de crecimiento y desarrollo de la planta de maíz

Los investigadores del maíz elaboraron una guía para la normalización de las definiciones, en donde para distinguir las distintas etapas del desarrollo de la planta de maíz. Ellos asumen que el cultivo llega a un ciclo en donde, por lo menos, el 50% de plantas presentan las características que les corresponden, debido a que no todas las plantas en el campo alcanzan su etapa en específico, al mismo tiempo. Los investigadores comparan la fenología del maíz en diferentes condiciones ambientales y de tratamientos experimentales. Las etapas de crecimiento se dividen en dos tipos: vegetativa (V) y reproductiva (R).

Estas etapas de crecimiento se organizan en cuatro períodos:

Crecimiento de las plántulas (etapas VE y V1). En la etapa VE, el coleóptilo emerge y rompe la superficie del suelo, mientras que en V1 se distingue el cuello de la primera hoja verdadera. Crecimiento vegetativo (etapas V2, V3... Vn). En la etapa V2 y V3, la planta sigue su desarrollo foliar e incrementa su capacidad fotosintética. En la etapa Vn se distingue la hoja número “n” y un total de hojas que varía entre 16 y 22.

Floración y fecundación (etapas VT, R0, y R1). En la etapa VT se observa completamente la última rama de la panícula. En R0 inicia la floración masculina y el polen se libera. Para la etapa R1 los estigmas son visibles. Llenado de grano y la madurez (etapas R2 a R6). En la etapa R2 (de ampolla) los granos se llenan de un líquido claro y se alcanza a distinguir el embrión. En la etapa R3 (lechosa), los granos se llenan de líquido lechoso. En la etapa R4 (masosa) los granos se llenan de pasta blanca y el embrión posee la mitad del ancho del grano. En la etapa R5 (dentada), la parte superior del grano se llena de almidón sólido y los granos toman forma dentada debido a que su genotipo es dentado. Observando el grano desde el costado, se distingue una visible “línea de leche”, lo que indica que son granos cristalinos y dentados. Por último, la etapa R6 es la madurez fisiológica, donde se observa una capa negra en la base del grano (CIBIOGEM, 2013).

2.6 Razas de maíces pigmentados

Los conceptos de raza y categoría son útiles para entender la variación del maíz, organizar el material en colecciones de bancos de germoplasma y su uso en el mejoramiento genético (CONABIO, 2020). El maíz cuenta amplia diversidad en algunas características, como son; el color del grano, textura, composición y apariencia. Además, se puede clasificar en diferentes tipos: constitución del endospermo y del grano, color del grano, ambiente en el que se cultiva, madurez y uso (Paliwal, 2001). Los maíces pigmentados cuentan con gran diversidad de usos, debido a sus propiedades físicas. En los estados de Chiapas, Oaxaca y el Estado de México, se encuentran las razas de maíces pigmentados: Olotillo, Tehua, Olotón, Tepecintle, Vandeño, Zapalote Chico y Grande, Bolita, Mushito y Tuxpeño, pero no se cuenta con estadísticas sobre su producción (Bello-Pérez et al.,2016).

2.7 Propiedades nutricionales de maíz pigmentado

Según Bello et al. (2016), menciona que en las propiedades nutricionales del maíz pigmentado azul y negro aportan de 8.2 a 9.4% de proteínas mientras que en el estado de Oaxaca las razas de maíces pigmentados que son sometidos a climas tropicales obtienen de 9.5 a 10.4% y 10.1 a 10.6 en climas subtropicales. Los lípidos que contiene el grano de maíz son de 5% y se ubican en el germen del grano. En los pigmentados su contenido va de 3.7 a 5% y en el caso del maíz azul solo se cuenta con 0.52%. El contenido de minerales en maíces pigmentados es de 1 a 2% y se encuentra la mayor parte en el germen del grano. Los carbohidratos componen la mayor parte del grano de maíz, en los pigmentados oscilan entre los 76 a 84 %. El almidón es el principal carbohidrato del maíz, se crea por la amilosa y la amilopectina, entonces el almidón de los maíces pigmentados tiene 20 % de amilosa, pero se cuenta con razas que tiene el 13%, lo que significa que hay diferencia en las organizaciones de estos dos componentes en el granulo de almidón y por ende se tiene diferencias en sus propiedades nutricionales. Sin embargo, aunque se cuente con una gran diversidad de razas de maíces pigmentados, se tienen pocos estudios realizados en cuanto a sus características del almidón, por ello se necesita investigar para fortalecer sus usos y aplicaciones.

3. Importancia del maíz en México

El maíz es uno de los principales cereales a nivel mundial, debido a su alto valor nutricional. Particularmente en México, es la base de diversos alimentos, siendo su uso mismo una tradición en nuestro país, por lo que el maíz es considerado como parte fundamental de nuestras tradiciones, cultura y economía. A nivel mundial México ocupa el octavo lugar en la producción de este cereal, con un valor estimado de 27 millones de toneladas. Además, en México se encuentra la mayor diversidad de especies de maíz (alrededor de 60 razas), lo que lo convierte en un centro de origen de este mismo (SADER, 2021).

En México, el maíz es uno de los cereales mayormente utilizado en nuestra dieta diaria, debido a su importancia histórica, cultural y nutricional. De acuerdo con los reportes de CONABIO el consumo promedio de maíz por persona es de 350 g diarios, resaltando el principal uso en tortillas y en más de 600 variedades de platillos. La gran mayoría de alimentos preparados con este grano requieren de maíz nixtamalizado, esto con la finalidad de mejorar la calidad

nutricional (obtención de la vitamina B3) y promover la formación de almidón resistente, beneficiando la digestión y el microbiota intestinal (CONABIO, 2020).

3.1 Principales estados productores de maíz

Actualmente el consumo anual de maíz por persona tiene un valor estimado de 196.4 kg, con un consumo en el año 2020 de 19.035 millones de toneladas. Por tal motivo, el desafío constante para garantizar la seguridad alimentaria en México ha tenido gran relevancia a través de los años (Portillo-Vázquez, et al.,2023). En México existen 64 razas de maíz con una amplia variedad de colores, incluyendo tonalidades rojas, negras y azules, aunque la mayor producción corresponde al maíz blanco y amarillo. En el año 2017, los estados de Sinaloa, Jalisco, México y Michoacán produjeron aproximadamente el 54.5% del maíz blanco del país. Mientras que México y Chiapas presentó una producción de maíz pigmentado de 59%. Por otra parte, Chihuahua, Jalisco y Tamaulipas concentraron el 80% del maíz amarillo (SIAP, 2018).



Figura 2. Principales estados productores de maíz.

4. Fenoles totales en plantas de maíz

4.1 ¿Qué son los polifenoles?

Los polifenoles son compuestos bioactivos que se encargan de dar tonalidad, olor, sabor y textura a los alimentos vegetales, estos compuestos cuentan con propiedades vasodilatadoras,

antitrombóticas, antiinflamatorias, antilipémicas, antiaterogénicas, antiapópticas, cardioprotectoras y antioxidantes, que son benéficas para la salud. Los polifenoles cuentan con una amplia familia de metabolitos de origen vegetal con uno o varios grupos hidroxilos (OH) que son unidos a uno o más anillos aromáticos. Los polifenoles se dividen en cinco tipos o familias: flavonoides, ácidos fenólicos, lignanos, estilbenos y otros polifenoles. El contenido de polifenoles en plantas y frutos dependen del genotipo, especie, condiciones ambientales, grado de madurez, composición del suelo, ubicación geográfica y condiciones de almacenamiento. De acuerdo con reportes, Yucatán es el estado con menor consumo de polifenoles totales en México (Marín-Canul et al., 2023).

4.2 ¿Qué son las antocianinas?

Las antocianinas son compuestos polifenólicos naturales. Existen 12 tipos de antocianinas, siendo las más importantes la cianidina, delphinidina, pelargonidina, peonidina, malvidina y petunidina (De la Rosa et al., 2022). El maíz es considerado como una fuente principal de antocianinas, por lo que son importantes las variedades de maíz productivas para el contenido de antocianinas y la producción de grano. Algunas de las investigaciones realizadas sobre el contenido de antocianinas en el maíz para poblaciones nativas, razas y materiales mejorados demuestran que las razas nativas presentan el mayor contenido de pigmentos (Mendoza-Mendoza et al., 2017). Sin embargo, presentan bajo rendimiento de grano y alta susceptibilidad a enfermedades.

En las regiones centrales de México, las variedades de maíz pigmentado que se consumen con mayor frecuencia son las tonalidades azul, rojo, morado y negro, debido a su contenido de antocianinas en su pericarpio y la capa de aleurona. Estas antocianinas les proporcionan una coloración que los caracteriza, además; poseen propiedades beneficiosas para la salud, ya que ayudan a la prevención de algunas enfermedades como el cáncer, debido a que cuentan con propiedades antioxidantes (debido a sus metabolitos secundarios), que atrapan a los radicales libres en el torrente sanguíneo, lo cual está relacionado con el crecimiento del cáncer. También su elevado contenido en antocianinas hace que el maíz pigmentado cuente con propiedades nutraceuticas (Bello-Pérez et al., 2016).

4.3 Función de los metabolitos secundarios de las plantas

Un metabolito secundario es un compuesto orgánico producido por la planta y que no tiene una función importante en su crecimiento y desarrollo. Estos metabolitos están relacionados con interacciones ecológicas entre el medio ambiente y las plantas. Básicamente se encargan de defender a la planta de sus depredadores y patógenos, actuando como atrayentes o repelentes de animales (Camacho-Escobar et al.,2020). Existen más de 50,000 metabolitos secundarios en las plantas, los cuales son clasificados de acuerdo con su diversidad de estructuras, funciones y biosíntesis. Los metabolitos secundarios pueden ser clasificados en tres clases químicas (Lustre Sánchez, 2022):

- 1) Terpenoides, que son aquellos compuestos que les proporcionan aroma y sabor a las plantas; su función es ayudar a las plantas a que se comuniquen químicamente entre ellas mismas.
- 2) Alcaloides, son compuestos naturales que alejan a las plantas de los herbívoros, su función es producir un sabor amargo en las plantas para evitar ser alimento de animales.
- 3) Fenólicos, son compuestos que protegen a las plantas de otros organismos y les dan colores llamativos para la polinización y dispersión de semillas. Estos compuestos se dividen en tres (Lustre Sánchez, 2022):

- Los ácidos fenólicos, que defienden a la planta de las bacterias y participan en el desarrollo y supervivencia de la planta.
- Los flavonoides que protegen a las plantas de los rayos ultravioleta, hongos y bacterias.
- Los taninos que protegen a las plantas de organismos que pueden llegar a causar enfermedades.

4.4 Ruta del ácido shikímico

La mayor parte de los compuestos aromáticos de las plantas provienen del metabolismo del ácido shikímico; varias de estas sustancias son los fenoles. Los compuestos que provienen de esta ruta se modifican y se consideran por debajo de otros tipos de metabolitos secundarios de las plantas. La mayoría de los compuestos secundarios se derivan de cuatro aminoácidos aromáticos: fenilalanina, tirosina, ácido antranílico y triptófano. Los compuestos aromáticos que nacen de la ruta del ácido shikímico se distinguen de los que provienen de otros orígenes debido a sus patrones de sustitución y los compuestos con los que coexisten. La ruta del ácido

shikímico se divide en tres partes: la condensación de eritrosa-4-fosfato y fosfoenolpiruvato y la posterior ciclización y producción de ácido shikímico, alteración de shikimato-3-fostato a ácido corísmico y la conversión de carismato en otros productos. La ruta del ácido shikímico podría nombrarse la ruta del ácido corísmico, debido a que es el compuesto clave intermediario y un punto de ramificación para la gran parte de compuestos secundarios que se generan en las plantas (Seigler, 1998).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Germoplasma utilizado

Las semillas de las poblaciones de maíz pigmentado (azul/morado) en estudio pertenecen al Programa de Producción de Granos y Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Todos los genotipos fueron cultivados durante el ciclo agrícola primavera-verano 2023, en condiciones de invernadero localizado a 25° 21' 29" Latitud N, 101° 02' 21" Longitud O, a una altitud de 1742 m s.n.m (Google Earth, 2025)., con una precipitación media anual de 350-400 mm y una temperatura media anual de 27.8 °C. En la Figura 3, se presenta la localización del invernadero dónde se estableció el experimento.



Figura 3. Localización del invernadero dónde se estableció el experimento.

3.2 Establecimiento del experimento

El cultivo en invernadero se estableció en suelo agrícola con una capa previa de lombricomposta, la cual sirvió como abono orgánico en las etapas iniciales de crecimiento del cultivo. El riego se estableció por cintilla, con una aplicación de tres riegos por semana y el control de malezas se realizó de forma manual. La fertilización de fondo se aplicó con una

formulación N20-P20-K20 y N20-P30-K10 más micronutrientes, aplicando 20 días después de la emergencia de la plántula, y una segunda aplicación, previo a la etapa de floración y llenado de grano, además aplicaciones foliares de humus de lombriz.

3.3 Distribución de parcelas experimentales

La siembra se realizó de forma manual en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones de 18 semillas por metro lineal, en cuatro camas de 12.80 m dividiéndose en parcelas de 1.60 cada una, el croquis se muestra en la Figura 4.

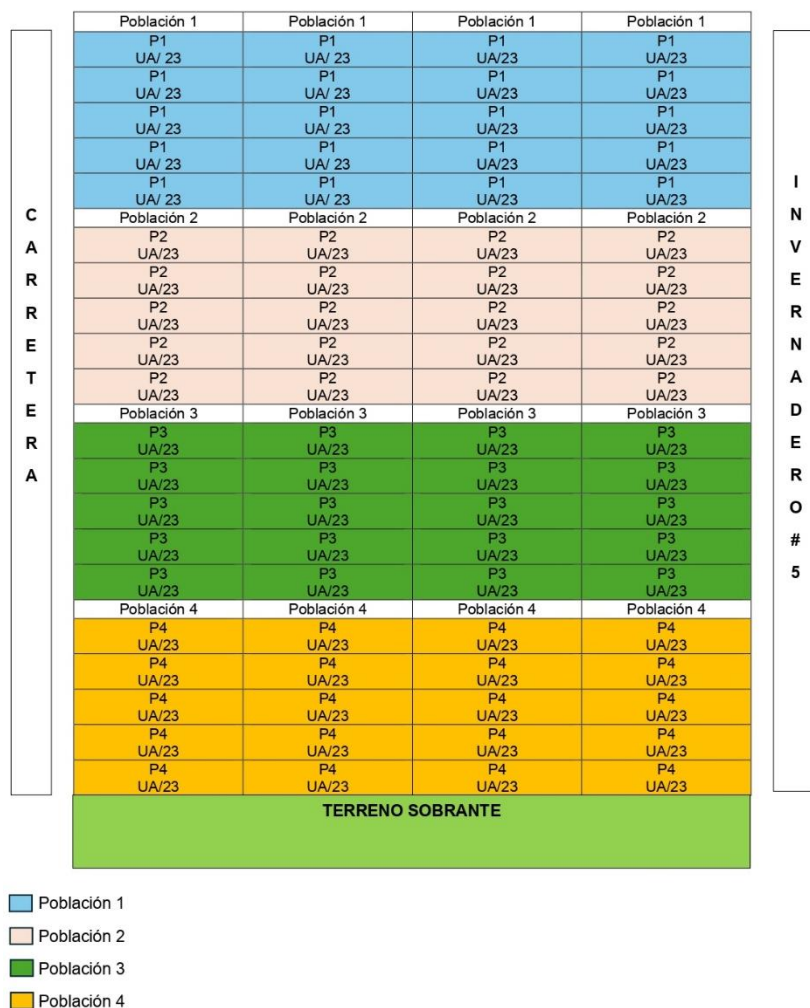


Figura 4. Croquis del experimento en invernadero.

3.4 Variables de respuesta morfológicas

Longitud y anchura de la hoja: se midió de la parte central de la planta en correspondencia con el número de hojas estudiadas (cm) con regla graduada de precisión ± 0.1 mm.

Altura de planta (AP) y de mazorca (AM): Cuando la planta alcanzó la madurez fisiológica final se midió desde la base del tallo hasta el ápice de la espiga con una regla graduada, tomando tres plantas al azar en competencia completa, las cuales se midieron desde la base del tallo, hasta la parte superior de la espiga, reportándose en centímetros (cm). Para la altura de mazorca, se determinó la distancia en metros desde la superficie del suelo al punto superior de la espiga, altura de mazorca.

Diámetro de tallo (cm): En la etapa de madurez fisiológica el diámetro del tallo (DT), se midió en milímetros (mm) con ayuda de un Vernier.

Rendimiento de grano por planta (RGP): Se trillaron tres mazorcas por población y se determinó el promedio, expresándose en gramos por planta (g pl^{-1}), para lo cual se utilizó una balanza analítica.

3.5 Muestra de grano para análisis nutraceuticos

Las mazorcas fueron trilladas, después se agruparon y finalmente se mezclaron dentro de una bolsa de papel (pool); teniendo cada una un peso aproximado de 200 a 300 g. Del peso total del pool, un 50% del grano se conservó para reserva y el otro 50% fue utilizado para realizar los análisis funcionales.

3.6 Extracción y cuantificación de fenoles totales

La extracción de compuestos fenólicos libres se realizó de acuerdo con Rodríguez-Salinas et al. (2020). Para la extracción, se pesaron 200 mg de muestra de harina de maíz, los cuales fueron suspendidos con 4 mL de metanol al 80%, se purgaron durante 30 s con argón y se agitaron durante 2 h a 200 rpm, en oscuridad. Después, las muestras se centrifugaron a 5000 rpm durante 5 min y el sobrenadante fue recuperado y almacenado a -20 °C hasta su análisis. Para la determinación del contenido de fenoles totales, se tomaron 0.2 mL de cada extracto y se agregaron 2.6 mL de agua destilada y 0.2 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu. Después de 5

min, se agregaron 2 mL de Na_2CO_3 al 7% y la solución se agitó durante 30 s, para luego llevar la reacción en oscuridad por 90 min, posteriormente se midió la absorbancia de las muestras a 750 nm. La concentración de fenoles se reportó en miligramos equivalente de ácido gálico por cien gramos de muestra (mgGAE/100 g), calculado a partir de la curva de calibración de ácido gálico de 0 a 200 mg L⁻¹.

3.7 Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones; el modelo lineal general fue $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$, donde la variable de respuesta es Y_{ij} , μ el promedio general, α_i el efecto de las poblaciones de maíz y e_{ij} el error experimental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Parámetros agronómicos

Los resultados indican que los diferentes parámetros agronómicos evaluados presentaron diferencias significativas (Cuadro 1). Los resultados obtenidos en el ANOVA, posiblemente se deben a la variabilidad genética de las poblaciones en estudio.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para algunos parámetros agronómicos de poblaciones de maíz cultivado en invernadero.

FV	GL	AP (m)	AM (m)	DT (mm)	LH (cm)	AH (cm)
Tratamientos	3	1.53**	0.43*	159.80**	0.25*	5.94*
Error	12	0.10	0.09	15.55	0.05	2.03
CV%		9.76	15.68	13.52	21.21	15.56

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; DT= Diámetro de tallo; LH= Longitud de hoja; AH= Ancho de hoja.

4.2 Comparación de medias para la altura de planta, mazorca y diámetro de tallo

Para AP, la población 3 fue la que obtuvo el mejor registro, superando en promedio en 12.6% a las demás poblaciones (Figura 4). En cuanto AM, las poblaciones 3 y 4 destacan en este parámetro, a excepción de la población 4 que fue la que presentó el valor más inferior. Para DT la población 4 presentó el valor mayor, con un valor promedio superior del 16.4% en comparación con las demás poblaciones. Los resultados de este estudio para AP, son superiores a los valores reportados en maíces cultivados en el sureste de México, donde informan valores que van en un rango de 1.95 a 2.70 m. En el caso de AM, los valores obtenidos en este estudio también son superiores con valores promedio de 1.98 m, mientras que ellos informan valores en un rango de 95.2 a 1.74 m (Conceição dos Santos et al., 2019). Otro estudio en maíces nativos reportó valores de 258.1 y 149.8 cm en altura planta y mazorca, respectivamente (Toxtle-Flores et al 2023).

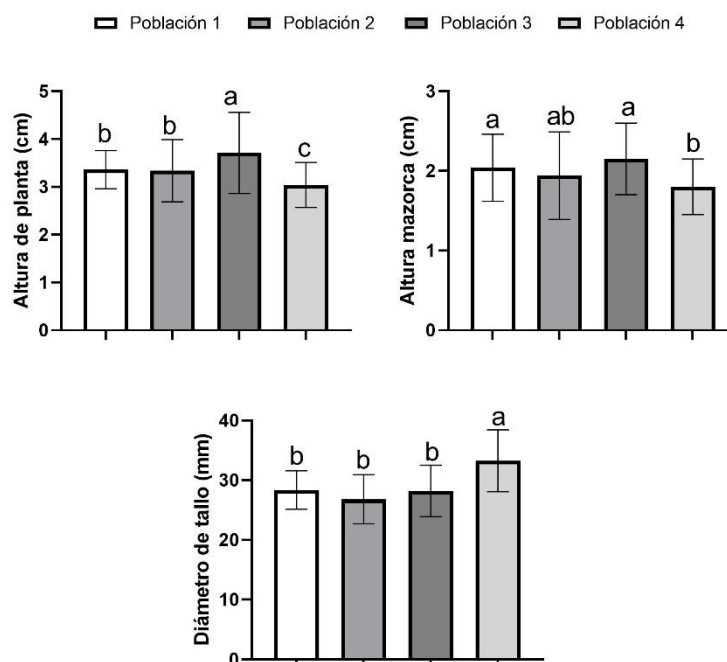


Figura 5. Altura de planta, mazorca y diámetro de tallo en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

La determinación de la altura de planta y de mazorca son de gran utilidad en las prácticas agronómicas para el cultivo de maíz, ya que pueden ser características deseables en las plantas a fin de facilitar la cosecha, la altura de mazorca recomendada en plantas de maíz es de 1 a 1.5 m (Hernández y Esquivel, 2004). La altura de la mazorca y crecimiento de la planta de maíz son parámetros de gran importancia para explicar la diversidad entre las poblaciones de maíz (Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010), lo que indica que en este estudio existe una gran diversidad genética entre las poblaciones.

4.3 Longitud y ancho de hoja

En cuanto a la longitud de hoja, la población 2 presentó los mejores valores con 136 cm, superando en promedio 14.7 a las demás poblaciones (Figura 5a). Para el ancho de la hoja, la población 4 resultó con 9.87, superando en promedio en 9.6% al resto de las poblaciones. En

un estudio en poblaciones de maíz rojo los valores promedio de la longitud y ancho de hoja fueron de 96.3 y 8.3 cm, respectivamente, los cuales son inferiores a los obtenidos en este estudio. En poblaciones de maíz, dentro de las variables con mayor influencia para explicar la variación observada se encuentran el número de hojas arriba de la mazorca y área de la hoja de la mazorca (Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010).

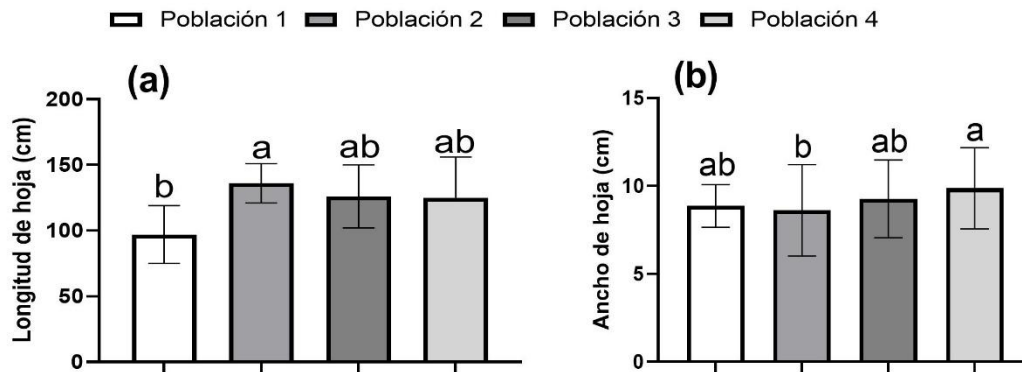


Figura 6. Longitud de hoja (a) y ancho de hoja (b) en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias (n = 5). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

4.4 Rendimiento y contenido total de fenoles

Los resultados de rendimiento y contenido de fenoles totales indican que las poblaciones solamente son estadísticamente diferentes en cuanto a la concentración de nutraceuticos en los granos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para rendimiento y contenido de fenoles totales en poblaciones de maíz cultivado en invernadero.

FV	GL	Rendimiento (g/planta)	Fenoles totales (mg GAE kg ⁻¹)
Tratamientos	3	1421.26	114079.71**
Error	12	897.86	2230.05
CV%		19.91	4.45

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; DT= Diámetro de tallo; LH= Longitud de hoja; AH= Ancho de hoja.

En cuanto al rendimiento, solamente se presentaron diferencias numéricas entre las poblaciones, dónde destaca la población 4 con 173.81 g/planta (Figura 6). Para el rendimiento, nuestros resultados son superiores a los informados por Alvarado et al. (2016), quienes informan rendimientos en g/planta en un rango de 69.8 a 130.3. El rendimiento de grano depende del número de granos por planta y en menor magnitud del peso individual del grano (Maddoni y Otegui, 2006). Además, el rendimiento de cultivo del maíz depende de la genética, el tamaño en el área foliar, el índice de área foliar que es ocasionado por la presencia del mayor número de hojas por unidad de superficie (Olalde-Gutiérrez et al., 2000).

Para la concentración de fenoles totales se observa que todas las poblaciones fueron estadísticamente diferentes, la población 4 presenta la mayor concentración (1296.79 mg GAE kg⁻¹), superando en promedio de 24.4 % a las demás poblaciones (Figura 6). Los resultados de fenoles totales obtenidos en esta investigación concuerdan con los reportados por Guzmán-Gerónimo et al. (2017) y Khamphan et al. (2018), quienes informaron valores promedio de 203.2 a 2,261.66 mg GAE/100 g en granos pigmentados de maíces pigmentados. Los maíces pigmentados se les atribuyen importantes propiedades fitoquímicas, entre estas destacan pigmentos de naturaleza fenólica asociados al maíz, que incluyen a las antocianinas y los carotenoides (Bello-Pérez et al., 2016).

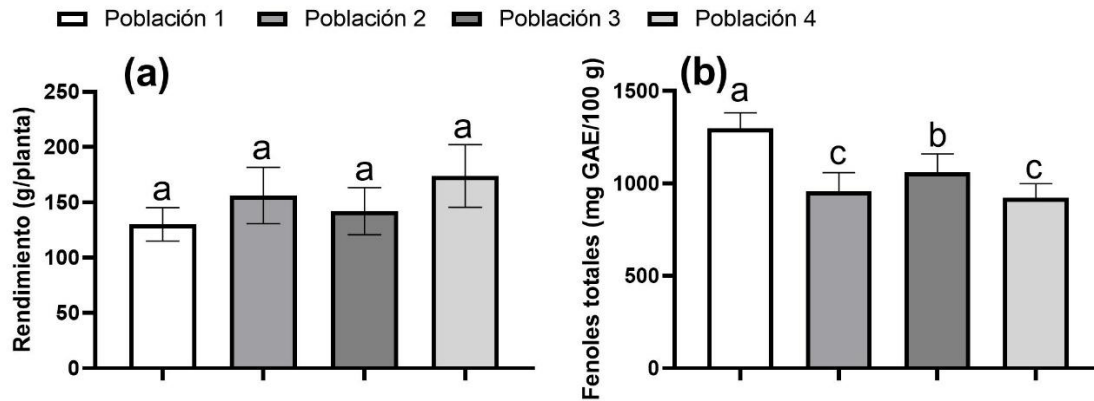


Figura 7. Rendimiento (a) y contenido de fenoles totales (b) en poblaciones de maíz cultivadas en condiciones de invernadero. Los valores son el promedio de cinco repeticiones, medias ($n = 5$). Las barras representan la desviación estándar de la media. Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los maíces ricos en antocianinas, son considerados como nutraceuticos debido al efecto preventivo de estos pigmentos contra el estrés oxidativo, las enfermedades crónico degenerativas y el cáncer (Paulsmeyer et al., 2017; Graillet et al., 2019). Las antocianinas son muy importantes porque tienen propiedades nutraceuticas y antioxidantes que contrarresta los radicales libres responsables de causar la oxidación de membranas y daño al ADN (Serna Saldívar et al., 2013). En los maíces no solo las antocianinas del grano tienen función antioxidante, hay un grupo más amplio de sustancias que están presentes en los maíces pigmentados y que son benéficas para los seres humanos. Entre estos compuestos fitoquímicos se encuentran diferentes compuestos polifenólicos, como son: ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y taninos condensados con alto poder antioxidante (Serna Saldívar et al; 2013; Urias-Lugo et al., 2015).

Es por esto que es de relevancia generar información y documentar la composición química de los diversos genotipos de maíz que se cultivan en sureste de Coahuila, y de esta manera aprovechar sus aportaciones nutricionales y nutraceuticos en la dieta humana.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten identificar una amplia variabilidad genética en cuanto a los parámetros agronómicos y nutraceuticos evaluados. Para la AP, AM y ancho de la hoja la población 4 presentó los valores más elevados, lo que resultó en un mayor rendimiento. Por el contrario, la población 4 obtuvo la menor concentración en el contenido de fenoles totales, lo que posiblemente indica que existe una correlación negativa entre el rendimiento y la concentración de nutraceuticos. En general, estos resultados permiten identificar una variabilidad importante en cuanto a las respuestas agronómicas debido a la variabilidad genética entre poblaciones.

6. LITERATURA CITADA

- Ángeles-Gaspar, E., Ortiz-Torres, E., López, P. A., y López-Romero, G. 2010. Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista fitotecnia mexicana*, 33(4), 287-296
- Avila-Miramontes, J. A., Avila-Salazar, J. M., Martinez-Heredia, D., y Rivas-Santoyo, F. J. 2014. El cultivo del maíz (generalidades y sistemas de producción en el noreste). In *Universidad de Sonora, division de ciencias biológicas y de la salud, departamento de agricultura y ganadería* (pp. 1–107). F. Vázquez., <https://doi.org/10.5962/bhl.title.122539>
- Bañuelos-Pineda, J., Gómez-Rodiles, C. C., Cuéllar-José, R., and Aguirre López, L. O. 2018. The Maize Contribution in the Human Health. In *Corn - Production and Human Health in Changing Climate* (pp. 30–48). <https://doi.org/10.5772/intechopen.78700>
- Bello-Pérez, LA, Camelo-Mendez, GA, Agama-Acevedo, E. y Utrilla-Coello, RG 2016. Aspectos nutracéuticos de los maíces pigmentados: digestibilidad de los carbohidratos y antocianinas. *Agrociencia*, 50 (8), 1041-1063.
- Camacho-Escobar, M. A., Ramos-Ramos, D. A., Ávila-Serrano, N. Y., Sánchez-Bernal, E. I., and López-Garrido, S. J. 2020. The physico-chemical plant defenses and its effect on ruminant feeding. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 443–453. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V38I2.629>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) 2020. Granos enteros. Consulta: enero 24, 2025. Disponible en línea. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/granos-enteros/>
- Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM) 2013. Maíz. Consulta: enero 27, 2025. Disponible en línea. <https://secihti.mx/cibiogem/index.php/maiz>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2020. Maíces. Consulta: enero 29, 2025. Disponible en línea. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices>

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2020. Razas de maíz en México. Consulta: enero 28, 2025. Disponible en línea. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2020. Qué nos aportan los maíces. Consulta: enero 29, 2025. Disponible en línea. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/que-nos-aportan/N_maices
- Conceição dos Santos, L.F., Garruña, R., Andueza-Noh, R.H., Latournerie-Moreno, L., Mijangos-Cortés, J.O., y Pineda-Doporto, A. 2019. Comportamiento agronómico y fisiológico de maíces nativos del sureste de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10 (6), 1247-1258.
- De la Rosa Reyna, X. F., García, L. I., Hernández, M. J., Morales, B. J. y Quiroz, V. J. D. C. 2022. Antocianinas, propiedades funcionales y potenciales aplicaciones terapéuticas. *Revista Boliviana de Química*, 39(5): 155-162. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.39.5.1>
- Gómez, L. C. A., Juárez, E. M. G., Martínez, M. M., Román, R. D. J. A., y Figueroa, J. A. F. 2016. Potencial de rendimiento y variabilidad del maíz nativo (*Zea mays* L.) rojo en suelos ácidos de baja fertilidad en Acayucan, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 4(2), 112-117.
- Gutiérrez, V. M. O., Estrada, J. A. E., García, P. S., Chávez, L. T., Lagunas, A. A. M., y Román, E. C. 2000. Crecimiento y distribución de biomasa en girasol en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra Latinoamericana*, 18(4), 313-323.
- Guzmán-Gerónimo, R. I., Alarcón, E., García, O., Chávez-Servia, J. L. y Alarcón-Zavaleta, T. 2017. Chemical, antioxidant, and cytotoxic properties of native blue corn extract. In Badria FA (Ed.) *Natural Products and Cancer Drug Discover*. InTech. Rijeka, Croatia. pp. 67–77.
- Hernández-Casillas, J. M., y Esquivel-Esquivel, G. 2004. Rendimiento de grano y características agronómicas en germoplasma de maíz de valles altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(Especial_1), 27-27.
- Hidalgo-Ramos, D. M., Rodríguez-Herrera, S. A., Palacios-Rojas, N., López-Benitez, A., García-Osuna, H. T., Lozano-Del Río, A. J., y Mancera-Rico, A. 2007. Contenido de

antocianinas y características físicas de granos de 300 accesiones de maíz pigmentado
Anthocyanin content and physical characteristics of kernels from 300 pigmented maize
accessions K E Y W O R D S : *Zea mays* , anthocyanin , seed color , kern. Revista Bio
Ciencias, 11, 1–22.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) 2020. Por su
gran sabor y alto valor nutricional, el maíz azul como base de nuestra alimentación.
Consulta: febrero 17, 2025. Disponible en línea.
[https://www.gob.mx/inifap/articulos/maiz-azul-coloreando-nuestras-
tradiciones?idiom=es#:~:text=Durante%20los%20%C3%BAltimos%20a%C3%B1os
%20nuestro,azul%20es%20el%20m%C3%A1s%20importante.](https://www.gob.mx/inifap/articulos/maiz-azul-coloreando-nuestras-tradiciones?idiom=es#:~:text=Durante%20los%20%C3%BAltimos%20a%C3%B1os%20nuestro,azul%20es%20el%20m%C3%A1s%20importante.)

Juárez, E. M. G., Martínez, D. L. A., y Juárez, A. D. G. 2020. Estudio De Mercado Del Maíz
Azul (*Zea mays* L.) En México. Innovación empresarial en Mercadotecnia, 35.

Kato, T. Á., Mapes, S. C., Mera, O. L. M., Serratos, H. J. A., y Bye, B. R. A. 2009. Origen y
diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de
México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México,
DF, 116 p.

Khamphan, P., Lomthaisong, K., Harakotr, B., Ketthaisong, D., Scott, M. P., Lertrat, K., and
Suriharn, B. 2018. Genotypic variation in anthocyanins, phenolic compounds, and
antioxidant activity in cob and husk of purple field corn. *Agronomy*, 8(11), 271.

Lopez-Martinez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Lee, C. H., Parkin, K. L., and
Garcia, H. S. 2009. Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content
of eighteen strains of Mexican maize. *Lwt*, 42(6), 1187–1192.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.10.010>

Lustre Sánchez, H. 2022. Los superpoderes de las plantas: los metabolitos secundarios en su
adaptación y defensa. *Revista Digital Universitaria*, 23(2), 1–8.
<https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.10>

Maddoni, G. A., and Otegui, M. E. 2006. Intra-specific competition in maize: Contribution of
extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel
composition. *Field Crops Research*, 97(2-3), 155-166.

Maldonado-Astudillo, Y. I., Gutiérrez González, A. A., Flores Rogel, Y. L., Arámbula Villa,

- G., Flores Casamayor, V., Jiménez-Hernández, J., Ramírez, M., Álvarez Fitz, P., y Salazar López, R. 2021. Propiedades morfométricas, fisicoquímicas y actividad antiproliferativa de maíces pigmentados de Guerrero. *Nova Scientia*, 13(27), 1–26. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2825>
- Manrique, E. M., Vera, V. J. 2023. *Cereales (Técnicas de análisis)*. México: UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Marín-Canul, J. E., Mut-Martín, M., Espinoza-García, A. S., Pérez-Izquierdo, O., Ávila-Escalante, L., Góngora-Alfaro, J. L., y Aranda-González, I. I. 2019. Consumo y principales fuentes alimentarias de polifenoles en egresados de la Licenciatura en Nutrición de una universidad pública del sureste de México. *Acta Universitaria*, 1, 1–16.
- Martínez-martínez, R., y Chávez-servia, J. L. 2015. Compuestos bioactivos y actividad antioxidante en poblaciones nativas de maíz pigmentado. *Comunicaciones*, 44, 1–11.
- Mendoza-Mendoza, C. G., Mendoza-Castillo, M. C., Delgado-Alvarado, A., Castillo-González, F., Kato-Yamakake, T. Á., y Cruz-Izquierdo, S. 2017. Antocianinas Totales Y parámetros de color en líneas de maíz morado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40, 1–16.
- Orellana, A., y Dardón, D. 2012. Aspectos generales y guía para el manejo agronómico del maíz en Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala, ICTA, 66.
- Paliwal, R. L. 2001. *El Maíz en Los Trópicos: Mejoramiento Y Producción (Colección FAO: Producción Y Protección Vegetal) (No. 28)*. Food & Agriculture Org.
- Paulsmeyer, M., Chatham, L., Becker, T., West, M., West, L., and Juvik, J. 2017. Survey of anthocyanin composition and concentration in diverse maize germplasms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(21), 4341-4350.
- Portillo Vázquez, M., Sangermán-Jarquín, D. M., y Pérez Robles, K. 2023. Creación de regiones agrícolas altamente especializadas en el cultivo maíz Estudio de caso: Sinaloa, Sonora, Nayarit y Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(2), 303–309. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.3421>
- Robles-Plata, V. T., Serna Saldivar, S., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Rooney, W. L., Dávila-Vega, J. P., Chuck-Hernández, C., and Escalante-Aburto, A. 2023. Biophysical,

Nutraceutical, and Technofunctional Features of Specialty Cereals: Pigmented Popcorn and Sorghum. *Foods*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/foods12122301>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) 2021. La riqueza de México es el maíz. Consulta: febrero 04, 2025. Disponible en línea <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-riqueza-de-mexico-es-el-maiz>

Seigler, D. S. (1998). Shikimic acid pathway. In *Plant secondary metabolism* (pp. 94-105). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4913-0_7

Serna-Saldívar, S. O., Gutiérrez-Uribe, J. A., Mora-Rochin, S., y García-Lara, S. 2013. Potencial nutracéutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Revista fitotecnia mexicana*, 36, 295-304.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2018. Con los colores del maíz, México se pinta solo. Consulta: febrero 04, 2025. Disponible en línea <https://www.gob.mx/siap/articulos/con-los-colores-del-maiz-mexico-se-pinta-solo>

Toxtle-Flores, P., Gil-Muñoz, A., López, PA, y Silva-Gómez, SE 2023. La diversidad de maíces nativos persiste en áreas rurales en transición hacia lo urbano. *Revista Bio Ciencias*, 10.

Urias-Lugo, D. A., Heredia, J. B., Muy-Rangel, M. D., Valdez-Torres, J. B., Serna-Saldívar, S. O., and Gutierrez-Uribe, J. A. 2015. Anthocyanins and phenolic acids of hybrid and native blue maize (*Zea mays* L.) extracts and their antiproliferative activity in mammary (MCF7), liver (HepG2), colon (Caco2 and HT29) and prostate (PC3) cancer cells. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70, 193-199.