

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN



Exploración Genética en Híbridos Simples de Maíz a partir de Dos Grupos
Germoplásmicos Contrastantes

Por:

LUIS ALBERTO PEREZ GOMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Marzo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Exploración Genética en Híbridos Simples de Maíz a partir de Dos Grupos
Germoplásmicos Contrastantes

Por:

LUIS ALBERTO PEREZ GOMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

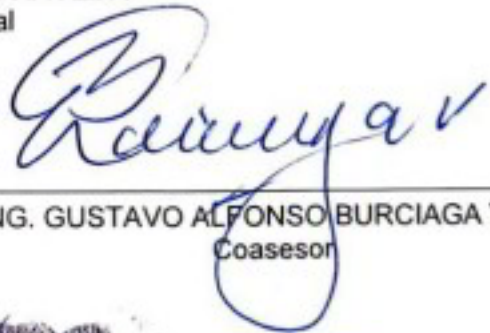
Aprobada por el Comité Asesor:



DR. ANTONIO FLORES NAVEDA
Asesor Principal



ING. RAUL GANDARA HUITRON
Coasesor



ING. GUSTAVO ALFONSO BURCIAGA VERA
Coasesor



DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Marzo 2026

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:

Reproducción 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 propia; 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 el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Pasante



Luis Alberto Perez Gomez

Asesor Principal



Dr. Antonio Flores Naveda

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme siempre por el camino correcto, brindarme fortaleza y permitirme alcanzar una de las metas más importantes de mi vida.

*A mis padres, **Lucio Pérez López** y **Aurelia Gómez Hernández**, por su amor, apoyo incondicional, confianza y sacrificio a lo largo de mi formación. Gracias por motivarme siempre a seguir adelante y por creer en mí en todo momento.*

*A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi Alma Terra Mater, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas.*

*Al MC. **Eduardo Hernández Alonso**, por su valiosa amistad, orientación, enseñanzas y por el tiempo dedicado durante el desarrollo de este trabajo.*

*Al Ing. **Raúl Gándara Huifrón**, por su amistad, consejos y apoyo durante mi formación universitaria.*

*A mis amigos de la universidad **Poncho, Leo, Karen, Néstor, Omar, Franceli, Sandra, Bibiana, Aarón, Álvaro, Emilio, Gael, Gabriel, Ricardo y Gus**, por los momentos compartidos y experiencias vividas.*

*A todos mis **maestros**, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y dedicación, contribuyendo de manera fundamental en mi formación profesional.*

Y a todos mis compas los trabajadores del Instituto Mexicano del Maiz por todos los momentos compartidos.

DEDICATORIA

*A mis padres, **Lucio Pérez López** y **Aurelia Gómez Hernández**, a quienes dedico este logro con todo mi cariño y gratitud. Gracias por su amor, esfuerzo, sacrificio y por brindarme siempre su apoyo incondicional. Ustedes han sido el pilar fundamental de mi vida y la motivación para seguir adelante y alcanzar mis metas.*

*A mis hermanos, **Adolfo**, **Ana Laura**, **Juan Javier**, **María Yolanda** y **José Heriberto**, por su apoyo, compañía y por siempre brindarme palabras de aliento para continuar superándome.*

*A mis **tíos y primos**, (karla y luisito) por su apoyo y por estar presentes en los momentos importantes de mi vida.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

.....	ii
DECLARACIÓN DE NO PLAGIO	ii
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
INDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Hipótesis:.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Patrón Heterótico	4
2.2. Importancia de los Híbridos	5
2.3. Maíz Enano	6
2.4. Heterosis.....	7
2.5. Hibridación.....	9
2.6. Ensayos Multiambientales	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Ubicación del Experimento	11
3.2. Material Genético	11
3.3. Siembra	12
3.4. Aclareo.....	12
3.5. Manejo Agronómico	12
3.5.1. Fertilización	13
3.5.2. Riego	13
3.5.3. Control de Malezas	13
3.5.4. Control de Plagas.....	13
3.6. Variables Evaluadas	14
3.6.1. Floración Macho (FM)	14
3.6.2. Floración Hembra (FM)	14
3.6.3. Altura de Planta (AP).....	14

3.6.4.	Altura de Mazorca (AM)	15
3.6.5.	Acame de Raíz (AR)	15
3.6.6.	Acame de Tallo (AT)	15
3.6.7.	Mala Cobertura (MC)	15
3.6.8.	Plantas con <i>Fusarium</i> (PF)	15
3.6.9.	Calificación de Planta (CP)	16
3.6.10.	Calificación de Mazorca (CM)	16
3.6.11.	Rendimiento (REND)	16
3.6.12.	Humedad (Hum)	17
3.6.13.	Peso Hectolítrico (PHL)	17
3.7.	Diseño Experimental Utilizado	17
3.8.	Gráfico Biplot Mediante el Modelo AMMI	18
3.9.	Índice de Selección	20
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1.	Análisis de Varianza Combinado	22
4.2.	Análisis de Varianza por Experimento (experimento 1)	25
4.3.	Análisis de Varianza por Experimento (experimento dos, tres y cuatro). ...	28
4.4.	Análisis de Varianza por Experimento (experimento cinco)	30
4.5.	Pruebas de Rango Múltiple	31
4.6.	Índice de Selección a Partir del Grafico Biplot	33
4.7.	Gráfico Biplot de Variables Correlacionadas	33
4.8.	Gráfico Biplot del Experimento Uno	35
4.9.	Gráfico Biplot de los Experimento Dos, Tres y Cuatro	36
4.10.	Gráfico Biplot del Experimento Cinco	37
4.11.	Índice de Selección	38
V.	CONCLUSIONES	45
VI.	LITERATURA CITADA	46

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
4.1.	Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 250 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.....	23
4.2.	Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 50 híbridos de porte normal evaluadas durante la primavera-verano del 2023.....	26
4.3.	Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 150 híbridos formados a partir de líneas de porte normal y líneas de porte enano evaluadas durante la primavera-verano del 2023.....	28
4.4.	Cuadro Cuadrados medios del análisis de varianza de 13 variables agronómicas de 50 híbridos de porte enano evaluados durante la primavera-verano del 2023.....	30
5.	Pruebas de rango múltiples de 13 variables agronómicas evaluadas en 5 experimento durante la primavera-verano de 2023.....	32
6.	Híbridos seleccionados del experimento uno mediante el valor de índice de selección.....	40
7.	Híbridos seleccionados de los experimentos dos, tres y cuatro mediante el valor de índice de selección.....	41
8.	Híbridos seleccionados del experimento cinco mediante el valor de índice de selección.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
4.1.	Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 250 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.	34
4.2.	Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 50 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.	35
4.3.	Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 50 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.	37
4.4.	Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 50 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.	38

RESUMEN

El objetivo fundamental del mejoramiento genético del maíz mediante hibridación es generar cruzas que superen la producción de grano de las variedades criollas y mejoradas locales. La presente investigación se generó para una exploración genética de 13 variables agronómicas con el objetivo de estimar la existencia de variabilidad al cruzar dos grupos heteróticos contrastantes (plantas de porte normal vs plantas de porte enano) y con el método de IS, seleccionar los mejores híbridos y sus progenitores. Para ello, se evaluaron 250 híbridos experimentales pertenecientes al Instituto Mexicano del Maiz (IMM) y tres testigos de diferentes empresas semilleras. El experimento se estableció en el Campo Experimental Bajío de la UAAAN, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila en el ciclo agrícola P-V, 2023, los 250 híbridos se agruparon en cinco experimentos. Para lo cual se realizaron cruzas de progenitores de porte normal por normal, generando 50 híbridos, cruzas de progenitores de porte normal por progenitores de porte enano generando 150 híbridos, esto con la finalidad de explorar la capacidad del grupo heterótico denominando Normal por Enano del IMM, por último, se generaron 50 híbridos del cruzamiento de progenitores de porte enano por enano. El diseño experimental utilizado fue un diseño de bloques al azar con un arreglo α -lattice, con dos repeticiones. La unidad experimental fue de tres metros de longitud, 75 cm entre surcos y 12.5 cm de planta a planta. De acuerdo a lo anterior se realizó un análisis de varianza por experimento, esto con la finalidad de comparar los híbridos evaluados y saber si existen diferencias o similitudes, posteriormente con el uso del programa estadístico multivariado de Componentes Principales y en el grafico Biplot se identificaron en los experimentos (uno, dos, tres y cuatro), tres variables representativas, mientras que en el experimento cinco se identificaron cuatro variables. En base a los resultados del ANVA con los valores del mérito del índice de selección se logró identificar a los híbridos superiores en cada experimento. En el experimento uno destacó el híbrido 47; en los experimentos dos, tres y cuatro sobresalió el híbrido 55; mientras que en el experimento cinco, el híbrido con mejor desempeño fue el 14, esto en cuestión de rendimiento.

Palabras clave: Grupos heteróticos, Índice de selección, Progenitores.

I. INTRODUCCIÓN

Nuestro país ocupa la mayor superficie agrícola, durante el año 2024 se registró una superficie sembrada, cercana a 6.6 millones de hectáreas, con una producción total aproximada de 24 millones de toneladas. A pesar de esta importante producción, el volumen nacional no es suficiente para cubrir la demanda interna, por lo que el país depende de importaciones que alcanzan alrededor de 25.8 millones de toneladas, principalmente de maíz amarillo, utilizado en gran medida en la industria pecuaria y agroindustrial. En consecuencia, la producción nacional no logra satisfacer completamente el consumo interno (SIAP, 2024).

Actualmente, hay una creciente demanda en la producción de maíz, lo que provoca que la producción de maíz no cubra la demanda total. Para cumplir con las demandas de consumo, es fundamental utilizar semillas de alta calidad. La utilización de maíces híbridos supone un avance considerable en la agricultura, considerándose una de las innovaciones más relevantes en el mejoramiento de plantas, no solo por sus altos rendimientos, sino también por la calidad de la producción y su consecuente rentabilidad.

La calidad de las semillas y el potencial genético de un híbrido afectan significativamente el rendimiento, la resistencia a plagas y enfermedades, la adaptabilidad climática de cada región y la capacidad de recuperación frente a los efectos del cambio climático. La utilización de semilla de maíz híbrido de una cruce simple ofrece importantes beneficios para los productores, puesto que son ideales para regiones con gran potencial agrícola debido al rendimiento que logran y la uniformidad que exhiben, facilitando así la mecanización y la implementación de paquetes tecnológicos de alta eficiencia.

La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ha centrado sus esfuerzos en mejorar las poblaciones adecuadas a las condiciones subtropicales del país; a través del Instituto Mexicano del Maíz, se ha establecido un programa de mejoramiento con la finalidad de crear nuevas variedades que puedan ser empleadas en un esquema de endogamia para la producción de híbridos o directamente por los agricultores como variedades sintéticas de polinización abierta.

En este presente trabajo se realizó con la finalidad de evaluar el comportamiento agronómico de 250 híbridos experimentales, pertenecientes de dos grupos heteróticos de maíz, con plantas de porte normal y plantas de porte enano, de las cuales se evaluaron 13 variables agronómicas con el objetivo de saber si existe variación entre las variables evaluadas de los híbridos experimentales ya que son de diferentes patrones heteróticos.

1.1. Objetivos

- Evaluar el comportamiento de híbridos experimentales de maíz a través de 13 variables agronómicas.
- Estimar la existencia de variabilidad al cruzar dos grupos heteróticos (progenitores con plantas de porte normal vs progenitores con plantas de porte enano).
- Hacer selección de los mejores híbridos y sus progenitores con base a un índice de selección.

1.2. Hipótesis:

- Será posible encontrar variabilidad entre los híbridos experimentales, ya que son diferentes grupos heteróticos.
- Con el uso del índice de selección, será posible identificar híbridos y progenitores experimentales con potencial comercial.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Patrón Heterótico

Un patrón heterótico hace referencia a un conjunto de líneas puras que pertenecen a grupos heteróticos, las cuales exhiben una notable heterosis, resultando en híbridos de alta calidad. En este contexto, el patrón heterótico representa un código de cruce específico con ACG y ACE. Para definir un patrón heterótico, es fundamental examinar el germoplasma presente en un programa de mejoramiento genético, que típicamente incluye al menos dos poblaciones distintas que han sido modificadas mediante métodos de selección entre poblaciones (Ramírez et al., 2007).

La aptitud combinatoria (AC) establece el potencial de los progenitores para generar variedades con un mayor rendimiento (Abera *et al.*, 2016); para calcular la AC, se pueden usar los diseños de cruza dialécticas, sugeridos por Griffing (1956), que analizan un grupo de progenitores y sus posibles cruzamientos. Otro factor relevante para la obtención de híbridos es la heterosis, donde la variabilidad genética entre los padres actúa como un indicador importante del rendimiento. En México hay numerosos estudios sobre la aptitud combinatoria y heterosis en maíz de grano blanco, pero son escasos en maíz de grano amarillo (Díaz *et al.*, 2023).

Una táctica utilizada en el avance genético de plantas alógamas es la selección de los progenitores más sobresalientes en homocigosis, que provienen de grupos heteróticos de hembras y machos con genealogías definidas. Los progenitores deben tener una gran capacidad combinatoria general (ACG) y específica (ACE), para que al formar híbridos mediante cruzamientos en estos grupos heteróticos, se logre una alta heredabilidad estricta y una calidad de grano excepcional, con heterosis en rendimiento y avances en sus características agronómicas (Rivera *et al.*, 2019)

El análisis dialélico es un método que ayuda a medir la magnitud de la varianza aditiva y la dominancia en el comportamiento de las variables; también evalúa los efectos de la aptitud combinatoria, efectos maternos y recíprocos de los progenitores, permitiendo conocer la heterosis de los cruces y la heredabilidad del carácter; además, es un diseño eficaz que posibilita la integración de nuevas líneas a los grupos heteróticos complementarios (Hernández - De León, 2021)

2.2. Importancia de los Híbridos

En el mejoramiento genético es fundamental entender el componente genético de las líneas que se emplearán como progenitores en la generación de híbridos y variedades sintéticas comerciales. En la mejora de cultivos, se han implementado técnicas genotécnicas para evaluar y seleccionar las líneas sobresalientes para la generación de híbridos; entre las estrategias más frecuentes se encuentran las de evaluación de líneas *per se* para elegir aquellas con alto potencial productivo, excelente desempeño agronómico y buena aptitud combinatoria (Buenrostro-Robles *et al.*, 2017)

Los programas de mejora genética orientados a la formación de híbridos y variedades comerciales de maíz necesitan desarrollar líneas con gran potencial de rendimiento, buen comportamiento agronómico y aptitud combinatoria. Las líneas que cuentan con estas características obtienen resultados positivos en mezclas híbridas (Rodríguez *et al.*, 2023).

En la mejora de híbridos, se recomienda comprender el comportamiento genético de las características económicas importantes de cada población, con el propósito de elegir la estrategia adecuada que permita obtener híbridos con mayores beneficios agronómicos. Al analizar los efectos de Aptitud Combinatoria General (ACG) y Aptitud Combinatoria Específica (ACE), logramos comprender los tipos de acción génica que controlan los distintos caracteres (Antuna *et al.*, 2023)

La semilla de maíz híbrido proporciona a los agricultores híbridos con mejores características genéticas, como un gran potencial de producción y combinaciones únicas de rasgos para combatir enfermedades y condiciones desfavorables. Sin embargo, la calidad de la semilla híbrida se basa principalmente en los métodos de producción utilizados en el campo, que deben cumplir con estándares que garanticen la calidad y la aplicación de un manejo agronómico apropiado. Si bien la producción de semillas de maíz de polinización libre es relativamente sencilla, la generación de semillas híbridas requiere la implementación de prácticas agrícolas adicionales que son fundamentales para lograr una buena cosecha (MacRobert *et al.*, 2015)

2.3. Maíz Enano

Las plantas de maíz enano constituyen un grupo esencial de germoplasma en el programa de mejoramiento de El Bajío del IMM, destacándose por su considerable respuesta heterótica al cruzarse con variedades de poblaciones de altura normal y procedencia tropical; su estructura fenotípica les permite tolerar altas densidades

de siembra y responder favorablemente al uso de insumos agrícolas. Se reconocen fenotípicamente por poseer entrenudos bajo la mazorca, alta prolificidad en el número de mazorcas por planta, hojas cortas y erectas, espigas abiertas y granos profundos que oscilan entre dentados y semi-cristalinos (De León *et al.*, 2005)

El enanismo del maíz se controla principalmente por hormonas de las plantas. Giberelinas (GA), auxina (AIA) y BR son las hormonas clave que afectan la estatura de la planta (Zhao *et al.*, 2024). Los BR son hormonas esteroides indispensables para el crecimiento y desarrollo vegetal, controlando varios procesos cruciales como el crecimiento de raíces, la elongación del tallo, la expansión de hojas y la tolerancia al estrés (Nolan *et al.*, 2020).

No obstante, una única hormona por sí misma no puede promover ni inhibir de manera efectiva el crecimiento de la planta; el enanismo que se observa en numerosas plantas generalmente es el efecto de la regulación conjunta de varias hormonas. Asimismo, varios genes que fomentan la elongación y regeneración celular desempeñan roles importantes en la regulación de la altura de la planta (Thilakarathne *et al.*, 2025).

2.4. Heterosis

La heterosis, también conocida como vigor híbrido, es un fenómeno donde la descendencia híbrida muestra atributos superiores a los de sus padres. Esta estrategia se aplica de manera extensa en la mejora del maíz para aumentar el rendimiento y la resistencia al estrés. Investigaciones han evidenciado que la capacidad combinatoria y la heterosis pueden ser utilizadas de manera eficaz al crear híbridos a partir de distintos recursos de germoplasma, abarcando líneas de maíz de regiones templadas y tropicales (Yu *et al.*, 2020).

Richard *et al.* (2016) sugirieron que, para maximizar el aprovechamiento de la heterosis, se podrían utilizar marcadores moleculares para agrupar el germoplasma de maíz en diferentes grupos heteróticos, y que la inclusión de líneas endogámicas templadas de grupos heteróticos establecidos podría ayudar en la identificación de grupos heteróticos potenciales en germoplasma que no ha sido caracterizado todavía. Se evidenció que la inclusión de líneas endogámicas de grupos heteróticos específicos en un programa de caracterización molecular era fundamental para identificar correctamente grupos heteróticos potenciales en líneas endogámicas de maíz

La heterosis da como la superioridad fenotípica de un híbrido en comparación con sus progenitores en características como la velocidad de crecimiento, el éxito reproductivo y la producción. Este vigor híbrido se define por mecanismos que no son excluyentes, e incluyen la complementación de dominancia, la sobredominancia y la epistasis (Lippman y Zachary, 2006).

Heterosis es un fenómeno que ocurre en la mayoría de las especies alógamas, como el maíz, donde los híbridos superan a sus antecesores en uno o varios rasgos, destacando el rendimiento de grano. Así, los métodos de mejora genética para la creación de híbridos buscan maximizar la heterosis entre los progenitores elegidos. (Ramírez *et al.*, 2007).

La heterosis se puede describir como el incremento en el tamaño, el vigor, la fertilidad y la productividad total de una planta híbrida, superando el valor promedio de los progenitores (rendimiento medio de ambos progenitores) y del desempeño del progenitor más destacado. Esto sucede tanto al combinar dos líneas endogámicas de especies exogámicas como al mezclar líneas puras. La medida de la heterosis ofrece datos sobre el nivel de diversidad genética de los padres empleados para crear variedades mejoradas (Gurjar *et al.*, 2020).

2.5. Hibridación

De manera sencilla, un híbrido se genera cuando una planta poliniza a otra que no tiene relación genética con ella. La planta que genera la semilla se llama progenitora hembra, en tanto que a la que suministra el polen para su fecundación se le conoce como progenitor macho. De esta forma, la semilla generada tiene una estructura genética exclusiva, derivada de ambos padres, creando una planta con rasgos específicos (MacRobert *et al.*, 2015).

La mejora híbrida es una estrategia brillante para aumentar la productividad de los cultivos y la consistencia en el rendimiento. La formación de híbridos requiere elegir progenitores endogámicos que posean las características deseadas y una adecuada aptitud combinatoria (Nyaga *et al.*, 2020).

Escorcía *et al.*, (2010) señalaron que, un objetivo relevante del mejoramiento genético de maíz mediante hibridación es producir cruces que superen en producción de grano a las variedades criollas y mejoradas locales. En la producción comercial de maíz se utilizan tres tipos de híbridos: híbrido simple, híbrido triple y híbrido doble.

2.6. Ensayos Multiambientales

Los ensayos multiambientales (MET) se realizan bajo diversas condiciones ambientales para evaluar el desempeño de varias variedades, puesto que cada una presenta un comportamiento distinto en estas situaciones, un fenómeno conocido como interacción genotipo-ambiente (Buntaran, 2021).

La relevancia de la interacción genotipo x ambiente (IEA) es crucial para reducir el promedio del genotipo en diversos contextos. Se utiliza como prueba de la habilidad

del genotipo para expresar fenotipos específicos en diferentes ambientes, y es un esfuerzo constante de los Fitomejoradores debido a la variabilidad ambiental en diversas ubicaciones y a lo largo del tiempo. El objetivo fundamental de los ensayos multiambientales es analizar la estabilidad genética en diferentes condiciones, identificar genotipos destacados y determinar cuál ubicación se asemeja más al entorno ideal para la producción (Merga, 2022)

La interacción genotipo $\times$ ambiente es crucial en la definición de la habilidad de un genotipo para desarrollarse en un ambiente específico y, al final, determina su capacidad genética para adaptarse y funcionar de manera consistente (Márquez *et al.*, 2020).

De manera similar, las características agronómicas como la altura de la planta, altura de la mazorca, producción, caídas, cantidad de granos por mazorca: estos elementos están vinculados al genotipo, propiedades del suelo, ambiente y manejo del cultivo, lo que indica que mostrarán diversos valores en cada evaluación. Estas características son afectadas por el impacto genético específico de los cultivos en relación con su entorno (Salazar *et al.*, 2023).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del Experimento

Este proyecto de investigación se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en particular en el Campo Experimental del Bajío, que pertenece al Instituto Mexicano de Maíz. El área de experimentación se encuentra en las coordenadas geográficas 25°23'36" de latitud norte y 100°01'1.8" de longitud oeste, a una elevación de 1,730 metros sobre el nivel del mar.

Las características climáticas de la región incluyen una precipitación anual promedio que varía entre 350 y 400 mm, además de temperaturas medias que oscilan entre 18 y 22 °C, lo que establece un entorno semiárido con un clima templado.

3.2. Material Genético

El germoplasma utilizado para esta investigación fueron 250 híbridos perteneciente del Instituto Mexicano del Maíz (IMM), donde se utilizaron líneas de porte normal y líneas de porte enano para realizar las cruzas.

Para eso se realizaron cruzas de progenitores de porte normal por normal generando 50 híbridos, cruzas de progenitores de porte normal por progenitores de porte enano generando 150 híbridos, esto con la finalidad de explorar la capacidad del grupo heterótico denominando Normal por Enano del IMM, por último, se generaron 50 híbridos del cruzamiento de progenitores de porte enano por enano.

3.3. Siembra

El experimento se sembró manualmente el 30 de abril de 2023, colocando dos semillas en cada sitio para garantizar una buena emergencia y lograr una densidad poblacional adecuada. Después de que se presentó la emergencia en las etapas fenológicas iniciales del cultivo, se realizó un aclareo, quedando una planta por golpe, con el objetivo de regular la población y acercarse lo más posible a la densidad de siembra previamente definida.

La unidad experimental consistió en un surco de 3 m de largo, con una distancia de 12.5 cm entre plantas y una separación de 75 cm entre surcos. Con esta disposición espacial se logró una densidad cercana a 106,600 plantas por hectárea.

3.4. Aclareo

El aclareo consistió en eliminar una de las dos plantas emergidas en cada sitio de siembra, dejando únicamente la planta más vigorosa. Esta práctica permitió asegurar una densidad de población uniforme y óptima para la evaluación experimental.

Dicha actividad se llevó a cabo en las etapas fenológicas iniciales del cultivo, específicamente entre V2 y V3 cuando las plantas presentaban de dos a tres hojas verdaderas completamente desarrolladas.

3.5. Manejo Agronómico

El manejo realizado fue de forma uniforme para los 250 híbridos, que incluyó riego, fertilización, manejo agronómico, control de plagas y control de malezas, estas actividades se efectuaron en los momentos adecuados o requeridos dentro de las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz.

3.5.1. Fertilización

Se emplearon como fuentes, el fertilizante triple 17, fosfato monoamónico (11-52-00) y urea (46-00-00), en la cual, determinó una dosis total de 200-100-100 kg ha⁻¹ de N-P-K, de lo siguiente se dividió en dos aplicaciones realizadas manualmente. La primera aplicación se llevó a cabo en la fase fenológica V2, en la que se proporcionó la totalidad del fósforo y del potasio, junto con el 50 % del nitrógeno total. El 50 % restante del nitrógeno se suministró más tarde, cuando el cultivo estaba en las fases V5-V6.

3.5.2. Riego

Los riegos se realizaron conforme a los requerimientos del cultivo durante su desarrollo, utilizando un sistema de riego por cintilla, lo que permitió una distribución uniforme. Este método favoreció una mayor eficiencia en el uso del agua, además de mantener una humedad adecuada en el suelo para promover un crecimiento óptimo del cultivo y minimizar posibles situaciones de estrés hídrico.

3.5.3. Control de Malezas

El manejo de malezas se realizó mediante aplicaciones pre y post-emergencia, con el objetivo de reducir la competencia por agua, luz y nutrientes durante las etapas críticas del cultivo. Se aplicó un herbicida pre-emergente comercialmente conocido como Gesaprim Calibre 90 (atrazina), a una dosis de 2 kg ha⁻¹, diluidos en 200 L de agua.

Posteriormente, se realizó una aplicación post-emergente con el herbicida Elumis® de la empresa Syngenta (nicosulfuron + mesotrione), a una dosis de 1.5 L ha⁻¹, diluidos en 200 L de agua.

3.5.4. Control de Plagas

El manejo del gusano cogollero se realizó con base en el umbral económico de daño, considerando el nivel de infestación. El insecticida utilizado fue Proclaim® 5

SG (benzoato de emamectina), aplicado a una dosis de 200 g ha⁻¹, diluidos en 200 L de agua.

3.6. Variables Evaluadas

Las variables agronómicas evaluadas que son consideradas de mayor importancia para realizar la selección eficaz en el programa de mejoramiento de maíz, se presentan a continuación:

3.6.1. Floración Macho (FM)

Es el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta el momento en que el 50 % de las plantas evaluadas en la parcela experimental presentaron la inflorescencia masculina (espiga) en antesis, es decir, cuando se observa la liberación activa de polen.

3.6.2. Floración Hembra (FM)

Corresponde al número de días transcurridos desde la siembra hasta la aparición de los estigmas en las plantas. Esta variable refleja el momento en que la inflorescencia femenina se encuentra visible y funcional para la recepción del polen.

3.6.3. Altura de Planta (AP)

Se estableció como la longitud medida en centímetros desde la base de la planta hasta la parte superior de la inflorescencia masculina. Para su evaluación, se eligieron cinco plantas representativas en cada unidad experimental, eligiendo plantas que fueran comparables al resto de la parcela y posteriormente se promediaron los valores obtenidos para presentar un único dato representativo por parcela experimental

3.6.4. Altura de Mazorca (AM)

Es la medida en centímetros desde la base de la planta hasta el punto de inserción de la mazorca principal; esta información se obtuvo de 5 plantas representativas de la unidad experimental, seleccionando plantas similares para luego ser reportada como promedio de la parcela.

3.6.5. Acame de Raíz (AR)

Se consideraron como plantas acamadas aquellas que presentaron una inclinación igual o mayor a 30° respecto a la posición vertical de la planta. El acame se evaluó en cada unidad experimental mediante el conteo total de plantas afectadas, y posteriormente se calculó el porcentaje correspondiente en relación con el número total de plantas establecidas en la parcela.

3.6.6. Acame de Tallo (AT)

Es el número de plantas que presentaron doblamiento en los entrenudos ubicados por debajo de la mazorca principal, dentro de cada unidad experimental se realizó el conteo de plantas afectadas en cada parcela y posteriormente se calculó el porcentaje con respecto al total de plantas establecidas en la unidad experimental.

3.6.7. Mala Cobertura (MC)

Es el número de mazorcas que no se encontraban totalmente cubiertas por el totomoxtle, dejando sin cubrir parcial o totalmente la punta o los granos, donde se realizó el conteo de las mazorcas que presentaron esta condición en cada unidad experimental y posteriormente se calculó el porcentaje con respecto al total de mazorcas en la parcela.

3.6.8. Plantas con *Fusarium* (PF)

Son las plantas que presentaron síntomas asociados por este patógeno, caracterizada principalmente por senescencia prematura y debilitamiento del tallo,

lo cual favorece el acame. Posteriormente, se calculó el porcentaje con respecto al total de plantas evaluadas, diferenciando entre plantas sanas y plantas con presencia de daño.

3.6.9. Calificación de Planta (CP)

Se realizó una evaluación del comportamiento agronómico general de las plantas en cada una de las parcelas experimentales. Para su evaluación se tomaron en cuenta características como porte, vigor, sanidad y precocidad. La evaluación se llevó a cabo empleando una escala del 1 al 10, donde 1 indicó plantas muy malas, y 10 se refirió a plantas excepcionales, con un desarrollo y uniformidad sobresalientes.

3.6.10. Calificación de Mazorca (CM)

Es la evaluación asignada al conjunto de mazorcas recolectadas por cada unidad experimental, considerando características como tamaño de la mazorca, dimensiones del grano, calidad y sanidad, empleando una escala del uno al diez, siendo uno lo más bajo y diez una mazorca muy sobresaliente.

3.6.11. Rendimiento (REND)

Es la producción calculada por hectárea con humedad ajustada al 15.5% expresada en (t ha⁻¹). Para determinar el rendimiento fue imprescindible estimar la materia seca a través de la siguiente fórmula:

$$ps = \frac{(100 - \%H)}{100} \times pc$$

Donde:

%H= porcentaje de humedad de grano a cosecha

pc= peso total de campo en Kg.

El rendimiento de mazorca se calculó para cada unidad experimental multiplicando el factor de corrección por el peso seco

$$FC = \frac{10,000 \text{ m}^2}{APU \times 0.845 \times 1000}$$

Donde:

APU = Área de parcela útil, determinado por la distancia entre surcos por la distancia de estos y por el número de plantas por parcela.

0.845 = Constante para obtener el rendimiento 15.5 por ciento de humedad.

1000 = Coeficiente para obtener el rendimiento en t ha⁻¹.

10,000 m² = Equivalencia a una hectárea.

3.6.12. Humedad (Hum)

Esta variable fue expresada en porcentaje, se tomó de una muestra representativa de todas las mazorcas cosechadas por unidad experimental en la que se desgrano una muestra de aproximadamente 300 gramos y con apoyo del medidor portátil de humedad y peso hectolítrico de la marca Dickey-Jhon modelo "MINI GAC Plus" se obtuvo la información correspondiente.

3.6.13. Peso Hectolítrico (PHL)

Es el peso de un volumen de 100 litros expresado en (kg hl⁻¹) es un dato que puede verse afectado por la humedad, a mayor humedad de grano mayor será el peso hectolítrico. Esta variable se tomó al momento de muestrear la humedad.

3.7. Diseño Experimental Utilizado

El diseño experimental utilizado en esta investigación fue un diseño de bloques al azar con un arreglo *Alpha- latice* (0,1), con finalidad de homogenizar la variación presentada por el terreno entre repeticiones;

Modelo lineal empleado para el diseño experimental:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + B_{k(i)} + T_j + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor obtenido de los tratamientos (j), de la repetición (i), dentro del bloque (k).

μ = es la media general.

R_i = es el efecto de la i-ésima repetición.

$B_{k(i)}$ = Es el efecto del k-ésimo bloque dentro del i-ésima repetición.

T_j = Es el efecto del j-ésimo tratamiento.

E_{ijk} = Es el efecto del error aleatorio no controlado.

3.8. Gráfico Biplot Mediante el Modelo AMMI

La metodología estadística empleada para seleccionar las mejores estructuras familiares fue el modelo IS (índice de selección), el cual, para llevar a cabo el estudio, necesita el análisis de unas pocas variables que sean representativas; por ello, se utilizó el gráfico biplot, que facilita observar si hay agrupamiento entre las variables analizadas y elegir las de mayor impacto en la población.

Para crear el gráfico biplot, se requería estandarizar los valores obtenidos de las variables analizadas, ya que fueron recopilados en diferentes unidades de medida como: cm, t ha⁻¹, porcentaje, días, etc. La siguiente fórmula facilitó la estandarización de los datos:

$$Z = \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma}$$

Donde:

Z = Valor estandarizado.

Y_i = Valor obtenido de la variable.

$\bar{Y}$ = Promedio de Y_i ;

σ = Desviación estándar de la variable en cuestión.

Posteriormente, se reordenaron los datos para realizar el grafico biplot en 3 columnas, en la primera se encontraba la variable agronómica evaluada, en la segunda el número de híbridos y en la última columna el valor estandarizado para cada variable, después se ejecutó para observar el agrupamiento de las 13 variables anteriormente descritas, el Modelo de Efectos Principales e Interacciones Multiplicativas (AMMI) ejecutado con la siguiente formula:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{K=1}^P \lambda_k \gamma_{ik} \alpha_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Comportamiento del i-ésimo genotipo en la j-ésima variable.

μ = media general.

g_i = efecto del i-ésimo genotipo.

e_j = efecto de la j-ésima variable.

P = Numero de ejes de componentes principales considerados en el modelo AMMI que van desde que

$k=1$.

λ_k = Raíz cuadrada del vector característico del k-ésimo eje del ACP.

α_{ij} = Calificación del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo.

Y_{ik} = Calificación del ACP para el k-ésimo eje de la j-ésima variable.

ε_{ij} = Error aleatorio de i-ésimo genotipo en la j-ésima variable.

3.9. Índice de Selección

Después de haber generado el grafico Biplot e identificar los grupos en los cuadrantes cartesianos, se eligió una variable de cada grupo que presentara correlación con otras dentro del mismo conjunto y que representara al total.

Para este estudio las variables seleccionadas para el análisis fueron: floración femenina, altura de planta, plantas con fusarium y rendimiento, con el propósito de obtener una población más precoz y con menor incidencia de *Fusarium*, pero sin perder el rendimiento y sobre todo tener plantas de menor estatura para una mayor densidad de siembra.

Se utilizó la metodología de índices de selección propuesta por Barreto *et al.*, (1991), donde la ecuación empleada para estimar dicho índice fue la siguiente:

$$IS = \{[(Y_j - M_j)^2 * I_j] + [(Y_i - M_i)^2 * I_i] + [(Y_n - M_n)^2 * I_n]\}^{1/2}$$

Donde:

IS = Índice de selección.

$Y_{j...n}$ = Variable en unidades Z.

$M_{j...n}$ = meta de selección.

$L_{j...n}$ = Intensidad de selección.

La meta de selección asignada a cada variable se relaciona con las unidades de desviación estándar del promedio que se pretende alcanzar en la selección.

La asignación de metas implicó dar un valor a las variables a examinar, donde se les asignan valores de -3 a +3; los valores negativos señalarán los genotipos que están por debajo de la media poblacional de la variable analizada, a diferencia de los valores positivos que indican los genotipos que se encuentran por encima de la media de la población, mientras que para obtener genotipos próximos al promedio se asignó el valor cero.

La intensidad de selección para cada variable puede oscilar entre 1 y 10, donde los valores cercanos a 1 son para las variables de menor relevancia a criterio del fitomejorador, mientras que los valores cercanos a 10 indican las variables de mayor importancia.

Los resultados del índice de selección se utilizaron para elaborar otro, alineando a la columna de variable respuesta y realizando una prueba de medias Tukey ($P \leq 0.05$), que facilitó la ordenación numérica de los índices, seleccionando así los genotipos con el valor más bajo. Los valores de cada variable y de los híbridos seleccionados se utilizaron para calcular el valor al mérito de cada híbrido evaluado, utilizando un software creado para calcular el índice de selección (IS) para cada híbrido siguiendo la fórmula sugerida por (Barreto *et al.*, 1991).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se hablarán e interpretarán los cuadros, gráficos y datos de los análisis obtenidos de la evaluación de los 250 híbridos, en las cuales 247 son experimentales, pertenecientes del instituto mexicano del maíz (IMM), y los tres restantes fueron testigos de diferentes expresas semilleras, evaluadas en el ciclo primavera verano (PV) del año 2023.

4.1. Análisis de Varianza Combinado

En el Cuadro 4.1, en la fuente de variación EXP (Experimentos), se detectaron diferencias altamente significativas al ($P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$) en las 13 variables evaluadas, esto demuestra que los experimentos tuvieron un promedio diferente con respecto a la media. La cual indicó que entre los cinco experimentos establecidos existió un comportamiento diferente, esto se debe a diversas condiciones, ya sea por el terreno, tipo de suelo, manejo agronómico y de factores bióticos y abióticos. Estas alteraciones ambientales cambian la expresión fenotípica de los materiales analizados y pueden producir diferencias que se pueden detectar estadísticamente entre ambientes (Yan & Tinker, 2006; Vaezi *et al.*, 2019).

El análisis de varianza sobre el porcentaje de plantas con *Fusarium* (PF) reveló diferencias significativas de bloques dentro de repeticiones BLO(REP) ($P \leq 0.05$), lo que sugiere que hubo variabilidad ambiental importante entre diversas zonas del sitio experimental que influyó en la aparición de la enfermedad. Ciarlo *et al.*, (2020) mencionó que, la variabilidad en la distribución espacial de factores edáficos como textura, composición y humedad del suelo ha sido señalada como un factor que contribuye a las variaciones en la distribución de enfermedades y otros atributos agronómicos a nivel de campo, explicando las diferencias observadas entre bloque.

En la HIB(REP) se encontraron diferencias altamente significativas al ($P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$) en todas las variables evaluados, lo que demuestra la presencia de variabilidad genética entre los genotipos analizados. Esta condición es clave en programas de mejoramiento genético, dado que la existencia de diferencias estadísticas posibilita llevar a cabo una selección eficaz. De acuerdo a Zhou & Jiang (2024), el avance genético en maíz está relacionado directamente con la cantidad de variabilidad genética presente y con la exactitud en su estimación.

Cuadro 4.1. Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 250 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.

F.V.	G.L.	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
EXP	4	124.89**	191.97**	19152.16**	15642.62**	55.52**	186.86**	1229.92**	492.59**	2.45*	3.60**	57.35**	67.04**	266.80**
REP	1	0.72	1.45	285.76	143.64	51.20	10.08	5.40	13.12	0.008	0	0.23	2.17	19.20
BLO(REP)	8	2.52	1.96	577.06	200.05	10.44	95.19	16.12	132.75*	1.66	0.85	17.05	2.36	9.19
HIB(EXP)	245	15.68**	18.37**	525.38**	274.21**	18.71*	67.27*	91.25**	92.63**	2.48**	1.50	15.12**	3.79**	12.62**
ERROR	241	1.52	2.21	336.04	106.17	14.87	51.61	31.34	60.63	0.98	0.87	8.76	1.20	7.16
TOTAL	499													
C.V.		1.59	1.89	7.43	9.53	39.82	53.79	35.92	37.06	22.90	19.76	20.03	6.37	3.59
MEDIA		77.76	78.62	246.44	108.10	9.68	13.35	15.58	21.01	4.33	4.72	14.77	17.19	74.42
MÁXIMO		85	86.5	284	140.5	27	41.5	42.5	47	7.5	7.5	21.971	22	82.5
MÍNIMO		70.5	71.5	183	56	8	8	8	8	1.5	2	5.629	13	65.5

*, **=significancia al 0.05 y al 0.01 de probabilidad respectivamente; EXP= Experimento; REP= Repeticiones; BLOQ/REP= Bloques dentro de Repeticiones; HIB/EXP= Híbridos dentro de Experimento; F.V= Fuentes de variación; G.L=Grados de libertad; FM=Floración macho; FH=Floración hembra; AP= Altura de Planta; AM=Altura de mazorca; AR = Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de planta; CM= Calificación de mazorca; REND= Rendimiento; HUM= Porcentaje de humedad; PHL= Peso hectolítrico.

Los valores mínimos de las variables FM y FH de los híbridos, fueron de 70.5 y 71.5 días, lo que sugiere que hay híbridos precoces que pueden ser aprovechados por los productores que busquen este tipo de madurez y que funcionen como opción en áreas con baja precipitación pluvial. Trejo *et al.*, (2023) indicaron que, La precocidad en el cultivo de maíz es una característica agronómica de gran importancia, ya que permite que las plantas completen su ciclo en menor tiempo, favoreciendo la adaptación a ambientes con periodos de crecimiento cortos, estrés hídrico o altas temperaturas.

Las variables como lo son altura de planta y altura de mazorca mostraron valores máximos de 284 y 140 cm y mínimos de 183 y 56 cm, esto indica que hay materiales que puedan servir de doble propósito (producción de grano o forraje), los materiales de estatura baja pueden ser utilizados para incrementar la densidad de población.

En las variables de acame de raíz y tallo, mala cobertura, plantas con *Fusarium*, calificación de planta y calificación de mazorca, sus valores son datos procesados, así en las variables de acame de raíz y tallo, mala cobertura y plantas con *Fusarium*, se pudo observar que, según los valores máximos y mínimos, es factible identificar híbridos sanos.

En cuanto a la CP y CM, los valores máximos observados fueron de 7.5 y 7.5, esto indica que hay materiales con un buen porte (apariencia fenotípica) y con sanidad de mazorcas, buen tamaño y con características favorables.

Para rendimiento (REND), presentaron un valor máximo de 21.9 t ha⁻¹ lo que indica que existen híbridos con buen potencial de rendimiento, la cual la media fue de 14.7 t ha⁻¹ lo que es un rendimiento aceptable, debido a que está muy por arriba de la media nacional que en el año del 2025 fue de 3.5 t ha⁻¹ (SIAP, 2025).

Se detectaron híbridos con atributos favorables, en cuestión del peso hectolítrico y humedad para estas características, lo que indica que entre mayor humedad tenga el grano, también el peso hectolítrico es mayor. Moya, (2024), observo en sus ensayos realizados que, a mayor humedad, el peso específico arroja un valor más elevado.

4.2. Análisis de Varianza por Experimento (experimento 1)

En el Cuadro 4.2, La significancia en las repeticiones (REP) sugiere que el diseño de bloques no logró completamente manejar la variabilidad del terreno. En características físicas del grano como el PHL ($P \leq 0.05$), ligeras variaciones en la disponibilidad de nitrógeno o de humedad en el suelo entre una repetición y otra afectan el llenado del endospermo.

La notable variación entre repeticiones en los caracteres físicos del grano indica que factores ambientales no controlados, como la fertilidad del suelo o la humedad remanente del suelo, tuvieron un impacto más significativo que la diversidad genética en la expresión de la densidad del grano (López-Morales *et al.*, 2021).

Para la fuente de variación de bloques dentro de repeticiones BLOQ(REP), hubo diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) en la FM y FH, esto indica que existe una heterogeneidad ambiental en el lote experimental. Según García-Rodríguez *et al.*, (2021), este patrón respalda el diseño experimental utilizado, facilitando una estimación más exacta de los efectos genotípicos al diferenciar la variabilidad espacial del suelo.

En cuanto en fuente de variación en híbridos (HIB) las variables FM, FH, MC, CM, REND, HUM, mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$), mientras que, en AM, AT, CP hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$), esto indica que existe una amplia variabilidad genética en los materiales evaluados.

Cuadro 4.2. Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 50 híbridos de porte normal evaluadas durante la primavera-verano del 2023.

F.V.	G.L.	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
REP	1	0.49	3.61	182.25	11.56	1.44	25	44.89	11.56	0.04	1.21	1.89	2.25	51.84*
BLO(REP)	8	3.41**	5.22**	314.77	48.72	4.66	29.93	6.06	86.49	1.49	0.5	2.46	0.8	6.81
HIB	49	20.24**	23.81**	508.71	110.65*	6.54	62.10*	84.64**	83.74	2.61*	1.68**	12.93**	2.74**	5.54
ERROR	41	0.96	1.58	763.58	63.47	6.61	37.4	17	57.37	1	0.56	4.3	0.67	5.11
TOTAL	99													
C.V.		1.25	1.6	11.08	6.87	28.45	47.63	30.34	37.2	22.22	14.95	13.33	4.95	2.99
MEDIA		78.11	78.69	249.25	115.9	9.04	12.84	13.59	20.36	4.5	5.03	15.56	16.61	75.5
MÁXIMOS		85	86	278	135	16	27	42.5	40	7.5	7.5	21.467	20	78.5
MÍNIMOS		71.5	72	218	97.5	8	8	8	8	2	3	9.856	14	71

*, **=significancia al 0.05 y al 0.01 de probabilidad respectivamente; REP= Repeticiones; BLOQ/REP= Bloques dentro de Repeticiones; HIB= Híbridos; G.L.=Grados de libertad; FM=Floración macho; FH=Floración hembra; AP= Altura de Planta; AM=Altura de mazorca; AR = Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de planta; CM= Calificación de mazorca; REND= Rendimiento; HUM= Porcentaje de humedad; PHL= Peso hectolítrico.

En relación a esto, Sierra-Macías *et al.*, (2023) afirman que la existencia de significancia estadística en los cuadrados medios de los genotipos es un indicador clave de la divergencia genética y la capacidad combinatoria de los progenitores. De acuerdo con estos autores, esta variabilidad constituye la esencia del éxito de los programas de mejoramiento, puesto que posibilita la discriminación y selección de híbridos que poseen características agronómicas superiores y estabilidad en el rendimiento.

La producción promedio de los híbridos analizados alcanzó 15.56 t ha^{-1} , con un mínimo de 9.856 t ha^{-1} y un máximo de 21.467 t ha^{-1} .

La diferencia detectada entre el valor mínimo y máximo (11.611 t ha^{-1} de diferencia) sugiere una notable variabilidad en la productividad de los genotipos analizados. Esta variación indica la existencia de diferencias genéticas significativas que facilitan la identificación de materiales con mejor potencial de producción en las condiciones experimentales.

Cuadro 4.3. Cuadrados medios del análisis de varianza en 13 variables agronómicas de 150 híbridos formados a partir de líneas de porte normal y líneas de porte enano evaluadas durante la primavera-verano del 2023.

F.V.	G.L.	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
REP	1	0.05	0.01	352.08	170.25	74	24.65	0.85	4.32	0.12	0.03	0.64	0.33	2.61
BLO(REP)	8	1.49	1.25	957.48*	302.58	12.01	69.49	55.65	121.56	2.38	0.7	17.55	2.82	10.29
HIB	149	15.49**	17.66**	469.37**	267.38**	24.93	72.52	122.59**	90.40	2.26**	1.23	13.10	4.09**	14.96**
ERROR	141	1.84	2.63	269.88	130.48	20.93	62.44	37.78	65.8	1.06	1.01	10.84	1.43	7.27
TOTAL	299													
C.V.		1.76	2.08	6.48	10.11	45.44	56.85	37.07	38.76	23.86	21.45	22.25	7.05	3.6
MEDIA		77.07	77.86	253.39	112.89	10.07	13.9	16.58	20.92	4.33	4.69	14.79	16.96	74.86
MÁXIMOS		84.5	86	284	140.5	27	41.5	41.5	39.5	7	7	20.78	20.5	82.5
MÍNIMOS		70.5	71.5	209	73	8	8	8	8	1.5	2.5	7.14	13	65.5

*, **=significancia al 0.05 y al 0.01 de probabilidad respectivamente; REP= Repeticiones; BLOQ/REP= Bloques dentro de Repeticiones; HIB= Híbridos; G. L.=Grados de libertad; FM=Floración macho; FH=Floración hembra; AP= Altura de Planta; AM=Altura de mazorca; AR = Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de planta; CM= Calificación de mazorca; REND= Rendimiento; HUM= Porcentaje de humedad; PHL= Peso hectolítrico.

4.3. Análisis de Varianza por Experimento (experimento dos, tres y cuatro).

En el Cuadro 4.3, se tiene el análisis de varianza de las 13 variables evaluadas de 150 híbridos experimentales, de la cual, los resultados indicaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre los híbridos para las variables FM, FH, AP, AM, MC, CP, HUM y PHL. Esto sugiere la presencia de variabilidad genética entre los híbridos evaluados, lo cual es fundamental en programas de mejoramiento genético, ya que permite identificar materiales con características agronómicas favorables. Las variables relacionadas con la precocidad, como la floración macho y floración hembra, mostraron diferencias significativas entre híbridos, lo que indica variabilidad en el tiempo de desarrollo reproductivo

de los materiales evaluados. De igual manera, las diferencias observadas en altura de planta y altura de mazorca reflejan la diversidad genética presente en los híbridos formados a partir de líneas de porte normal y porte enano, lo que influye directamente en la estructura de la planta.

Por otro lado, variables AR, AT, PF, CM y REND no presentaron diferencias significativas entre híbridos.

En cuanto a las medias generales del experimento, los híbridos presentaron una media para floración de 77.07 días para floración macho y 77.86 días para floración hembra, mientras que la altura promedio de planta fue de 253.39 cm y la altura de mazorca de 112.89 cm. Esto indica que los híbridos muestran comportamientos agronómicos diferentes, resultado de la recombinación genética entre los dos grupos heteróticos empleados.

Hallauer *et al.*, (2010), mencionaron que, en el mejoramiento genético del maíz los patrones heteróticos se utilizan para agrupar líneas endogámicas que presentan similitud genética dentro del grupo, pero que al cruzarse con líneas de un grupo distinto producen híbridos con mayor vigor híbrido o heterosis.

En esta investigación, la hibridación entre líneas de porte normal y líneas de porte enano permitió la creación de combinaciones genéticas diversas, lo que justifica la existencia de diferencias notables en aspectos morfológicos como la floración y la altura de las plantas. Las diferencias observadas en altura de planta y altura de mazorca pueden atribuirse a la interacción genética entre ambos grupos heteróticos, ya que la estructura de la planta está influenciada por los progenitores utilizados en los cruzamientos (Hallauer *et al.*, 2010).

Cuadro 4.4. Cuadrados medios del análisis de varianza de 13 variables agronómicas de 50 híbridos de porte enano evaluados durante la primavera-verano del 2023.

FV	GL	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
REP	1	2.56	1	353.44	57.76	0.01	12.25	9.61	1.21	0.36	1.96	2.82	7.84*	29.16
BLO(REP)	8	1.35	0.79	164.94	109.8	6.88	60.87	26.36	45.37	0.54	0.92	11.2	1.53*	4.91
HIB	49	11.15**	14.67**	684.95**	343.40**	10.31	49.85	79.69**	134.47*	2.22**	2.10**	24.7**	4.27**	14.57*
ERROR	41	0.89	1.23	101.04	58.62	5.66	37.25	22.04	49.08	0.56	0.74	7.04	0.7	7.89
TOTAL	99													
CV		1.18	1.37	4.51	8.9	25.96	49.9	32.18	31.97	18.01	19.13	19.03	4.54	3.89
MEDIA		79.5	80.84	222.78	85.94	9.17	12.23	14.59	21.91	4.18	4.52	13.94	18.46	72.04
MAXIMOS		85	86.5	272	119	20.5	30	34	47	7	6.5	21.971	22	78.5
MINIMOS		72	73	183	56	8	8	8	8	2	2	5.629	15	65.5

*, **=significancia al 0.05 y al 0.01 de probabilidad respectivamente; REP= Repeticiones; BLOQ/REP= Bloques dentro de Repeticiones; HIB= Híbridos; G. L=Grados de libertad; FM=Floración macho; FH=Floración hembra; AP= Altura de Planta; AM=Altura de mazorca; AR = Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de planta; CM= Calificación de mazorca; REND= Rendimiento; HUM= Porcentaje de humedad; PHL= Peso hectolítrico.

4.4. Análisis de Varianza por Experimento (experimento cinco)

El Cuadro 4.4, de la fuente de varianza repetición (REP) fue altamente significativa ($P \leq 0.01$) para el porcentaje de humedad del grano (HUM), lo que quiere decir que hubo diferencia entre los bloques experimentales para esa variable. El contenido de humedad del grano está influenciado, en gran parte, por las condiciones climáticas durante su madurez y recolección, y puede cambiar de manera notable incluso en terrenos adyacentes a causa de microambientes (Ejaz *et al.*, 2024).

En BLO(REP) fue significativo para humedad (H) ($P \leq 0.01$), esto quiere decir que dentro de cada repetición existieron diferencias entre bloques, Investigaciones recientes han evidenciado que ligeras variaciones en el nivel de humedad del suelo provocan diferencias en la velocidad de secado del grano y en el contenido de humedad final a la cosecha (Andrade *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023)

La fuente de variación híbrido (HIB) presentó en la mayoría diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$), incluyendo altura de planta, altura de mazorca, mala cobertura, calificación de planta, calificación de mazorca, rendimiento, porcentaje de humedad. Así mismo se presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en plantas con *fusarium* y peso hectolítrico. Estos resultados muestran la presencia de variabilidad genética entre los híbridos analizados, lo que revela diferencias en su desempeño agronómico y capacidad de producción.

4.5. Pruebas de Rango Múltiple

En el Cuadro 5, se presentan los valores de las medias de los cinco experimentos evaluados en el año 2023, lo cual es la siguiente:

En la floración hembra (FH) hubo diferencia entre los cinco experimentos, los experimentos tres y cuatro fueron los más precoces en cuanto a los días de floración, esto es buena opción si se busca materiales de ciclos cortos; mientras que el experimento 9 fue el más tardío con 80.84 días.

Respecto a altura de planta (AP) el experimento que mostro la media más alta fue de 259.34 cm en la cual corresponde en el experimento dos, mientras que los experimentos uno, dos y cuatro fueron estadísticamente iguales a lo que corresponde de porte intermedio ya que corresponden de la misma letra y en porte bajo queda lo que es el experimento cinco, con 222.78 cm, lo cual es una buena opción sí que quiere evitar lo que son los acames.

Así mismo, en plantas con *Fusarium* (PF) el que presento menor porcentaje en cuanto a la incidencia del patógeno fue el experimento 2 con 17.96 % mientras que el experimento 5 fue el más susceptible, por lo que las condiciones ambientales favorecieron o limitaron la presencia del patógeno.

Cuadro 5. Pruebas de rango múltiples de 13 variables agronómicas evaluadas en cinco experimento durante la primavera-verano de 2023.

EXP	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)
1	78.11 B	78.69 B	249.25 B	115.90 A	9.04 B	12.84 AB	13.59 B
2	77.57 C	78.69 B	259.34 A	114.48 A	9.27 AB	12.22 B	14.70 B
3	76.65 D	77.34 C	250.76 B	112.8 AB	10.73 A	15.38 A	13.28 B
4	77.00 D	77.57 C	250.09 B	111.36 B	10.21 AB	14.10 AB	21.76 A
5	79.50 A	80.84 A	222.78 C	85.94 C	9.17 B	12.23 B	14.59 B
EXP	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)	
1	20.36 BC	4.50 A	5.03 A	15.5633 A	16.61 CD	75.50 AB	
2	17.96 C	4.39 A	4.67 AB	15.03 AB	17.51 B	73.62 C	
3	24.03 A	4.16 A	4.65 B	14.0080 B	16.44 D	76.16 A	
4	20.79 BC	4.45 A	4.75 AB	15.3457 A	16.93 C	74.82 B	
5	21.91 A	4.18 A	4.52 B	13.9436 B	18.46 A	72.04 D	

EXP= Experimentos; FM= Floración macho; FH= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; AR= Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de la planta; CM= Calificación de la mazorca; REND= Rendimiento; HUM= Humedad; PHL= Peso Hectolitro; Valores con la misma letra son estadísticamente iguales.

En cuanto a rendimiento (REND), los experimentos 1 y 4 no presentaron diferencias estadísticas, en la cual fueron los que presentaron mayor rendimiento (15.5 t ha⁻¹ y 15.3 t ha⁻¹), mientras que el menos rendidor fue el experimento 5 con apenas (13.9 t ha⁻¹) y a esto se debe al tipo de porte que tiene la planta.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza combinados e individuales de los experimentos, en la mayoría de las características de las variables evaluadas se detectó variabilidad, la cual complica la selección de los

híbridos considerando todas las variables conjuntas, para ellos se emplea el método de índice de selección.

4.6. Índice de Selección a Partir del Grafico Biplot

El índice de selección es una herramienta adecuada para identificar híbridos destacados y de buen desempeño agronómico, ya que abarca simultáneamente todas las características deseadas; de lo contrario, resultaría complicado seleccionar individualmente para cada característica de los materiales. Para desarrollar el IS, es necesario analizar el agrupamiento natural presente en las variables, eligiendo aquella que sea más relevante desde el punto de vista agronómico y económico, que esté correlacionada con las demás variables y las represente, dichas agrupaciones se visualizan mediante el Gráfico Biplot con la ayuda del modelo Multivariado de Componentes Principales.

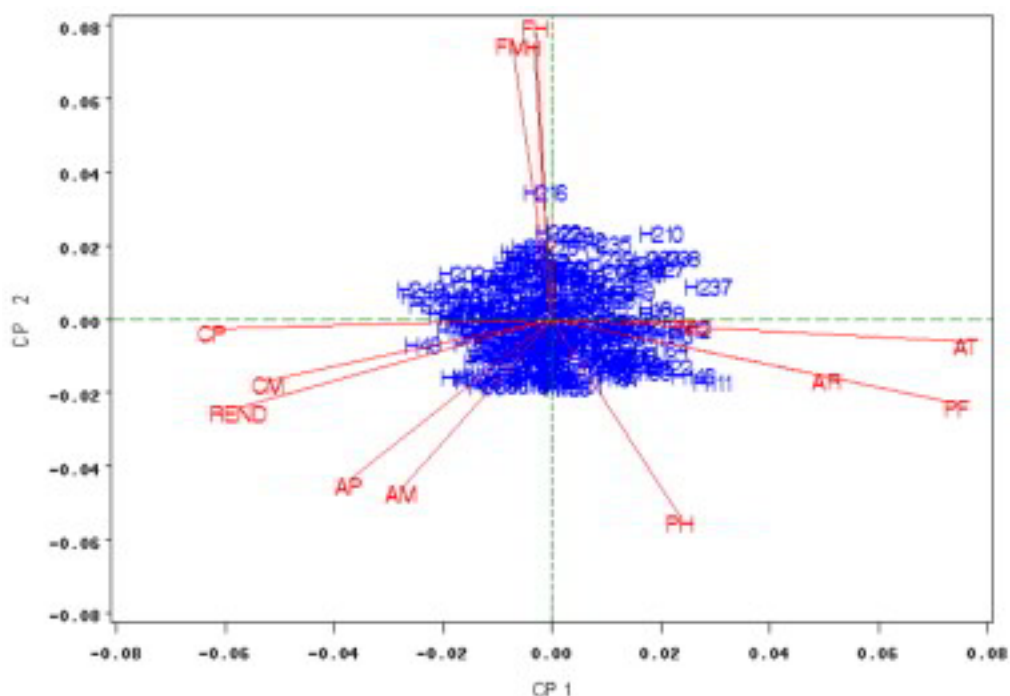
El análisis de componentes principales es una técnica de análisis multivariado que facilita la reducción de un gran conjunto de variables mediante la creación de nuevas variables no correlacionadas llamadas componentes principales. El análisis, mediante un gráfico de dispersión facilita reconocer la relevancia de cada variable en la interpretación de la variación del conjunto de datos (Vallejo *et al.*, 2005), así como las correlaciones entre ellas determinadas por la magnitud del ángulo entre las variables.

4.7. Gráfico Biplot de Variables Correlacionadas

En primer lugar, se observó el agrupamiento natural de las variables para entender la correlación que existen entre ellas, para ello se utilizó el modelo Multivariado de Componentes Principales y su respectivo Gráfico Biplot.

En la Figura 4.1, se muestra el análisis grafico de los 250 híbridos experimentales evaluados de los 5 experimentos de los cuales se puede apreciar cuatro cuadrantes de los ejes cartesianos en la cual están presentes las 13 variables agronómicas. En

el primer agrupamiento se encuentra la variable floración macho y hembra; en este grupo se encuentran las variables asociadas con la precocidad en la cual se seleccionó floración hembra por la correlación que tiene con la otra variable de este grupo, ya que además de generar híbridos con un mayor rendimiento también se busca materiales que cuentan con precocidad.



FM= Floración macho; FH= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM=Altura de mazorca; AR=plantas con Acame de Raíz; AT=plantas con Acame de tallo; MC=porcentaje de mazorcas con Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP.=Calificación de planta; CM.=Calificación de mazorca; REND. = Rendimiento en $t\ ha^{-1}$; PH. = Peso hectolítrico; HUM. = Humedad.

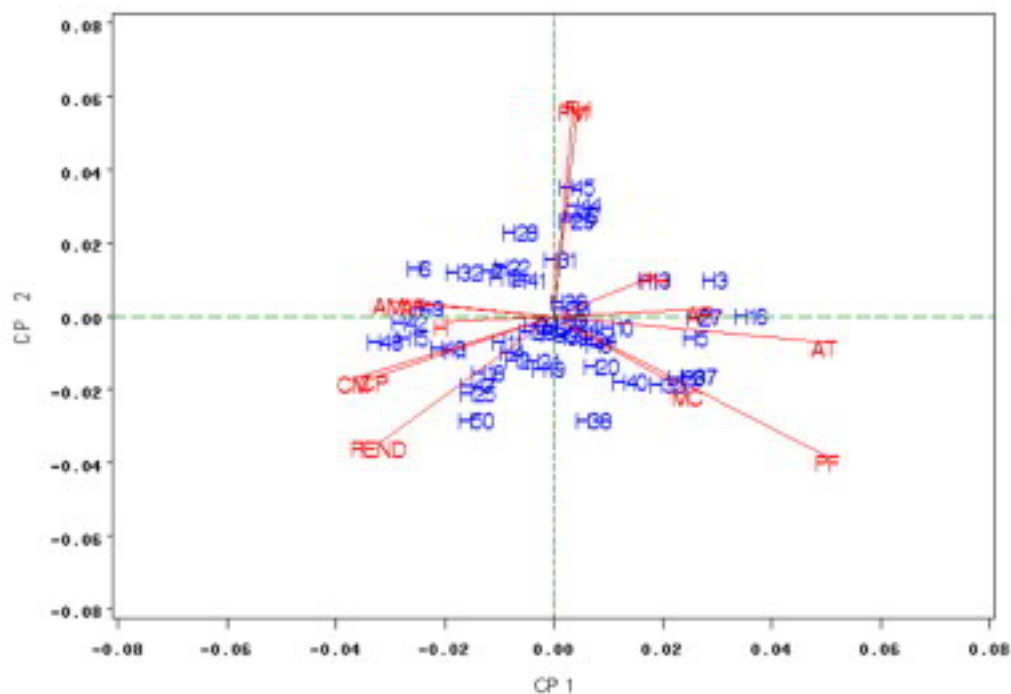
Figura 4.1. Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 250 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.

En el segundo grupo se correlacionaron las variables asociadas con el rendimiento, las cuales fueron; calificación de planta, calificación de mazorca, rendimiento, altura de planta y altura de mazorca, en la cual mediante el índice de selección se eligió respectivamente la variable de rendimiento, esto se debe principalmente por el investigador, ya que se busca materiales con un alto potencial de producción o igual a los que ya están en el mercado.

Hablando del tercer agrupamiento, se correlacionaron las variables relacionadas con sanidad, las cuales fueron calificación de mazorca, acame de tallo, acame de raíz, plantas con *Fusarium* y peso hectolítrico, en donde se seleccionó la variable PF, por el hecho de obtener materiales que cuenten con una mejor sanidad.

4.8. Gráfico Biplot del Experimento Uno

En la Figura 4.2, se observa el análisis gráfico de 50 híbridos evaluados correspondientes del experimento uno, en la cual se trabajó con plantas de porte normal, donde se presentan las 13 variables agronómicas. Dentro del primer grupo se obtiene las variables floración macho y floración hembra; en este grupo se encuentran las variables asociadas con la precocidad, en la cual se seleccionó la floración hembra, para tener materiales precoces.



FM= Floración macho; FH= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM=Altura de mazorca; AR=plantas con Acame de Raíz; AT=plantas con Acame de tallo; MC=porcentaje de mazorcas con Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP.=Calificación de planta; CM.=Calificación de mazorca; REND. = Rendimiento en $t\ ha^{-1}$; PH. = Peso hectolítrico; HUM. = Humedad.

Figura 4.2. Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 50 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.

Posteriormente, el segundo grupo estuvieron correlacionadas las variables altura de mazorca, altura de planta, humedad, rendimiento, calificación de planta, y calificación de mazorca de la cual, estas variables están asociadas en el rendimiento, ya que esta se seleccionó como la variable más representativa. En el tercer grupo se encuentran plantas con *Fusarium*, peso hectolítrico, acame de raíz, acame de tallo y mala cobertura, donde se seleccionó plantas con *Fusarium* en consideración al índice de selección, debido que se buscan fenotipos que cuentan con estas características asociadas con la sanidad.

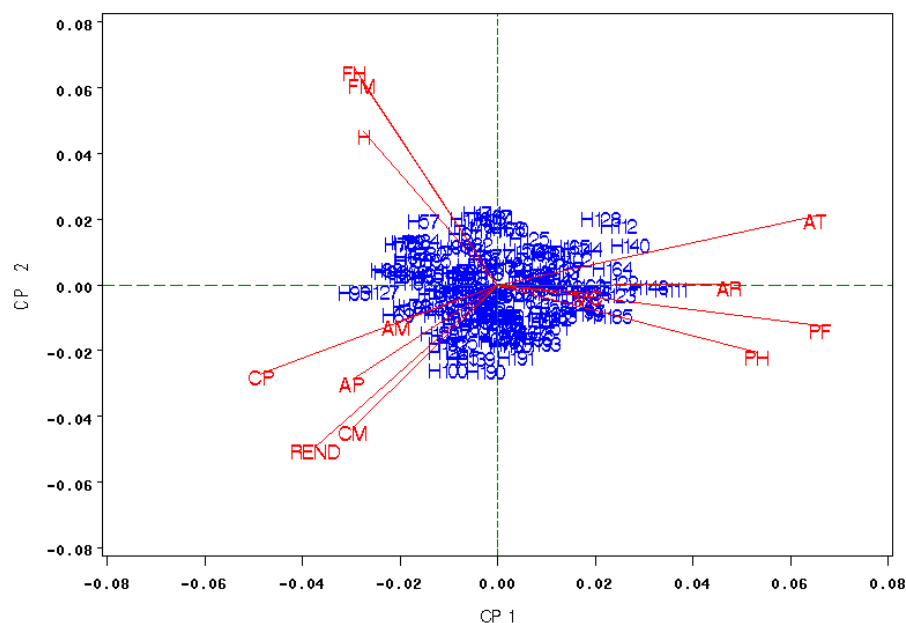
4.9. Gráfico Biplot de los Experimento Dos, Tres y Cuatro

En esta Figura 4.3, se muestran la Gráfica Biplot sobre el análisis de 150 híbridos experimentales a partir de la cruce de plantas de porte normal por porte enano, en la cual se obtuvo tres agrupamientos; en el cuadrante dos se tiene lo que es floración macho, floración hembra y humedad, en la cual correlacionan con la precocidad.

Estrada *et al.*, (2023) dice que, en maíz, los genotipos que presentan floración tardía tienden a completar más tarde el periodo de llenado de grano, lo que ocasiona que al momento de la cosecha el grano conserve un mayor contenido de humedad. Por el contrario, los híbridos precoces florecen antes y tienen más tiempo para perder humedad antes de la cosecha, lo que resulta en valores menores de humedad del grano. En el segundo grupo, correspondiente del cuadrante 3 se observa las correlaciones para rendimiento, incluyendo variables como altura de mazorca, calificación de planta, altura de planta y calificación de mazorca; la variable de rendimiento está más asociada con características morfológicas de la planta, por lo consiguiente fue seleccionada para su mejora.

Por último, se tiene el grupo tres donde se agruparon las variables mala cobertura, plantas con *Fusarium*, acame de tallo, acame de raíz y peso hectolítrico, estas

variables estas asociadas con sanidad, de la cual fue seleccionado PF como variable representativa.



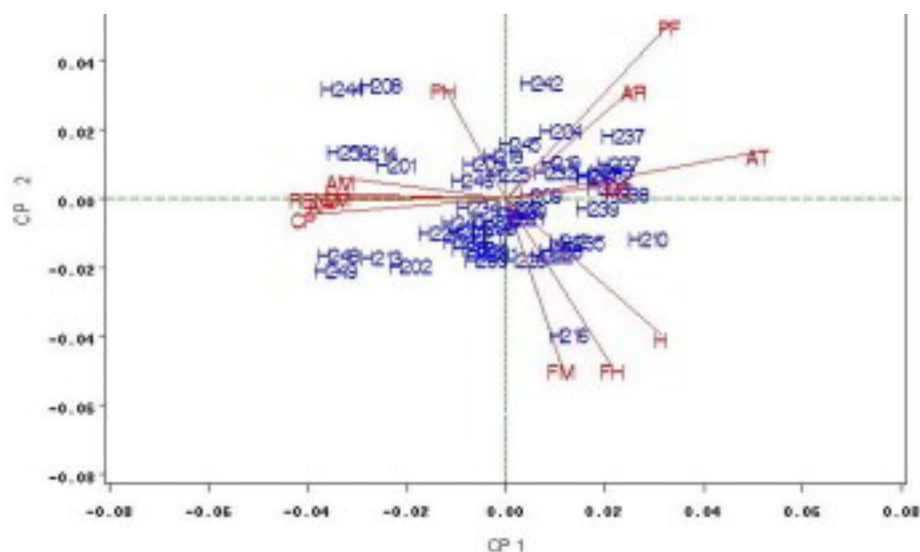
FM= Floración macho; FH= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM=Altura de mazorca; AR=plantas con Acame de Raíz; AT=plantas con Acame de tallo; MC=porcentaje de mazorcas con Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP.=Calificación de planta; CM.=Calificación de mazorca; REND. = Rendimiento en t ha⁻¹; PH. = Peso hectolítrico; HUM. = Humedad.

Figura 4.3. Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 150 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.

4.10. Gráfico Biplot del Experimento Cinco

Para la Figura 4.4, se muestra la gráfica del análisis de 50 híbridos experimentales generados a partir de plantas porte enano, donde se puede observar las 13 variables evaluados. En este apartado se seleccionaron 4 variables de importancia, las cuales fueron FH, REND, PF y AP. En el análisis Biplot se observó una asociación positiva entre el rendimiento (REND) y la altura de planta (AP), ya que ambos vectores se orientaron en una dirección similar dentro del primer componente principal. Esta relación sugiere que los híbridos con mayor altura de planta tendieron a presentar mayores niveles de rendimiento. Guamán *et al.*, (2020) mencionaron que la altura de planta es un carácter morfológico que puede estar asociado con el

rendimiento del cultivo, debido a que plantas de mayor tamaño presentan mayor desarrollo vegetativo y producción de biomasa, lo que favorece la acumulación de asimilados hacia el grano y, por consiguiente, un mayor potencial productivo. En el segundo grupo correlacionaron las variables FM, FH y HUM, la cual estos están asociados con la precocidad, eligiendo FH como atributo de importancia para generar híbridos más precoces. El último grupo se asocia con la sanidad del cultivo, teniendo PF, AR, AT y MC, el variable de interés se seleccionó PF.



FM= Floración macho; FH= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM=Altura de mazorca; AR=plantas con Acame de Raíz; AT=plantas con Acame de tallo; MC=porcentaje de mazorcas con Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP.=Calificación de planta; CM.=Calificación de mazorca; REND. = Rendimiento en t ha⁻¹; PH. = Peso hectolítrico; HUM. = Humedad.

Figura 4.4. Gráfico Biplot generado a partir de 13 variables de 50 híbridos evaluados durante la primavera-verano del 2023.

4.11. Índice de Selección

El índice de selección se calculó mediante repetición, y los valores obtenidos de los índices se emplearon para realizar un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey ($p=0.05$). Los híbridos seleccionados fueron aquellos que alcanzaron un menor índice de selección. Según Barreto *et al.*, (1991), los valores del índice se determinan por distancias euclidianas, lo que implica que los híbridos con valores más bajos son vistos como híbridos superiores.

En la Cuadro 6, se muestran la selección de híbridos mediante el de IS, la cual permitió identificar materiales que presentan un desempeño agronómico equilibrado. En este sentido, el híbrido 48 (ANTÍLOPE) destacó principalmente por presentar el mayor rendimiento (21.2 t ha^{-1}) y una baja incidencia de plantas con *Fusarium* (17.4 %), lo que sugiere una combinación favorable entre productividad y tolerancia a enfermedades. Estas características son particularmente relevantes en programas de mejoramiento genético, donde el objetivo es seleccionar genotipos que mantengan altos niveles de producción sin comprometer la sanidad del cultivo.

Por otra parte, el híbrido 15 mostró el menor porcentaje de plantas con *Fusarium* (16.6 %) y un rendimiento competitivo de 19.0 t ha^{-1} , lo cual indica que este material posee una buena respuesta sanitaria, característica que contribuye a la estabilidad del rendimiento bajo condiciones de presión de esta enfermedad.

En cuanto a la floración hembra, los valores registrados oscilaron entre 72.1 y 79.8 días, lo que sugiere que los híbridos seleccionados corresponden a materiales de ciclo precoz. El híbrido 50 presentó la floración más temprana (72.1 días), lo cual puede representar una ventaja en ambientes donde es necesario evitar condiciones de estrés durante la etapa reproductiva del cultivo.

El híbrido 47 presentó un índice de selección (IS) de 5.8, lo que indica un comportamiento agronómico favorable dentro de los materiales evaluados. En cuanto a precocidad, registró 75.6 días a FM y 76.6 días a FH, mostrando una adecuada sincronía floral. Respecto a las características morfológicas, presentó una altura de planta de 253.0 cm y una altura de mazorca de 128.7 cm, valores que reflejan una arquitectura de planta adecuada. En términos productivos, destacó por un rendimiento de 20.0 t ha^{-1} , acompañado de 17.2 % de humedad de grano y un peso hectolítrico de 76.0 kg hL^{-1} , lo que indica una buena calidad de grano.

En contraste, el híbrido 48 presentó una floración ligeramente más tardía (79.8 días), lo cual podría estar asociado con una mayor acumulación de biomasa y, en consecuencia, con su mayor rendimiento. Cerron y Sahagún (2005) menciona que los índices de selección permiten separar genotipos con base en la evaluación simultánea de varios caracteres agronómicos, siendo un método eficiente para maximizar la ganancia genética cuando se desean mejorar múltiples características al mismo tiempo.

Cuadro 6. Híbridos seleccionados del experimento uno mediante el valor de índice de selección.

HIB	GENEALOGÍA	IS	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
50	P3265W	5.6	72.1	72.1	275.6	110.2	8.8	8.8	11.8	21.4	5.9	5.3	18.7	16.2	73.8
47	(MLxM46)xML-3* (LPxPN308)xM23-M32-2-B-3	5.8	75.6	76.6	253.0	128.7	8.6	10.1	22.4	21.1	6.7	4.9	20.0	17.2	76.0
48	ANTILOPÉ	6.4	79.7	79.8	275.2	120.0	8.4	7.6	8.5	17.4	6.4	7.5	21.2	16.7	75.3
15	(LP-8-3-A-AxM23)xM23-1-B-3* PV-11-0704⊗2	6.8	77.0	76.9	280.9	136.0	8.0	6.0	8.4	16.6	4.8	6.1	19.0	15.5	77.0
25	(232xlinea C)xC-2-3* MZCO⊗14-2	6.9	73.9	74.0	251.7	124.0	8.0	8.6	10.5	24.0	4.3	5.6	17.9	17.6	73.3

HIB=Híbridos; IS= índices de selección; FM= Floración macho; FF= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; AR= Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de la planta; CM= Calificación de la mazorca; REND= Rendimiento en t ha⁻¹; PHL= Peso Hectolítrico; HUM= Humedad

Cuadro 7. Híbridos seleccionados de los experimentos dos, tres y cuatro mediante el valor de índice de selección.

HIB	GENEALOGÍA	IS	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
107	(M13xv52)xM15-3-1*MD-6	4.1	75.7	75.9	265.4	117.2	8.5	10.5	27.0	14.6	6.2	5.4	17.3	17.3	76.3
159	(P X PN) -16 -1-1*MD-47	4.4	75.6	75.2	255.6	97.2	7.9	7.9	24.4	17.4	5.4	6.4	18.7	18.7	73.8
121	(M13x10-11)xM13-2-4*MLS4-1M	4.5	74.5	76.7	267.7	138.0	8.0	8.9	8.1	14.4	4.8	5.5	18.5	15.7	77.6
190	MF2C-3*ANT-58-20	5.5	71.7	71.6	255.3	95.7	8.2	8.0	16.8	17.1	4.6	5.8	16.8	14.5	73.3
200	P3265W	5.5	73.5	74.0	259.8	112.0	8.6	18.7	20.5	19.0	4.9	5.1	16.8	15.7	73.3
150	P3268W	5.7	73.1	73.1	252.9	102.2	9.5	10.3	8.5	19.5	5.2	3.9	15.3	16.2	75.7
139	M23-1*255-18-19	5.7	72.8	73.7	265.0	112.5	7.8	6.7	11.5	22.6	5.6	5.1	16.5	15.5	75.3
55	(S3-21-4xM35)Xm35-4-B-2*MD-19	5.9	74.5	75.1	276.5	125.5	12.1	13.8	19.7	17.5	4.6	6.1	20.1	16.6	74.5
192	MF2C-4*M3-2	6.1	75.5	75.5	257.8	114.5	9.1	9.7	24.5	15.5	6.9	5.1	17.8	15.7	74.3
154	LP x PV) - 11-2*MF2C-32	6.2	73.6	74.2	250.2	104.6	8.2	10.7	19.6	17.7	4.7	4.8	16.0	17.5	75.0
100	P 3268W	6.6	72.1	72.1	266.4	107.7	9.0	6.8	15.5	16.5	6.2	5.4	18.3	16.7	73.7
197	MF2C-7*(S3-21-4xM35)Xm35-4-B-2	6.7	75.0	75.7	246.7	112.5	18.5	22.9	13.6	18.9	3.3	4.5	15.4	15.2	79.6
116	(M13xLínea C)xC-2-2*MLS4-1M	6.8	77.5	77.5	264.3	123.0	8.6	22.2	7.5	21.5	4.4	6.1	17.6	18.2	68.3
196	MF2C-6*(S3-21-4xM35)Xm35-4-B-2	6.9	74.6	74.6	253.5	117.7	14.6	16.2	22.9	22.1	4.8	5.5	16.6	16.2	78.5
120	(M13x10-11)xM13-2-3*MLS4-1M	7.1	74.4	75.5	246.9	115.4	7.6	9.2	16.8	16.6	4.3	4.4	14.2	16.0	75.8

HIB=Híbridos; IS= índices de selección; FM= Floración macho; FF= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; AR= Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de la planta; CM= Calificación de la mazorca; REND= Rendimiento en t ha⁻¹; PHL= Peso Hectolítrico; HUM= Humedad.

En el Cuadro 7, los híbridos 55, 159, 121 y 100 superan las 18 t ha⁻¹. Sin embargo, el híbrido 55, siendo el más productivo con 20.1 t ha⁻¹, presenta un riesgo de Acame de Tallo (AT) del 13.8%, el segundo más alto del grupo.

El híbrido 121 destaca positivamente, a pesar de tener una de las plantas más altas (267.7 cm), sus niveles de acame (AR: 8.0%; AT: 8.9%) son significativamente menores que los del híbrido 55, sugiriendo una mejor calidad de tallo y anclaje radicular. La precocidad influye directamente en el Peso Hectolítrico.

Los híbridos 190, 150 y 139 son los híbridos más precoces (71-73 días). Aunque esto reduce el ciclo de cultivo, se observa que sus rendimientos son moderados (15.3 a 16.8 t ha⁻¹). El híbrido 139 presenta el mayor índice de *Fusarium* (22.6%). Esto correlaciona con una CM de 5.1, indicando que el *Fusarium* afecta la apariencia y calidad final del grano. Los híbridos 121 y 107 mantienen niveles de *Fusarium* bajos (<15%). En particular, el híbrido 121 combina baja incidencia con un PHL alto (77.6), lo que lo posiciona como un material con excelente sanidad de grano.

El híbrido 107 es el primero de la lista con un índice de selección al 4.1, no por ser el más rendidor, sino por su equilibrio: tiene buen PHL (76.3), bajo porcentaje de plantas con *Fusarium* (14.6%) y una altura de mazorca (AM) proporcional (117 cm), lo que facilita la cosecha. Por el contrario, el híbrido 120 se encuentra al final debido a que combina el rendimiento más bajo (14.2 t ha⁻¹) con una mala cobertura de mazorca (16.8%), lo que expone el grano a plagas y humedad.

En el Cuadro 8, el índice de selección permitió identificar los cinco híbridos sobresalientes dentro del experimento 5, los cuales presentaron valores de índice entre 8.9 y 10.8. El mayor valor correspondió al híbrido 22, seguido de, 15, 9 y 14.

En cuanto al rendimiento, el híbrido 14 presentó el valor más alto con 20.8 t ha⁻¹, superando al resto de los híbridos evaluados. Sin embargo, su índice de selección fue menor en comparación con otros materiales, lo que sugiere que, aunque posee alto potencial de rendimiento, algunas características agronómicas como mala cobertura y plantas con *Fusarium* pudieron influir en su posición dentro del índice.

Por otro lado, los híbridos 15 y 7 presentaron rendimientos intermedios de 16.4 y 15.5 t ha⁻¹, respectivamente, mostrando un equilibrio favorable entre productividad y otras variables agronómicas evaluadas y por último tenemos a los híbridos 4 y 22, de la cual fueron los menos rendidores.

Respecto a las variables de precocidad, los días a floración macho y hembra oscilaron entre 75.5 y 81.1 días, lo que indica que los híbridos evaluados presentan ciclos relativamente similares. Esta proximidad en el periodo de floración es importante en programas de mejoramiento, ya que refleja estabilidad en el desarrollo reproductivo y facilita la sincronización floral.

Cuadro 8. Híbridos seleccionados del experimento cinco mediante el valor de índice de selección.

HIB	GENEALOGÍA	IS	FM (d)	FH (d)	AP (cm)	AM (cm)	AR (%)	AT (%)	MC (%)	PF (%)	CP (1-9)	CM (1-9)	REND (t ha ⁻¹)	HUM (%)	PHL (kg hl ⁻¹)
14	MD-19*M6-3	8.9	75.5	76.0	235.4	99.2	8.5	9.2	18.1	17.6	6.0	5.8	20.8	18.0	74.0
4	(MLxL1C)xML-1-1*MF2C-5	9.5	75.8	77.7	183.5	58.5	14.3	12.2	15.5	22.6	3.6	4.6	14.4	18.5	75.8
15	MD-23*MF2C-31	9.8	79.2	80.8	203.2	65.1	7.9	9.6	20.9	12.2	4.3	4.4	16.4	18.1	73.2
7	MF2C-13*MF2C-1	10.7	80.4	80.3	210.4	86.6	7.6	11.9	12.5	17.8	5.1	6.0	15.5	18.9	69.9
22	MD-26*MF2C-21	10.8	80.1	81.1	191.0	65.2	9.1	10.7	11.9	14.6	3.3	5.0	14.4	20.2	67.5

HIB=Híbridos; IS= índices de selección; FM= Floración macho; FF= Floración hembra; AP= Altura de planta; AM= Altura de mazorca; AR= Acame de raíz; AT= Acame de tallo; MC= Mala cobertura; PF= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de la planta; CM= Calificación de la mazorca; REND= Rendimiento en t ha⁻¹; HUM= Humedad; PHL= Peso Hectolítico.

En relación con las características fitosanitarias, el porcentaje de plantas afectadas por *Fusarium* varió entre 12.2 % y 22.6 %, siendo el híbrido 15 el que presentó la menor incidencia de la enfermedad. Esto sugiere que este material posee mayor tolerancia o resistencia a este patógeno, lo cual constituye una característica deseable para la selección de híbridos con mejor comportamiento fitosanitario. El híbrido 14, fue el que presentó el mayor rendimiento, también registró la mayor altura de planta (235.4 cm) y de mazorca (99.2 cm). Por otro lado, híbridos con menor altura de planta, como el 4, que presentó una altura de 183.5 cm y una altura de mazorca de 58.5 cm, mostraron un porte más compacto y estable. Aunque su rendimiento fue menor (14.4 t ha⁻¹), este tipo de estructura puede ser ventajosa en sistemas de producción donde se busca mayor resistencia al acame, mejor adaptación a altas densidades de siembra y mayor eficiencia agronómica.

V. CONCLUSIONES

Los análisis de varianza realizados para las 13 variables evaluadas en los diferentes experimentos permitieron detectar diferencias estadísticas entre los híbridos estudiados, lo que evidenció la existencia de variabilidad genética en los materiales evaluados. Esta variabilidad fue fundamental para realizar una adecuada selección de los genotipos con mejores características agronómicas.

Asimismo, la aplicación del índice de selección facilitó la identificación de los híbridos más sobresalientes dentro de los experimentos, al integrar variables de importancia agronómica como el rendimiento, la sanidad, la precocidad y la altura de planta. Este enfoque permitió evaluar de manera conjunta múltiples características, favoreciendo una selección más eficiente de los materiales con mayor potencial productivo.

Con base en estos criterios, fue posible identificar los híbridos superiores en cada uno de los experimentos evaluados. En el experimento uno destacaron los híbridos 48, 47 y 15; en los experimentos dos, tres y cuatro sobresalieron los híbridos 55, 159 y 121; mientras que en el experimento cinco los híbridos con mejor desempeño fueron el 14 y el 15

VI. LITERATURA CITADA

Abera W, Hussein S, Derera J, Worku M, Laing M (2016). Heterosis and combining ability of elite maize inbred lines under northern corn leaf blight disease prone environments of the mid-altitude tropics. *Euphytica* 208: 391-400.

Andrade, F. H., et al. (2022). Environmental regulation of maize grain drying and its spatial variability under field conditions. *Field Crops Research*, 281, 108512.

Antuna, G. O., Espinoza, B. A., Andrio, E. E., Quiroz, M. J., Moreno, R. A. y Hernández, H. A. (2024). Aptitud combinatoria y rendimiento de grano de líneas y cruza de maíz. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-067>

Barreto, H. J., Bolaños, A.J. y Córdova, S. H. (1991). Programa de índices de selección, Guía para la operación de software. CIMMYT. México, D.F. 27 p.

Buenrostro-Robles, M., Lobato-Ortiz, R., García-Zavala. J. J., & Sánchez-Abarca, C. (2017). Rendimiento de líneas de maíz exótico irradiado con rayos gamma y de híbridos de cruza simple. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(3), 351-358.

Buntaran, H. (2021). Métodos estadísticos para el análisis de ensayos multiambientales en el mejoramiento vegetal: exactitud y precisión. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO. Recuperado: <https://agris.fao.org/search/en/records/674869057625988a371b3713>

Cerón-Rojas, J. J., & Sahagún-Castellanos, J. (2005). Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia*, vol. 39, pp, 667-677.

Ciarlo, E. A., Muschietti, M. P., Peralta, N., Comparín, M., Gregorini, F., Cipriotti, P. A., & Giuffre, L. (2020). Variabilidad espacial de propiedades del suelo: efecto del uso y tipo. *Ciencia del Suelo*, 38(2), 249–261. Recuperado el 25 de febrero de 2026, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000200249&lng=es&tlng=es

De León, C. H.; Rincón, S. F.; Reyes, V. M. H.; Sámano, G. D.; Martínez, Z. G.; Cavazos, C. R. y Figueroa, C. J de D. (2005). Potencial de rendimiento y estabilidad de combinaciones germoplásmicas formadas entre grupos de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(2):135 -143. Disponible en línea: <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/28-2/7a.pdf>

Díaz, J. R. C., Castillo, G. F., Santacruz, V. A., Gómez, M. N. O., García, Z. J. J. y Muñoz, O. A. (2023). Aptitud combinatoria de variedades y heterosis de cruas intervarietales divergentes de maíz de grano amarillo. *Ecosistemas y recursos agropecuarios.* 10(3): 1-12. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282023000300001&lng=es.

Ejaz, U., Hassan, A., & Khan, M. (2024). *Environmental effects on maize grain moisture under field conditions.* *Agronomy Journal*, 116(3), 890–902.

Escorcia, G. N., Molina, G. J., Castillo, G. F., Mejía, C. J. (2010). Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruas simples de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 33(3):271-279.

Estrada U, J., Cantú L, E., Molina M, J. C., & Estrada G, J. A. (2023). Madurez fisiológica en semillas de maíz (*Zea mays* L.) mediante marcadores morfológicos y el contenido de humedad. *Agronomía Mesoamericana*, 53269. <https://doi.org/10.15517/am.2023.5326>

García-Rodríguez, J. J., Mendoza-Castillo, M. C., & Mendoza-Rodríguez, M. (2021). Eficiencia del diseño de bloques incompletos en la evaluación de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de estrés hídrico y densidad de población.

Guamán G, R. N., Desiderio V, T. X., Villavicencio A, Á. F., Ulloa Co, S. M., & Romero S, E. J. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*, 7(2), 47–56.
<https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>

Gurjar, N. R., Dadheech, A., Kumar, S., Chittora, K., & Khan, T. (2020). Elucidating the Heterosis for Yield and Quality Parameters in Maize (*Zea mays* L.). *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39(20), 80–85.
<https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i2030811>

Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Miranda Filho, J. B. (2010). *Quantitative genetics in maize breeding*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0>

Hernández, A. E. y De León, C. H. (2021). Comportamiento genético para componentes de rendimiento en una población de maíz enano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 131-144. Recuperado de:
<https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2943/4069>

Hernández-Trejo, A., López-Santillán, J. A., Estrada-Drouaillet, B., Reséndiz-Ramírez, Z., Coronado-Blanco, J. M., & Malvar, R. A. (2023). Aptitud combinatoria y efectos recíprocos de la precocidad en poblaciones nativas de maíz de Tamaulipas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(2), 171–182.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00660>

Lippman, Z. B., & Zamir, D. (2007). Heterosis: revisiting the magic. *Trends in genetics : TIG*, 23(2), 60–66.

López-Morales, F., Vázquez-Carrillo, M. G., Molina-Galán, J. D., García-Zavala, J. J., Corona-Torres, T., Cruz-Izquierdo, S., López-Romero, G., Reyes-López, D., & Esquivel-Esquivel, G. (2017). Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1035–1050. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.106>

MacRobert, J. F., Setimela, P., Gethi, J., & Worku Ragasa, M. (2015). Manual de producción de semilla de maíz híbrido. CIMMYT Publications Repository. Retrieved September 26, 2022, <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/16849/57179.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MacRobert, J. F., Setimela, P., Gethi, J., y Regasa, M. W. (2015). Manual de producción de semilla de maíz híbrido para especialistas en semillas (2.^a ed.). Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

Marquez, Y., Salomón, J., & Acosta, R. (2020). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). SCIELO. Cultivos tropicales., Vol 41, numero 1.

Merga, W. (2022). Plant breeding challenges posed by Genotype-Environment interaction and methods of measurement. *Science Publishing Group*. <https://doi.org/10.11648/j.ajbes.20220803.11>

Moya, M., Sánchez, D., Romero, J. Á., & Villar-García, J. R. (2024). Influence of moisture content on some mechanical properties of wheat. *Agronomy*, 14(2), 347. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020347>.

Nolan, T.M.; Vukašinović, N.; Liu, D.; Russinova, E.; Yin, Y. (2020) Brassinosteroids: Multidimensional Regulators of Plant Growth, Development, and Stress Responses. *Plant Cell*, 32, 295–318.

Nyaga, C., Gowda, M., Beyene, Y., Murithi, W. T., Burgueño, J., Toledo, F., Makumbi, D., Olsen, M. S., Das, B., Suresh, L. M., Bright, J. M., Prasanna, B. M. (2020). mejoramiento híbrido para la resistencia a MLN: heterosis, Combinando habilidad y predicción híbrida. *Plants*. Vol. 9(4):468p.

Ramírez, D. J. L., Chuela, M., Vidal, V. A., Ron, J., & Caballero, F. (2007). Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), pp453–461

Richard, C., DS Osiru, MS Mwala y T. Lubberstedt. (2016). Genética Diversidad y agrupamiento heterótico del subconjunto central del maíz del sur de África y de zonas templadas (*Zea mays*L.) líneas endogámicas utilizando marcadores SNP. *Maydica* 61:M3. págs. 1–9.

Rivera. C.A., MejíaC.J., VázquezG. L. M., UrbinaS.E., & RamírezG. M. G. (2019). Aptitud combinatoria y heterosis en variedades de gerbera (*Gerbera × hybrida*). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), pp 155-162

Rodríguez, P. G., Treviño, R. J. E., Ojed., Z. M. C., Cervantes, O. F., Avila, P. M. A. y Gamez, V. A. J. (2020). Parámetros genéticos y aptitud combinatoria de líneas de maíz para grano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(8):1867-1878. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007>

Salazar, L., Véliz, D., Mestanza, C., & Villacis, J. (2023). Respuesta agronómica de un híbrido de maíz (*Zea mays* L.) a diferentes densidades de siembra. *Revista Ciencia y Tecnología*, p, 17- 24.

Servicio de información agroalimentaria y pesquera - SIAP. (2024). Panorama Agroalimentario 2018-2024. Secretaria de agricultura y desarrollo rural. 96- 97. Citado al 30 de marzo de 2025. Disponible en:

<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario258035>

Servicio de información agroalimentaria y pesquera - SIAP. (2025). Panorama Agroalimentario 2018-2024. Secretaria de agricultura y desarrollo rural. 96- 97. Citado al 30 de marzo de 2025. Disponible en:

<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario258035>

Thilakarathne, A.S.; Liu, F.; Zou, Z. (2025). Plant Signaling Hormones and Transcription Factors: Key Regulators of Plant Responses to Growth, Development, and Stress. *Plants*, 14, 1070.

Vaezi, B., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Mehraban, A., Hossein-Pour, T., Koohkan, E., & Ghasemi, S. (2019). Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions. *Agronomy*, 9(8), 441. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080441>

- Vallejo, F. A., M. M. Espitia C., T. C. Lagos B., E. O. Coral C., F. A. Salazar V. y E. F. Restrepo S. 2005.** Análisis Estadístico para los Diseños Genéticos en Fitomejoramiento. Palmira. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira: 209-244.
- Yan, W., & Tinker, N. A. (2006).** Biplot analysis of multi-environment trial data. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(3), 623–645.
- Yu K., Wang H., Liu X., Xu C., Li Z., Xu X., Liu J., Wang Z. y Xu Y. (2020).** Análisis a gran escala de la capacidad de combinación y la heterosis para el desarrollo de estrategias de mejoramiento de maíz híbrido utilizando diversos recursos de germoplasma, *Frontiers in Plant Science*, 11: 660.
- Zhao, J.; Yuan, B.; Zhang, H.; Guo, X.; Wang, L.; Qiu, X.; Xie, Q.; Mu, L.; Ma, C.; Zhou, T.; et al. (2024).** Phenotypic characterization and genetic mapping of the semi-dwarf mutant *sdw9* in maize. *Theor. Appl. Genet.* 137, 253.
- Zhou, L. y Jiang, L. (2024).** Mejoramiento genético asistido por genómica en maíz: Técnicas y resultados. *Genómica y genética del maíz*, 15 (3), 111-122. <https://doi.org/10.5376/mgg.2024.15.0012> en español.