



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

**PRODUCTIVIDAD, HETEROSIS Y
VOLUMEN DE EXPANSIÓN EN
VARIEDADES E HÍBRIDOS DE MAÍZ
PALOMERO DE VALLES ALTOS**

FRANCISCO SEBASTIÁN MARTÍNEZ DÍAZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada "Productividad, heterosis y volumen de expansión en variedades e híbridos de maíz palomero de valles Altos" realizada por el alumno Francisco Sebastián Martínez Díaz bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)

Dr. J. Jesús García Zavala

DIRECTOR

Dr. Alejandro Espinosa Calderón
(Director de Tesis)

ASESOR (A)

Dr. Ricardo Lobato Ortiz

ASESOR (A)

Dra. Margarita Tadeo Robledo

Montecillo, Texcoco, Estado de México, marzo de 2022

PRODUCTIVIDAD, HETEROSIS Y VOLUMEN DE EXPANSIÓN EN VARIEDADES E HÍBRIDOS DE MAÍZ PALOMERO DE VALLES ALTOS

Francisco Sebastián Martínez Díaz, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

No hay disponibles variedades mejoradas de maíz palomero para las condiciones agroclimáticas de Valles Altos, por lo que se requiere investigación para la generación de materiales mejorados de este maíz especial. Con base en lo anterior, el Campo Experimental del Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (CEVAMEX-INIFAP) y la Facultad de estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM) llevan a cabo un programa de mejoramiento genético para generar maíz palomero; en esta última línea de investigación se han generado diferentes genotipos mejorados con los cuales se estableció el presente trabajo, los cuales son 6 poblaciones maíces palomeros que son resultado de combinaciones de fuentes de calidad proteínica (QPM) con variedades palomeras nativas y líneas provenientes de Tamaulipas y de Estados Unidos.

Determinar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), heterosis y calidad de reventado de maíces palomeros de Valles Altos del Estado de México. En el caso del análisis genético se utilizó el método I modelo I de Griffing. La estimación de la heterosis permitió identificar las poblaciones PB3 y PB6 como las más aptas para generar combinaciones con potencial para rendimiento de grano. Sus progenies presentaron un patrón medio heterótico, ciclo vegetativo precoz y tolerancia al acame, por lo que se podrían utilizar en un programa de mejoramiento genético.

Para la calidad de reventado los resultados indican que en más de la mitad de los materiales evaluados se tiene baja capacidad de expansión en relación con los testigos del INIFAP; sin embargo, su rendimiento de grano superó a la media nacional en las condiciones ambientales de los Valles Altos de México, pero solo dos materiales, PB3xPB5 y PB4xPB2 demuestran tener capacidad de rendimiento y expansión superando la medias.

Palabras clave: *Zea mays* *Everta*, maíz palomero, cruzas, ACG, ACE, patrones heteróticos, calidad de reventado

PRODUCTIVITY, HETEROSIS AND VOLUME OF EXPANSION IN VARIETIES AND HYBRIDS OF POPCORN FROM HIGH VALLEYS

Francisco Sebastián Martínez Díaz, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

No improved varieties of popcorn are available for the agroclimatic conditions of High Valleys, so research is required to generate improved materials for this special corn. Based on the foregoing, the Experimental Field Station of the Valley of Mexico of the National Institute of Agricultural and Livestock Forestry Research (CEVAMEX-INIFAP) and the Faculty of Higher Studies Cuautitlán, of the National Autonomous University of Mexico (FESC-UNAM) carry out a genetic improvement program to generate popcorn. In this last line of research, different improved genotypes have been generated with which the present work was established, which are six popcorn maize populations that are the result of combinations of quality protein sources (QPM) with native popcorn varieties and inbred lines from Tamaulipas and United States.

Determine the General Combining Ability (GCA) and the Specific Combining Ability (SCA), heterosis and popping quality of popcorn from High Valleys of the State of Mexico. In the case of genetic analysis, the Griffing I model I method was used.

The estimation of heterosis allowed to identify the PB3 and PB6 populations as the most suitable to generate combinations with potential for grain yield. Their progenies presented a medium heterotic pattern, early vegetative cycle and tolerance to lodging, so they could be used in a breeding program.

For the popping quality, the results indicate that more than half of the materials evaluated have low expansion capacity in relation to the checks from INIFAP; however, its grain yield exceeded the national average in the environmental conditions of the High Valleys of Mexico, but only two materials, PB3xPB5 and PB4xPB2, show higher grain yield and expansion capacity than the average. The evaluated variables demonstrate the diversity that exists within the populations, as well as their crosses, which interacted little with the environment.

Keywords: *Zea mays* Everta, popcorn, crosses, GCA, SCA, heterotic patterns, popping quality

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y pueblo de México por apoyarme económicamente mediante una beca de posgrado para hacer este trabajo de investigación.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y el Posgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética por permitirme estudiar en sus instalaciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México a través del programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por el financiamiento del presente trabajo. Específicamente a los proyectos: T201312 e IT200122.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC) por proporcionar las parcelas experimentales y al Laboratorio de Producción y Tecnología de Granos y Semillas que facilitó el material y equipo necesario para la presente investigación.

Al Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CEVAMEX-INIFAP), por facilitar las instalaciones para las pruebas y el montaje de los experimentos en campo.

Al Dr. J. Jesús García Zavala, mi consejero, por apoyarme y ayudarme en las dudas que iban surgiendo conforme avanzaba este trabajo, por darme su voto de confianza, por la tolerancia y la paciencia, por las pláticas que hacían más amena la estancia en la maestría. Por ser un gran maestro y guía.

A mi director de tesis Dr. Alejandro Espinosa Calderón, porque a pesar del tiempo y la distancia, sigue siendo un gran maestro, guía y amigo. Por brindarme el apoyo y enseñanzas. Por permitirme volver a trabajar juntos en el campo.

A mi asesora Dra. Margarita Tadeo Robledo, por su guía, liderazgo y paciencia, que me permitió continuar en este trayecto para mi formación académica y profesional. Por su apoyo y amistad incondicional.

A mi asesor Dr. Ricardo Lobato Ortiz, por su valioso apoyo y su asesoramiento de este proyecto de investigación. Por su amistad y honestidad mostrados en mi camino académico.

Al gran equipo de Mejoramiento Genético y Producción y tecnología de semillas de maíz de la FESC-UNAM, por su apoyo en los momentos de trabajo y descanso, las risas y la amistad y compañerismo mostrado en esta etapa; a mis grandes amigos y colegas: I. A. José de Jesús Macedo González, al I.A. Israel Arteaga Escamilla, al Dr. Joob Zaragoza Esparza, al I.A. Alan Monter Santillán.

A la Dra. Consuelo López López, una gran amiga y compañera que me brindó su ayuda en este viaje y en esta última etapa.

A la M.C. Beatriz Martínez Yáñez por su atención, ayuda y tiempo, mis agradecimientos totales.

Al Dr. Enrique Canales Islas, por la amistad y los consejos que me brindó, así como por compartir sus conocimientos conmigo.

A la M.C. Karina Yazmine por su amistad y apoyo que me brindo en este camino.

A cada uno de los miembros del equipo de trabajo del CEVAMEX; con especial agradecimiento a mis amigos: Eduardo Ambrosio, Israel García y David Cerón, por su apoyo en todas las actividades realizadas, sin ustedes este trabajo no hubiera sido posible. También por compartir las alegrías y tristezas a que nos enfrentamos.

A mis amigos Mayra, Rubén, Melissa, Alexander, Jesús y Andrea, a quienes tuve la fortuna de conocerlos, de compartir momentos de alegría y hacer más amena la estancia en el postgrado.

A mis amigos Fernando, Monserrat, Iris y Daniel, por la paciencia y amistad que me brindaron en los momentos que necesitaba un amigo en una ciudad totalmente nueva.

Con especial agradecimiento y amor a mis padres, Ma. Magdalena Díaz Pérez e Isidoro Florencio Martínez Beltrán, que a pesar de las carencias que vivimos nada nos faltó, un abrazo, un beso en la frente y un buen consejo me ayudan e impulsa a seguir adelante.

A mis hermanos Fabián Alejandro, Yabin Florencio y Yakin Uriel, que, a pesar de los momentos felices, tristes, diferencia y chascarrillos me ayudaron y apoyaron. No duden que los apoyaré en sus proyectos.

A Mi abuela Yolanda Pérez, quien con sus consejos y bendiciones me apoyo.

A mi abuela Felipa Beltrán, quien me apoyó siempre, un buen consejo nunca me faltó. Donde quiera que se encuentre, mil gracias.

A todas aquellas personas que conocí a lo largo de mi vida, por las experiencias vividas que me ayudaron en esta etapa de vida académica y profesional. GRACIAS TOTALES

**Tantas penas que pasaste, momentos tristes y complicados,
Los miedos que viviste... nos sirvieron para llegar lejos.**

**Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la materia y la fuerza. Cuando se
separan, el hombre deja de existir.**

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Objetivo General	4
Objetivos específicos	5
Hipótesis	5
CAPÍTULO I. PRODUCTIVIDAD Y HETEROSIS DE CRUZAS DE POBLACIONES DE MAÍZ PALOMERO PARA VALLES ALTOS	6
1.1. RESUMEN	6
1.2. ABSTRACT	7
1.3. INTRODUCCIÓN	8
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS	10
Material genético	10
Variables evaluadas	11
Análisis estadístico	12
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
1.6. CONCLUSIONES	20
CAPÍTULO 2. CALIDAD Y VOLUMEN DE EXPANSIÓN EN POBLACIONES Y CRUZAS DE MAÍZ PALOMERO DE VALLES ALTOS	21

2.1. RESUMEN	21
2.2. ABSTRACT	22
2.3. INTRODUCCIÓN	23
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	25
Material genético	25
Ubicación	25
Tamaño de grano	26
Diseño estadístico	26
Análisis estadístico	28
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
Análisis de varianza	28
2.6. CONCLUSIONES	35
 CAPÍTULO 3. APTITUD COMBINATORIA GENERAL Y ESPECÍFICA DE MAÍZ	
PALOMERO PARA LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO	
	36
3.1. RESUMEN	36
3.2. ABSTRACT	37
3.3. INTRODUCCIÓN	38
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
Análisis de varianza	43
Efecto de ACG de las poblaciones	45
Efecto de la ACE de las cruzas de las poblaciones	47
3.6. CONCLUSIONES	49

CONCLUSIONES GENERALES	50
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	52

LISTA DE CUADROS

		Página
CAPÍTULO I		
Cuadro 1.1	Genealogía de poblaciones de maíz	11
Cuadro 1.2	Cuadrados medios del análisis de varianza combinado de la evaluación de cruzas de poblaciones de maíz palomero, sus progenitores y los testigos de maíz palomero. Ciclo primavera-verano del 2018 a 2020	14
Cuadro 1.3	Comparación de medias entre ambientes del análisis combinado. Ciclo primavera- verano de los años 2018 a 2020	15
Cuadro 1.4	Comportamiento medio de las poblaciones progenitoras, sus cruzas y testigos de las poblaciones de maíz palomero en tres ambientes de evaluación. Ciclo primavera-verano de 2018 a 2020	16-17
Cuadro 1.5	Valor de la heterosis con respecto al progenitor medio de las cruzas de las poblaciones de maíz palomero. Ciclo primavera- verano de los años 2018 a 2020	19
CAPÍTULO II		
Cuadro 2.1	Cuadrados medios del análisis de varianza de la evaluación de las poblaciones, cruzas directas y recíprocas de maíz palomero, y testigos de maíz palomero en los Valles Altos. Primavera y verano de 2020	30
Cuadro 2.2	Comparación de medias entre ambientes y tamaños de grano del análisis estadístico. Primavera-verano de 2020	30
Cuadro 2.3	Comportamiento medio de las poblaciones, cruzas directas y recíprocas de maíz palomero, y testigos de maíz palomero. Primavera-verano de 2020	31

CAPÍTULO III

Cuadro 3.1	Cuadrados medios para rendimiento, floración masculina y peso volumétrico de cruzas dialélicas con poblaciones de maíz palomero en los Valles Altos de México	42
Cuadro 3.2	Efectos de ACG para rendimiento y variables agronómicas evaluadas de seis poblaciones de maíz palomero en seis ambientes. Primavera verano 2018 a 2020	44
Cuadro 3.3	Efectos maternos para rendimiento y variables agronómicas evaluadas de seis poblaciones de maíz palomero en seis ambientes. Primavera verano 2018 a 2020	45
Cuadro 3.4	Efecto de ACE de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas del cruzamiento de seis poblaciones de maíz palomero, para rendimiento de grano y variables agronómicas evaluadas en seis ambientes. Primavera verano 2018 a 2020	46

LISTA DE FIGURAS

		Página
INTRODUCCIÓN		
Figura 1	Superficie sembrada de maíz palomero en México de 1980 a 2020 (hectáreas)	2
Figura 2	Producción de maíz palomero en México de 1980 a 2020	2
CAPÍTULO I		
Figura 1.1	Rendimiento de las poblaciones progenitoras de maíz palomero, sus cruzas (directas y recíprocas) y testigos de maíz palomero a través de tres ambientes de evaluación. Ciclo primavera- verano de 2018 a 2020	18
CAPÍTULO II		
Figura 2.1	Escala visual de la forma de la roseta	27
Figura 2.2	Comportamiento del volumen de expansión de los genotipos con respecto a su rendimiento	33
CAPÍTULO III		
Figura 3.1	Esquema de cruzas directas (diagonal derecha superior) y recíprocas (diagonal izquierda inferior) de las seis poblaciones (PB).	40

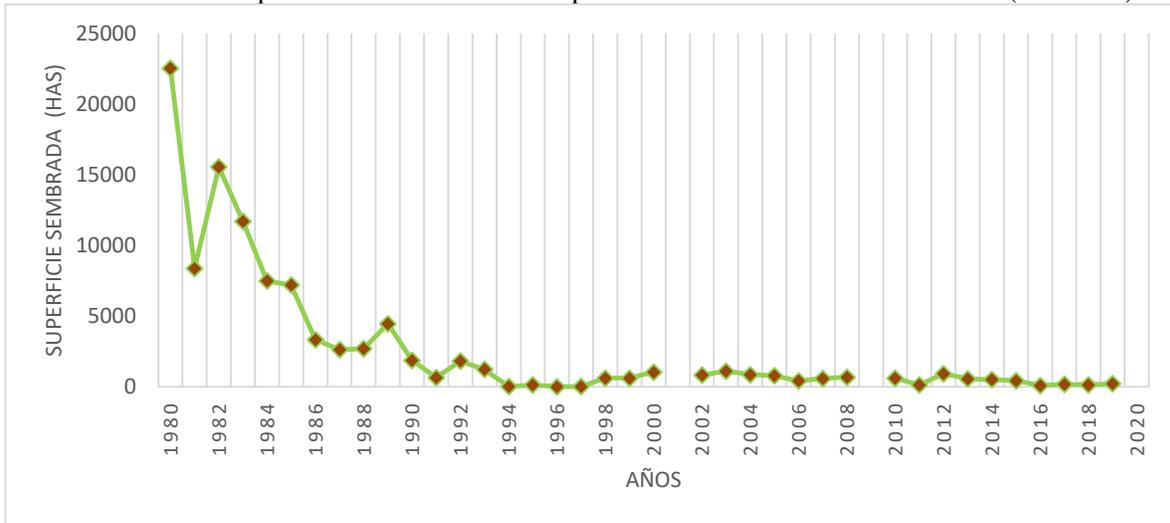
INTRODUCCIÓN GENERAL

Desde la época precolombina, el maíz (*Zea mays L.*) palomero es uno de los muchos tipos de maíz que se cultivan en México enfocado en su contexto tradicional de algunos pueblos originarios. Tal es su importancia tanto cultural, socioeconómica y gastronómica, en especial esta última con sus múltiples propiedades nutrimentales que otorgan las palomitas de maíz hacen que tengan un valor alimenticio elevado, pues las palomitas contienen altas cantidades de fibras, vitaminas, minerales, proteínas y antioxidantes. Sin embargo, este tipo de maíz se encuentra en peligro de extinción actualmente (De la O-Olán *et al.*, 2018).

En 2008, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), reporta un proyecto de mejoramiento genético de maíz palomero en Tamaulipas, estado donde se produce el poco todo el maíz palomero en México, estimado en 400 toneladas, de ese proyecto se generó la variedad mejorada de polinización libre V 460 P. De acuerdo con Valadez-Gutiérrez *et al.* (2014), las características agronómicas más relevantes de esta variedad son: baja susceptibilidad al acame y un rendimiento potencial de 3884 kg ha⁻¹ en condiciones de riego para la región de Las Huastecas, que comprende desde el sur de Tamaulipas, norte de Veracruz y oriente de San Luis Potosí (Aguilar, 2021)

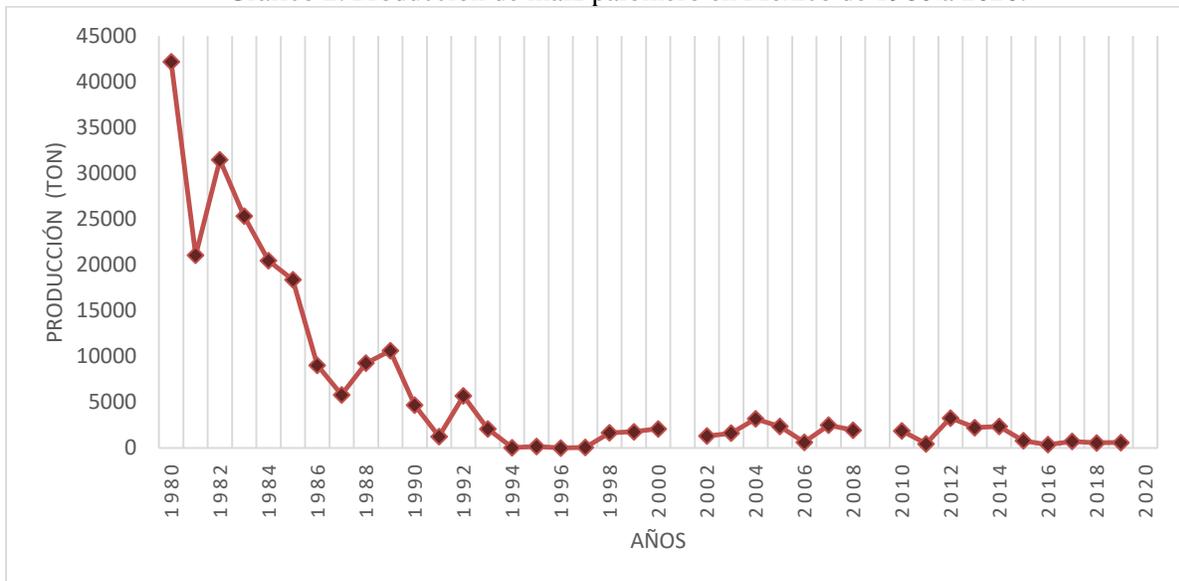
A pesar de tener una variedad comercial y material genético de este tipo de maíz que se puede aprovechar para programas de mejoramiento genético, no se logra atender la demanda nacional, lo que ha ocasionado el abandono de este tipo de maíz, ya que el único estado productor es Tamaulipas. En 1980 la superficie sembrada era de 22544 has con una producción de 42178 ton, pero en 2019 fue de 223 has con 596 ton (Gráfico 1 y 2), cantidades con grandes márgenes de diferencia (SIAP, 2020).

Gráfico 1. Superficie sembrada de maíz palomero en México de 1980 a 2020 (hectáreas)



Elaboración Propia. Fuente: SIAP, 2020

Gráfico 2. Producción de maíz palomero en México de 1980 a 2020.



Elaboración Propia. Fuente: SIAP, 2020

Dentro los métodos para estudiar las cualidades de un conjunto de progenitores de maíz palomero están los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956), que permiten su aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE); además, permiten definir el método más adecuado de mejoramiento genético para predecir cruza superiores y combinar las mejores características de importancia agrícola (Cai *et al.*, 2012; Melani y Carena, 2005). De acuerdo con

Hoegemeyer y Hallauer (1976), la ACE es más importante que la ACG en un programa de mejoramiento cuya finalidad sea la obtención de híbridos.

Uno de los propósitos del mejoramiento genético es el desarrollo de híbridos de maíz con altos rendimientos (Escorcía *et al.*, 2010) sin descuidar el carácter de reventado en el maíz palomero, lo cual requiere identificar progenitores que posean un buen patrón heterótico para usarse en la formación de híbridos potenciales (Gaytán y Mayek, 2010, López, 2021); es decir, descendencia con vigor y rendimiento superior a sus padres. En un inicio, a dicha expresión se le denominó vigor híbrido, y posteriormente heterosis, término propuesto por G.H. Shull (Márquez, 2007).

La heterosis es un fenómeno de superioridad, característico de ciertas especies, que presenta la cruce entre dos individuos (Esquivel Esquivel *et al.* 2009), habitualmente diferenciados genotípica y fenotípicamente entre sí. La aplicación de heterosis en maíz, uno de los principales recursos alimenticios del mundo (Shull, 1948) y desde 2011, el rendimiento del maíz aumentó al menos ocho veces en América, debido principalmente al cultivo de híbridos (Tian, 2011).

La productividad de una planta híbrida puede inferirse por la heterosis sobre el promedio o media de sus progenitores. Shull, citado por Poehalnm y Sleper (2003) propuso el término de heterosis como expresión del vigor híbrido. La heterosis es el resultado de reunir una serie de genes dominantes favorables, (Jugenheimer; 1981). Las acciones genéticas, así como las interacciones genético-ambientales, contribuyen a la existencia de heterosis, que a su vez se basa en el cruzamiento de germoplasma con acervos genéticos y orígenes geográficos distintos (De la Cruz *et al.*, 2003).

Además de los efectos genéticos y la heterosis, se puede evaluar del material genético la capacidad de expansión en maíces palomeros cuyas principales variables a tomar en cuenta son: volumen y calidad de la roseta en la expansión, humedad del grano, forma de la roseta, persistencia, dureza y grosor del pericarpio, granos sin reventar para obtener materiales con características de calidad de palomitas idóneos para su consumo. El volumen de producto obtenido por unidad de peso de grano, forma de la roseta, (Ziegler, 2001), así como la proporción de granos sin reventar (Soylu y Tekkanat, 2007), todas ellas son características influenciadas por factores físicos de la semilla, como grosor y dureza del pericarpio (Hoseney *et al.*, 1983) y humedad del grano (Gökmen, 2004).

En el programa de mejoramiento genético de maíz del Campo Experimental del Valle de México (CEVAMEX-INIFAP) en colaboración con la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM), se trabaja para generar diversos genotipos de grano reventador para poder apoyar a la producción de este tipo de maíz, así mismo empezar a desarrollar programas de mejoramiento en maíces palomeros de los cuales se desea conocer la ACG de los progenitores y la ACE de las cruzas para dicho propósito.

Debido a lo ya mencionado, es necesario conocer la acción génica presente en los progenitores que integran a las cruzas de este trabajo, lo cual permitirá hacer un mejor uso de éstos con la finalidad de aportar genotipos sobresalientes de maíz palomero para los productores de la zona de Valles Altos del centro de México.

Objetivo General

- Definir el tipo de acción génica involucrada, así como la influencia de los efectos recíprocos, en la manifestación del rendimiento de grano y la calidad de expansión de variedades palomeras de maíz, y en características agronómicas como precocidad, para una

posterior selección de los mejores genotipos y su posible integración a programas de mejoramiento genético.

Objetivos específicos

- Estimar los efectos de la aptitud combinatoria general de seis variedades de maíz (*Zea mays* L.) palomero y los de aptitud combinatoria específica de las cruzas posibles, para rendimiento de grano, calidad y volumen de expansión.
- Identificar a las mejores variedades de maíz palomero y así definir a las mejores combinaciones con alto potencial de rendimiento y caracteres agronómicos, como altura intermedia, uniformidad, resistencia al acame y ciclo vegetativo precoz.
- Determinar la capacidad productiva y heterosis de las cruzas de seis variedades de maíz palomero.
- Definir las mejores combinaciones específicas y definir las perspectivas de su uso comercial e industrial en calidad de reventado de maíz palomero.

Hipótesis

Existe variabilidad en el tipo de acción génica que gobierna el rendimiento y las características agronómicas, calidad y volumen de expansión palomera de variedades de maíz.

Es posible detectar variedades de maíz con características agronómicas sobresalientes y que además presenten excelente calidad y volumen de expansión palomera en los materiales en estudio.

CAPÍTULO I. PRODUCTIVIDAD Y HETEROSIS DE CRUZAS DE POBLACIONES DE MAÍZ PALOMERO PARA VALLES ALTOS

1.1. RESUMEN

El cultivo y la producción de maíz palomero (*Zea mays* var. *Everta*) en México disminuyó en los últimos años. Este maíz es altamente demandado y consumido por la actividad industrial y doméstica, por lo que la totalidad necesaria del maíz palomero en México es importada (80,000 toneladas). Como una forma rápida de obtener materiales mejorados, se debe capitalizar la heterosis, lo que nos va a permitir identificar patrones heteróticos para la generación de híbridos de maíz palomero. En este trabajo se definió la productividad, heterosis y características agronómicas de 30 cruzas de poblaciones experimentales de maíz palomero, evaluado con sus poblaciones progenitoras y cuatro variedades experimentales del INIFAP como testigos. Las siembras se establecieron en tres ambientes del Estado de México, bajo condiciones de temporal en los ciclos primavera y verano de 2018, 2019 y 2020. Todos los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. El promedio del rendimiento general de las cruzas de poblaciones de maíz palomero experimentales fue de 4889 kg ha⁻¹, valor superior al promedio del nacional (2.68 t ha⁻¹), considerando únicamente la última producción registrada en 2019.

Las cruzas en las que se usaron las poblaciones PB3 y PB6 tuvieron los mejores rendimientos de grano (5234 y 5179 kg ha⁻¹) y expresaron valores superiores en cada característica agronómica evaluada, como precocidad (77 días a FM), granos medianos y pesados (75 kg hL⁻¹), y una relación de grano por mazorca de 82 %, además tuvieron un patrón heterótico adecuado, lo que puede favorecer el uso de su germoplasma para formar híbridos de maíz palomero para Valles Altos.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz palomero, patrones heteróticos, rendimiento, cruzas, poblaciones.

CHAPTER I. PRODUCTIVITY AND HETEROSIS OF CROSSES OF POPULATIONS OF POPCORN FOR HIGH VALLEYS

1.2. ABSTRACT

The cultivation and production of popcorn (*Zea mays* var. *Everta*) in Mexico has decreased in recent years. This corn is highly demanded and consumed by industrial and domestic activity, for which the total amount of popcorn needed in Mexico is imported (80,000 tons). As a quick way to obtain improved materials, heterosis should be capitalized on, which will allow us to identify heterotic patterns for the generation of popcorn hybrids. In this work, the productivity, heterosis and agronomic characteristics of 30 crosses of experimental populations of popcorn were defined, evaluated with their parent populations and four experimental varieties from INIFAP as checks. The experiments were established in three environments in the State of Mexico, under rainfed conditions in the spring and summer seasons of 2018, 2019 and 2020. All genotypes were evaluated in a randomized complete block design with three replications per environment. The average of the general grain yield of the crosses of experimental popcorn populations was 4,889 kg ha⁻¹, a value higher than the national average (2.68 t ha⁻¹), considering only the last production registered in 2019.

The crosses in which the PB3 and PB6 populations were used, had the best grain yields (5,234 and 5,179 kg ha⁻¹) and expressed higher values in each evaluated agronomic characteristic, such as earliness (77 days at FM), medium and heavy grains (75 kg hL⁻¹), and a grain per ear ratio of 82 %. They also had an adequate heterotic pattern, which may favor the use of their germplasm to form popcorn hybrids for High Valleys.

Keywords: *Zea mays*, popcorn, heterotic patterns, yield, crosses, populations.

1.3. INTRODUCCIÓN

La producción de maíz (*Zea mays* L.) en México se orienta hacia la producción de maíces blancos y amarillos de característica harinosa y semidentada, cuyo principal uso es para la nixtamalización preparación de tortilla para el consumo de la población, dejando en el abandono al maíz palomero. Esto hace que se siembren maíces con potencial de reventado junto con materiales harinosos para mejorar la calidad de la masa (Bautista-Ramírez *et al.*, 2020), dejando de lado la calidad de reventado para palomitas.

El único estado productor de maíz palomero en Mexico es Tamaulipas, que, en 2019 generó 596 toneladas (SIAP, 2019). Esta situación ha causado que se dependa de la producción extranjera de maíz palomero, lo que repercute en la autosuficiencia para producir este tipo de maíz, por lo cual, se ha tenido que recurrir a las importaciones, sobre todo, de Estados Unidos para solventar la demanda de este tipo de maíz.

Uno de los propósitos del mejoramiento genético es el desarrollo de híbridos de maíz con altos rendimientos (Escorcía *et al.*, 2010) sin descuidar el carácter de reventado en el maíz palomero, lo cual requiere identificar progenitores que posean un buen patrón heterótico para usarse en la formación de híbridos potenciales (Gaytán y Mayek, 2010, López-López, 2021); es decir, descendencia con vigor y rendimiento superior a sus padres. En un inicio, a dicha expresión se le denominó vigor híbrido, y posteriormente heterosis, término propuesto por G.H. Shull (Márquez, 2007).

La heterosis (también llamado vigor híbrido) es un fenómeno de superioridad, característico de ciertas especies, que presenta la cruce entre dos individuos (Esquivel Esquivel *et al.* 2009), habitualmente diferenciados genotípica y fenotípicamente entre sí. La aplicación de

heterosis en maíz, uno de los principales recursos alimenticios del mundo (Shull, 1948) y desde 2011, el rendimiento del maíz aumentó al menos ocho veces en América, debido principalmente al cultivo de híbridos (Tian, 2011).

El vigor híbrido es el incremento o productividad de una planta híbrida sobre el promedio o media de sus progenitores. Shull, citado por Poehalnm y Sleper (2003) propuso el término de heterosis como expresión del vigor híbrido. La heterosis o vigor híbrido es el resultado de reunir una serie de genes dominantes favorables, (Jugenheimer; 1981). Las acciones genéticas aditivas, de dominancia, sobredominancia, epistasis; así como las interacciones genético-ambientales, contribuyen a la existencia de heterosis, que a su vez se basa en el cruzamiento de germoplasma con acervos genéticos y orígenes geográficos distintos (De la Cruz *et al.*, 2003).

Los programas de mejoramiento genético que existen para los maíces palomeros en México son pocos y ante el interés estratégico de ofrecer variedades mejoradas utilizando el germoplasma nativo nacional disponible, desde la FESC UNAM y CEVAMEX INIFAP se trabaja en el desarrollo de variedades de maíz palomero para ofrecer como alternativas competitivas de este tipo de materiales a los productores de los Valles Altos del Valle de México. Producto de estos trabajos se cuenta con variedades experimentales y poblaciones élites, en su etapa previa a su registro y liberación comercial, en las cuales se genera la tecnología para su producción, además de evaluarse el rendimiento y calidad de estos materiales haciendo énfasis en el carácter de reventado (Espinosa-Calderón *et al.*, 2018).

Para atender la demanda de semillas y grano de maíz palomero en el país, la zona de los Valles Altos es estratégica para solventar dicha demanda, sobre todo por la rusticidad y la importancia evolutiva y de su capacidad de producción en ambientes desfavorables; para ello se

ha recurrido a la combinación de germoplasma de diferentes orígenes y regiones ecológicas, como variedades de la región subtropical, de Valles Altos y Estados Unidos, integrándose poblaciones con estas fuentes germoplasmicas, que después se recombinaron, por varios ciclos, se seleccionaron, avanzando en varias poblaciones ya estabilizadas, a partir de ellas el objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento, características agronómicas y heterosis de cruza de poblaciones de maíces palomeros con respecto a sus progenitores y testigos (poblaciones y variedades experimentales del INIFAP) en seis ambientes del Estado de México.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

En los ciclos primavera verano de 2018 a 2020 se sembraron 36 genotipos de maíz con potencial de reventado y 4 testigos en tres localidades del Estado de México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la primera; en el año 2018 se sembró en los terrenos ejidales de la comunidad de Huexotla, Texcoco, Estado de México, la segunda, y en 2019 y 2020 en el CEVAMEX-INIFAP, la tercera, lo que dio lugar un total de seis ambientes.

Material genético

El material genético evaluado consistió en seis poblaciones de maíz palomero que son resultado de combinaciones de fuentes de calidad proteínica (QPM) con variedades palomeras nativas y líneas provenientes de Tamaulipas, así como otras traídas de Estados Unidos, con estas fuentes de germoplasma se recombinaron varios ciclos, se seleccionaron diferentes poblaciones, definiéndose algunas como sobresalientes, las cuales actuaron como progenitores hembra y macho, sus 30 cruza (directas y recíprocas) así como cuatro testigos de maíces palomeros experimentales,

desarrollados en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Cuadro 2.1).

Cuadro 1.1. Genealogía de poblaciones de maíz palomero utilizadas como progenitoras para integrar un dialélico I de Griffing.

Poblaciones	
PB1	(242AExPOB42xPBxPB) x 244Fx244F) x LP) x Pal) x Pal Tam 2004R) #
PB2	(141 x MU2000@) x Pal Resurrección) x Palomero Tam 2004) #
PB3	(141 x MU2000@) x Palomero Resurrección) x Pal YW) #
PB4	(141 x MU2000) x Palomero Resurrección) X Palomero) #
PB5	(141 x MU2000) x PAL RES) x Pal Resurrección) #
PB6	(242AE x POB42 x PB x PB) x YW x 244AE) x 244 x 244) x LP x Pal) x Pal) #

Variables evaluadas

Las variables de mayor interés agronómico se midieron tanto en laboratorio como en campo. La variable días a floración masculina (FM), se tomó cuando la antesis se presentó en el 50 % de las plantas por unidad experimental; días a floración femenina (FF) se registró cuando los estigmas eran visibles (de dos a tres cm) en el 50 % de las plantas de dicha unidad experimental. Cuando se efectuó la cosecha, se tomó el peso de campo, registrando el peso total de mazorcas por unidad experimental en kg.

Se tomó una muestra de entre 8 a 10 mazorcas sanas del total de la unidad experimental y se obtuvo una submuestra de cinco mazorcas para tomar datos en las instalaciones del INIFAP-CEVAMEX, donde se midió y contabilizó la longitud de mazorca en cm (LM), número de hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), y relación grano por mazorca (% GM); estas mazorcas se desgranaron y con este material se tomaron datos de las variables peso volumétrico en kg hL⁻¹ (PV), porcentaje de humedad con un determinador de humedad electrónico, peso de 200 granos, medido en gramos (200G), y porcentaje de materia seca, que se obtuvo mediante la diferencia de 100 menos el porcentaje de humedad.

Para el caso del rendimiento de grano (RG; kg ha⁻¹), este se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Rend = \frac{(PC \cdot \%MS \cdot \%G) \cdot Fc}{8600}$$

dónde: PC= peso de campo en kilogramos; %MS = porcentaje de materia seca de las mazorcas; %G. = porcentaje de grano; Fc = factor de conversión para obtener el rendimiento por ha, que se obtiene al dividir 10000 m² entre el tamaño de la parcela útil en m²; 8600 = una constante para estimar el rendimiento con una humedad comercial del 14%.

Por último, se estimó la heterosis para rendimiento; esta estimación se hizo con respecto al promedio de los progenitores y se calculó utilizando la ecuación:

$$H_{pij} = \left\{ \left[C_{ij} - \frac{(P_i + P_j)}{2} \right] / \left[\frac{(P_i + P_j)}{2} \right] \right\} * 100$$

dónde: H_{pij}= heterosis en porcentaje; C_{ij}= valor de la cruce entre los progenitores i y j; P_i= valor del progenitor i; P_j= valor del progenitor j.

Análisis estadístico

Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones en cada ambiente, la parcela experimental consistió de un surco de 5 m de largo por 0.80 m de ancho. Se realizó un análisis de varianza combinado de ambientes, donde el efecto de los genotipos se consideró fijo y el de ambientes aleatorio (seis ambientes). Se hizo una prueba de comparación de medias (Tukey; p ≤ 0.05) para cada variable; ambos procedimientos se hicieron mediante el software SAS® versión 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de varianza se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción (G x A). La media general de rendimiento fue de 4889 kg ha^{-1} , el coeficiente de variación fue 19.6 %. Hubo significancia alta ($p \leq 0.01$) para las variables: Floración masculina, Floración femenina, Peso volumétrico, Peso de 200 granos, Longitud de mazorca, Diámetro de mazorca, Diámetro de olote, Granos por mazorca, entre ambientes (A) y entre genotipos (G). La interacción (G x A) resultó altamente significativa para peso volumétrico y significativa al 5% para Peso de 200 granos y granos por mazorca.

Puede decirse que la ausencia de significancia en la interacción (G x A), con excepción de rendimiento y peso volumétrico, demuestra que los genotipos individualmente no tuvieron respuesta diferencial a través de los ambientes para las variables evaluadas, por lo que genotipos y ambientes no influyeron conjuntamente en la expresión de las variables medidas.

Los valores de coeficiente de variación (3.04% – 19.6%), indican un control aceptable (<20%) de la variabilidad experimental (Cuadro 1.2). Estos valores sugieren que el manejo de los experimentos y la obtención de datos y los resultados son confiables.

La significancia que se encontró en ambientes indica que estos tuvieron diferencias en sus condiciones edafoclimáticas, como la precipitación y la retención de la humedad otorgada por el tipo de suelo, lo que influyó en la expresión promedio de los genotipos para cada variable. Por su parte, las diferencias altamente significativas entre los genotipos indican la diversidad genética presente entre las variedades y sus respectivas cruzas, más la variación con la que contribuyeron los testigos.

Cuadro 1.2. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado de la evaluación de cruzas de poblaciones de maíz palomero, sus progenitores y los testigos de maíz palomero. Ciclo primavera-verano del 2018 a 2020.

FV	Ambiente (A)	Genotipo (G)	Interacción (GxA)	Error	Media	CV (%)
Grados de libertad	5	36	195			
Rendimiento	373416140**	24865695**	2357992**	915391	4889	19.6
Floración masculina	820**	19**	7	5.5	77	3.04
Floración femenina	1221**	22**	8	3.3	80	3.3
Peso volumétrico	1196**	47**	31**	23.4	77	6.3
Peso de 200 granos	919**	469**	35*	28.6	38	14.1
Longitud de mazorca	89**	8**	1.4	1.6	15	8.5
Diámetro de mazorca	1.9**	0.8**	0.05	0.05	3.8	5.8
Diámetro de olote	0.3**	0.2**	0.2	0.02	2.3	5.87
Granos por mazorca	51651**	13462**	4579*	3626	464	13
Granos/Mazorca	313**	123**	64	54	81	9.05

**p≤0.01, *p≤0.05; FV: Factor de variación, CV: Coeficiente de variación

En la comparación de las medias entre los ambientes para la variable rendimiento, se definieron cuatro grupos de significancia; los mayores rendimientos se encontraron en los ambientes CEVAMEX-INIFAP 2020, Huexotla-Texcoco 2019 seguidos por FESC-UNAM 2018 y FESC-UNAM 2020. El resultado que se aprecia en el ambiente CEVAMEX-INIFAP posiblemente se atribuye a la dureza y tamaño superiores de los granos (40.1 g; 78.5 kg hL⁻¹) (Cuadro 2.3). Las localidades con los rendimientos inferiores fueron FESC-UNAM 2019 y CEVAMEX-INIFAP 2019; las circunstancias que propiciaron este resultado fueron que, en los terrenos de Santa Lucía, el suelo influyó en el rendimiento, pues al ser arenoso, este no retuvo suficiente humedad; además que en el año 2019 no se aplicó fertilizante, aunado a la presencia de gallina ciega (*Phyllophaga ssp.*) en la parcela de experimentación, lo cual ocasionó daños en las raíces de las plantas.

El promedio de las floraciones masculinas y femeninas fueron 77 y 80, respectivamente, similares a resultados reportados por López (2021) días. La longitud de mazorca estuvo entre 13

y 15 cm; el promedio de los diámetros, tanto de mazorca como de olote fue de 3.8 cm y 2.3 cm, respetivamente.

Cuadro 1.3. Comparación de medias entre ambientes del análisis combinado de la evaluación de cruzas de poblaciones de maíz palomero, sus progenitores y los testigos de maíz palomero. Ciclo primavera-verano de los años 2018 a 2020.

Años	2018		2019		2020		
Ambientes	FESC-UNAM	Huexotla- Texcoco	FESC-UNAM	CEVAMEX- INIFAP	FESC-UNAM	CEVAMEX- INIFAP	
Variables							DHS
Rendimiento	5519b	6409a	2533d	2911c	5272b	6690a	353.5
Floración masculina	82a	78b	76c	76c	74d	78b	0.9
Floración femenina	86a	80c	78c	78d	77d	81b	0.9
Peso volumétrico	77.7bc	79.5a	70.8d	76.2c	78.6ab	78.5ab	1.8
Peso de 200 granos	39.8a	39.8a	35.5b	33.5c	38.8a	40.1a	1.9
Longitud de mazorca	13.4d	16.3a	14.8c	14.7c	15.1bc	15.3b	0.5
Diámetro de mazorca	3.8a	3.9a	3.8a	3.5b	3.8a	3.8a	0.1
Diámetro de olote	2.4ab	2.5a	2.4a	2.3c	2.4bc	2.3c	0.05
Granos por mazorca	471ab	482a	465ab	429c	485a	454b	22.2
Granos/Mazorca	81.9ab	80.3bc	78.6c	82.0ab	83.2a	81.6ab	2.7

Medias con diferente letra en cada hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DHS: diferencia significativamente honesta

Con respecto a la comparación de promedios entre los materiales genéticos, en el Cuadro 1.4, los promedios de los días a floración indican que los materiales, tanto las poblaciones como sus cruzas y los testigos, tuvieron un comportamiento que va desde precoz a intermedio (75 a 79 días en floraciones masculinas y 77 a 82 días en floraciones femeninas). Dos de los testigos (T3 y T4), las poblaciones PB1, PB2 y PB6, y la cruzas PB2 x PB1, PB3 x PB1, PB4 x PB1, PB6 x PB1 y PB6 x PB3 resultaron ser los más precoces (75 a 76 días). Dicha precocidad observada puede atribuirse a la participación de la población PB1 como progenitor hembra y PB6 como progenitor macho. Las cruzas realizadas (directa y recíproca) entre dichas poblaciones mostraron una diferencia de dos días en floraciones masculinas. El resto de las cruzas fueron de ciclo intermedio (78 - 79 días en floraciones masculinas).

Cuadro 1.4. Comparación de medias de las poblaciones progenitoras, sus cruzas y testigos de las poblaciones de maíz palomero evaluadas. Ciclo primavera-verano de 2018 a 2020.

Poblaciones	FM (días)	FF	AP (cm)	PV (kg hL ⁻¹)	200G (g)	GM (%)
T3	75d	79ad	201bc	78.2ab	35.1ei	83.0ac
T4	75d	78dc	203bc	73.9ab	24.0j	79.7bf
PB2	75dc	80ad	205abc	76.1ab	35.4ei	79.8bf
PB2 x PB1	75dc	79ad	212abc	76.7ab	37.3ch	81.7ae
PB1	76ad	78dc	189bc	77.4ab	41.2be	81.9ae
PB3 x PB1	76ad	79ad	212abc	77.2ab	38.3cg	81.6ae
PB4 x PB1	76ad	79ad	210abc	77.1ab	40.3bf	82.1ae
PB6	76ad	78dc	202bc	78.2ab	41.5be	83.8ab
PB6 x PB1	76ad	79ad	210abc	77.2ab	45.5ab	82.9ac
PB6 x PB3	76bd	77d	219ab	74.0ab	49.8a	86.3a
PB1 x PB2	77ad	79ad	200bc	77.0ab	39.1bg	83.5ab
PB1 x PB3	77ad	79ad	200bc	78.1ab	43.8abc	81.9ae
PB1 x PB4	77ad	80ad	204abc	75.5ab	41.4be	81.5ae
PB2 x PB3	77ad	80ad	204abc	76.4ab	36.6di	80.5bf
PB2 x PB4	77ad	80ad	212abc	76.7ab	35.3ei	77.7def
PB2 x PB5	77ad	80ad	210abc	77.4ab	33.6fi	79.5bf
PB3 x PB2	77ad	80ad	205abc	76.4ab	39.9bg	80.8bf
PB4 x PB3	77ad	79ad	202bc	76.5ab	35.1ei	82.2ae
PB4 x PB5	77ad	80ad	238a	79.9a	33.4fi	80.7bf
PB5	77ad	81abc	182c	76.1ab	25.7j	75.8f
PB5 x PB1	77ad	79ad	206abc	78.1ab	37.1ci	78.3cf
PB5 x PB2	77ad	80ad	201bc	77.3ab	30.3ij	75.7f
PB5 x PB3	77ad	80ad	196bc	77.4ab	30.4hij	81.7ae
PB5 x PB4	77ad	79ad	198bc	79.2ab	34.9ei	77.2ef
PB5 x PB6	77ad	80ad	204abc	78.3ab	38.3cg	83.1ac
PB6 x PB2	77ad	80ad	211abc	78.2ab	42.7bcd	82.7ad
T1	77ad	79ad	202bc	73.0b	35.9di	79.8bf
PB4	78ac	81abc	202bc	73.7ab	33.2ghi	81.4ae
PB4 x PB2	78ac	81abc	222ab	75.2ab	37.3ci	80.1bf
PB4 x PB6	78ac	81abc	208abc	78.9ab	41.3be	81.1ae
PB6 x PB5	78ac	80ad	208abc	79.4a	39.9bg	81.2ae
T2	78ac	80ad	208abc	76.9ab	39.8bg	82.4ad
PB1 x PB5	78ad	79ad	205abc	78.4ab	37.5cg	81.9ae
PB1 x PB6	78ad	81ad	201bc	74.1ab	45.7ab	82.8ad
PB3	78ad	81ac	206abc	75.9ab	40.3bf	81.5ae
PB3 x PB4	78ad	81ad	218ab	75.6ab	37.1ci	82.2ae
PB3 x PB5	78ad	81ad	210abc	78.6ab	36.4di	80.0bf
PB3 x PB6	79a	82 ^a	214abc	76.1ab	44.0abc	82.6ad
PB2 x PB6	79ab	82ab	209abc	77.7ab	39.5bg	80.2bf

Poblaciones	FM (días)	FF	AP (cm)	PV (kg hL ⁻¹)	200G (g)	GM (%)
PB6 x PB4	79ab	81ac	206abc	77.3ab	41.9be	82.5ad
DHS	3.06	3.46	0.34	6.32	6.98	5.23

Medias con letra igual dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes. FM: días a floración masculina; FF: días a floración femenina; AP: altura de planta; PV: peso volumétrico; 200G: peso de 200 granos; GM: porcentaje de grano/mazorca.

Estas mismas cruzas también mostraron diferencias en los pesos volumétricos, ya que PB6 x PB1 resultó tener más peso volumétrico (77.2 kg hL⁻¹) que su craza directa (74.1 kg hL⁻¹), pero en cuanto a los casos de peso de 200 granos y la relación de granos por mazorca resultaron ser muy similares. Probablemente se le pueda atribuir a la utilización de la población PB6 como progenitor macho, la cual expresó el peso más alto con 78.2 kg hL⁻¹, así como en el caso de peso de 200 granos y en la relación de granos por mazorca (41.5 g y 83.8%).

En los rendimientos medios, más de la mitad de las cruzas fueron superiores al promedio general (4889 kg ha⁻¹), al igual que tres poblaciones progenitoras (PB1, PB6 y PB3) superaron dicho rendimiento (4906, 5179 y 5234 kg ha⁻¹). De las cruzas con mejor rendimiento fueron: PB3 x PB6 (6945 kg ha⁻¹), PB6 x PB3 (6493 kg ha⁻¹) y PB3 x PB1 (6435 kg ha⁻¹). Al cruzar poblaciones con similares rendimientos, los resultados se vieron favorecidos al superar a sus progenitores, sobre todo, en sus cruzas directas y recíprocas respectivamente.

Con la información de las poblaciones progenitores y sus cruzas, se estimó el porcentaje de heterosis con respecto al progenitor medio, solo para rendimiento de grano (Cuadro 1.5). El porcentaje de heterosis de las cruzas se encontró en un intervalo de -21.46 a 75.63%, donde quince de las cruzas presentaron mayor heterosis con respecto al promedio general (24.98%). Las cruzas con heterosis porcentual superior fueron aquellas en las que se utilizó la población PB5 como progenitor hembra o macho, con valores $\geq 40\%$, que al combinarse con la población PB6 (PB5 x PB6, PB6 x PB5) tuvieron valores superiores a 50%.

Se puede considerar que las dos poblaciones (PB5 y PB6) tienen germoplasma con potencial heterótico y se podrían aprovechar sus efectos positivos de heterosis para la formación de híbridos de maíz sobresalientes. Márquez (2007) menciona que cuando las líneas, a veces con bajo rendimiento y aun con defectos que parecen insuperables, al momento de cruzarse muestran alta heterosis (Espinosa *et al.*, 1998; Espinosa *et al.*, 2012), por su parte, las cruzas resultado de la combinación de la población PB3, mostraron valores inferiores al promedio general de heterosis (-21.46 a 8.04%).

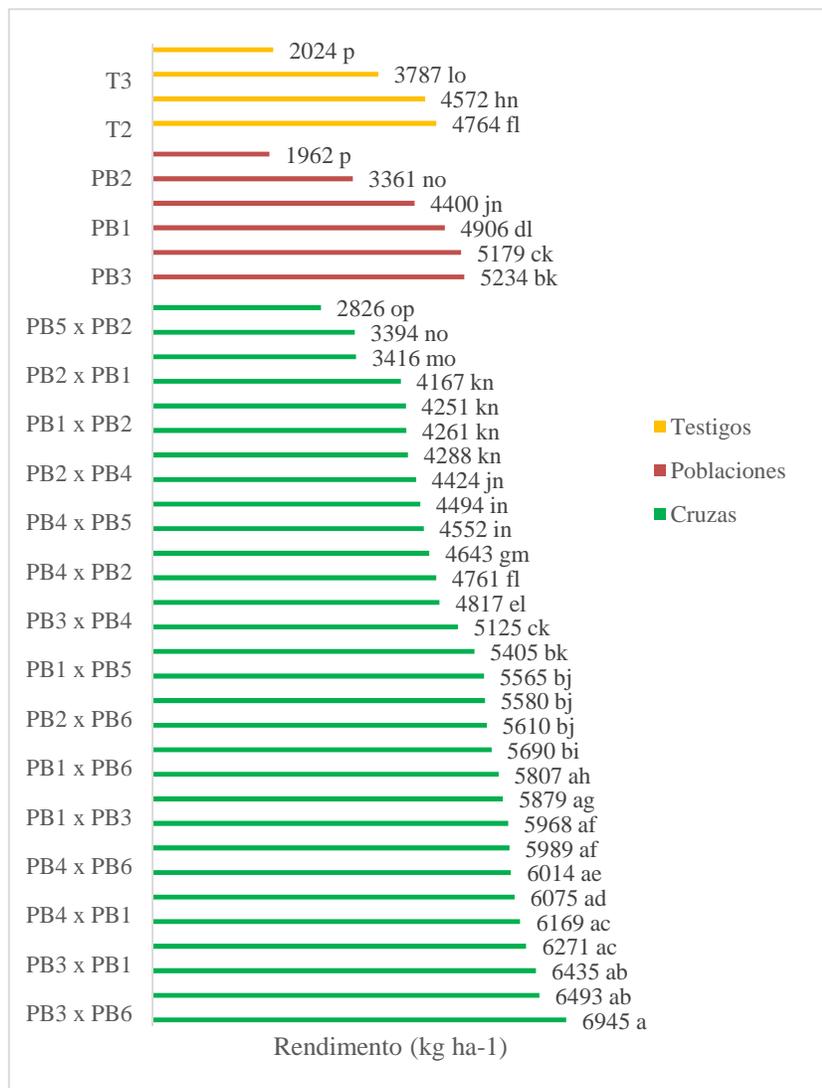


Figura 1.1. Rendimiento de las poblaciones progenitoras de maíz palomero, sus cruzas (directas y reciprocas) y testigos de maíz palomero. Ciclo primavera- verano de 2018 a 2020.

Cuadro 1.5. Valor de la heterosis con respecto al progenitor medio de las cruzas de las poblaciones de maíz palomero, en el promedio de seis ambientes de evaluación. Ciclo primavera- verano de los años 2018 a 2020.

Cruzas	Rendimiento	Heterosis
PB6 x PB5	6271	75.63
PB1 x PB5	5565	62.06
PB5 x PB6	5405	51.38
PB4 x PB5	4552	43.10
PB5 x PB1	4817	40.27
PB6 x PB2	5879	37.68
PB5 x PB4	4288	34.80
PB3 x PB6	6945	33.39
PB4 x PB1	6169	32.58
PB2 x PB6	5610	31.38
PB2 x PB5	3416	28.35
PB5 x PB2	3394	27.52
PB3 x PB1	6435	26.92
PB6 x PB4	6075	26.84
PB4 x PB6	6014	25.57
PB3 x PB5	4494	24.90
PB6 x PB3	6493	24.71
PB4 x PB2	4761	22.69
PB1 x PB4	5690	22.29
PB6 x PB1	5989	18.77
PB1 x PB3	5968	17.71
PB4 x PB3	5580	15.84
PB1 x PB6	5807	15.16
PB2 x PB4	4424	14.01
PB3 x PB2	4643	8.04
PB3 x PB4	5125	6.39
PB1 x PB2	4261	3.08
PB2 x PB1	4167	0.81
PB2 x PB3	4251	-1.08
PB5 x PB3	2826	-21.46

1.6. CONCLUSIONES

La estimación de la heterosis en los materiales de maíz palomero evaluados permitió identificar a las poblaciones PB5 y PB6 como las más aptas para generar combinaciones con potencial para rendimiento de grano, pues sus progenies mostraron rendimientos altos, pero no los mejores, además expresaron valores superiores en cada característica agronómica evaluada, como ciclo vegetativo precoz (77 días), granos pesados y grandes, y una la relación grano/mazorca es 83%.

El uso de estas cruzas sobresalientes de poblaciones de maíz palomero resulta una alternativa para incrementar el rendimiento de grano en este tipo de maiz, ya que más de mitad de las cruzas de las poblaciones superaron el rendimiento medio de los testigos.

CAPÍTULO 2. CALIDAD Y VOLUMEN DE EXPANSIÓN EN POBLACIONES Y

CRUZAS DE MAÍZ PALOMERO DE VALLES ALTOS

2.1. RESUMEN

En México, el consumo de maíz (*Zea mays* L.) para la nixtamalización ha hecho que se priorice el cultivo de variedades e híbridos con granos semidentados, dentados, y harinosos, dejando muy de lado la utilización de materiales reventadores que se emplean para su aprovechamiento en palomitas; esto ha ocasionado que los maíces reventadores sean menos atractivos para el productor. En los últimos años, en México se ha dejado de usar ese tipo de maíces, aun a pesar de su importancia evolutiva y de su adaptación en ambientes desfavorables, pues como tal no existen muchos programas dirigidos al mejoramiento de las razas de maíz palomero de México. Producto de trabajos de mejoramiento genético desarrollados en la FESC-UNAM e INIFAP, se cuenta con poblaciones élites de maíz palomero, y con base en ellas, en este trabajo se estableció como objetivo definir el rendimiento y características de importancia que determinan la calidad de reventado de seis poblaciones de maíz palomero, sus cruzas (directas y recíprocas) y cuatro materiales desarrollados en el INIFAP como testigos. Las variables evaluadas fueron: rendimiento de grano, volumen de expansión, tiempo de reventado, porcentaje de granos sin reventar, y forma de la roseta. Todos los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. El promedio general de rendimiento fue de 5981 kg ha⁻¹; por muestra, el tiempo de reventado fue de 1:36 min, el volumen de expansión fue de 12.6 cm³ g⁻¹, el porcentaje de granos sin reventar fue de 16.6% y en escala visual (1-5) fue de 3, respectivamente. Sólo se presentó la forma de roseta tipo mariposa. Los resultados indican que, en más de la mitad de los materiales evaluados, en las cruzas, se tiene baja capacidad de expansión en relación con el material comercial; sin embargo, su rendimiento de grano superó a la media nacional, pero solo dos materiales, PB3xPB5 y PB4xPB2 demuestran tener capacidad de rendimiento y expansión superando las medias. La amplitud en las variables evaluadas demuestra la diversidad que existe dentro de las poblaciones, así como en las cruzas de estas.

Palabras clave: *Zea mays*, maíz palomero, reventado, población, cruza, volumen de expansión, roseta, tiempo.

CHAPTER 2. QUALITY AND VOLUME OF EXPANSION IN POPULATIONS AND CROSSES OF POPCORN IN HIGH VALLEYS

2.2. ABSTRACT

In Mexico, the consumption of corn (*Zea mays* L.) for nixtamalization has led to prioritizing the cultivation of varieties and hybrids with semi-dented, dented, and floury grains, leaving aside the use of popping materials that are used for their cultivation in the use in popcorn; this has caused popping corn to be less attractive for the producer. In recent years, in Mexico this type of maize has ceased to be used, despite its evolutionary importance and its adaptation in unfavorable environments, since as such there are not many programs aimed at improving the breeds of popcorn from Mexico. As a result of genetic improvement work developed at FESC-UNAM and INIFAP, there are elite populations of popcorn, and based on them, this work established the objective of defining the performance and important characteristics that determine the quality of popping of six populations of popcorn, their crosses (direct and reciprocal) and four materials developed at INIFAP as checks. The variables evaluated were: grain yield, expansion volume, popping time, percentage of grains without popping, and rosette shape. All genotypes were evaluated in a randomized complete block experimental design with three replicates per environment. The general yield average was 5,981 kg ha⁻¹; per sample, the popping time was 1:36 min, the expansion volume was 12.6 cm³ g⁻¹, the percentage of grains without popping was 16.6% and on a visual scale (1-5) it was 3, respectively. Only the butterfly rosette shape was presented. The results indicate that in more than half of the evaluated materials, in the crosses, there is a low expansion capacity in relation to the commercial material; however, its grain yield was higher than the national average, but only two materials, PB3xPB5 and PB4xPB2, show higher grain yield and expansion capacity than the average. The amplitude in the evaluated variables demonstrates the diversity that exists within the populations, as well as in the crosses of these.

Keywords: *Zea mays* L., popcorn, popping, population, crosses, expansion volume, rosette, time. }

2.3. INTRODUCCIÓN

Las palomitas o rosetas de maíz son los bocadillos más populares para consumir viendo películas, tanto en los cines como en los hogares alrededor del mundo; sin embargo, la mayoría de la producción de maíz se utiliza para la elaboración de alimentos para el ser humano y la obtención de compuestos y derivados que son aprovechados en la industria alimentaria, farmacéutica, energética y química, así como en la alimentación de la ganadería (De la O, 2018).

En México, el principal uso del maíz es para consumo alimenticio para la población, en específico para nixtamalización para elaborar tortillas, en consecuencia, se siembran maíces palomeros con potencial de reventado junto con materiales dentados, semidentados y harinosos para mejorar la calidad de la masa (Bautista-Ramírez *et al.*, 2020), dejando de lado la calidad de reventado para exclusivamente palomitas.

Teniendo en cuenta lo anterior descrito, y ante la falta de variedades nativas mejoradas de maíz palomero, esto ha ocasionado el abandono de este tipo de maíz, ya que el único estado productor de este maíz especial es Tamaulipas, que, hasta su último registro en 2019, generó 596 toneladas (SIAP, 2019). Esta situación ha causado que México dependa casi al 100 % de la producción extranjera de maíz palomero.

México es considerado como el centro de origen y domesticación del maíz, así mismo, como centro de diversificación de tipos y usos para este cultivo (Kato *et al.*, 2009). De esta diversificación se formaron los primeros tipos de maíz, como las razas indígenas antiguas (Palomero Toluqueño, Chapalote, Nal-Tel y Arrocillo Amarillo) mencionadas por Wellhausen *et al.*, (1951) que se desarrollaron en condiciones de inviernos secos con lluvias en verano y en altitudes de más 1500 m de altitud, al igual que su ancestro directo: el teociltle (Villanueva, 2008).

Cabe resaltar que el teocintle, así como las razas indígenas antiguas, se caracterizan por tener la propiedad de reventar el grano (Romero *et al.*, 2006).

Las razas y variedades nativas de maíz han sido desatendidas al no haber realizado mejoramiento para el carácter de reventado del grano, y las variedades que están disponibles entre productores locales tienen baja capacidad de expansión, por lo que el mercado y los consumidores no los aceptan. Ahora bien, existen antecedentes de que en el año 1977 se liberó el primer híbrido de maíz palomero en México (H 367 P) (Miranda; 1977; Ángeles, 2000), y en el año 2012 se liberó la primera variedad de maíz palomero V 460 P (Valadez *et al.*, 2014), pero en general no existen trabajos dirigidos a incrementar el volumen de expansión en las razas, poblaciones y variedades nativas de maíz palomero de México.

Para evaluar la capacidad de expansión en maíces palomeros, las principales variables a tomar en cuenta son: volumen de producto obtenido por unidad de peso de grano, forma de la roseta, (Ziegler, 2001), así como la proporción de granos sin reventar (Soylu y Tekkanat, 2007), todas ellas influenciadas por factores físicos de la semilla, como grosor y dureza del pericarpio (Hoseney *et al.*, 1983) y humedad del grano (Gökmen, 2004).

Por tanto, para evaluar germoplasma mexicano de maíz para palomitas, el objetivo de esta investigación fue determinar el rendimiento y la capacidad de expansión en poblaciones elites obtenidas en la FESC-UNAM e INIFAP, y sus cruces, así como de testigos de maíz palomero, con base en ello podría definirse el diseño de programas de mejoramiento genético de los mismos para ser utilizados en la producción de palomitas.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

En este trabajo se evaluaron 40 genotipos; de ellos, 6 son poblaciones élite de maíz palomero, obtenidas en la FESC-UNAM e INIFAP como resultado de combinaciones de fuentes de calidad proteínica (QPM), con germoplasma de variedades palomeras nativas y líneas provenientes de Tamaulipas, así como otras fuentes traídas de Estados Unidos, con la intención de agregar calidad de expansión a las palomitas; otros 30 son cruza (directas y recíprocas) entre dichas poblaciones élite, de las cuales se obtuvieron a partir de polinizaciones controladas para evitar cualquier contaminación de otro material genético, y se incluyeron 4 testigos experimentales de maíces palomeros, desarrollados en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Ubicación

Los experimentos se establecieron en el ciclo agrícola primavera- verano de 2020 en dos localidades: la primera en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, México (19° 41' N, 99° 11' O; 2274 m de altitud), y tiene suelo de textura franco arcillosa, y la segunda en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX-INIFAP), que se encuentra en Santa Lucía de Prías, Coatlinchán, municipio de Texcoco, Estado de México (19° 27' N, 98° 51' O, 2326 m de altitud), con suelo de textura franco arenosa.

Tamaño de grano

En este trabajo se consideró el tamaño de grano, para lo cual se utilizaron zarandas para separar granos de tamaños de 5mm y 7mm, ya que de acuerdo con Pordesimo *et al.* (1990), los tamaños de granos influyen, sobre todo, en el volumen de expansión, ya que los granos retenidos en tamices de $5 < D < 6$ mm tenían mayores volúmenes de expansión que los retenidos en tamices de $6 < D < 7$ mm, (D, diámetro medio geométrico, mm).

Diseño estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en cada localidad, donde la unidad experimental constó de un surco de 5 m de largo y 0.80 m de ancho. Previo a la siembra del cultivo, la preparación del terreno consistió en barbecho, dos pasos de rastra y trazado de surcos (distancia entre surcos de 0.8 m). En Santa Lucía se aplicó riego de siembra y después dos riegos de auxilio; en la FESC-UNAM, solo se aplicó un riego a la siembra, y la humedad posterior se cubrió con la precipitación pluvial.

Variables evaluadas

Se evaluaron diversas variables de interés hacia la calidad de reventado, de los granos de cada genotipo, las cuales todas se determinaron en laboratorio.

Las características de reventado se registraron en granos con contenido de humedad de 13.5%, siendo esta considerara como óptima para obtener el volumen de expansión máximo (Bautista- Ramírez *et al.*, 2020).

El reventado se realizó en 80 gramos de granos colocados en máquinas de aire caliente para hacer palomitas de maíz de la marca BPAfree modelo CPM-100W. Se registraron las

siguientes variables: Volumen de expansión (VE, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), el cual se determinó colocando la muestra de grano reventado en una probeta circular con capacidad de 2000 mL (Santacruz- Varela, 2001; De la O-Olan, 2018).

Tiempo de reventado (TR, min), el cual se midió en el momento en que el grano está en la máquina y esta se activa y hasta que se escuche el último grano reventado.

El porcentaje de granos no reventados (PGRN), se reportó como el peso de granos sin reventar entre el peso de la muestra (80 g), y el resultado se multiplicó por 100.

Para la forma de la roseta (FR), se utilizó una escala visual de 1 a 5, donde 1 corresponde al tipo “mariposa” (rosetas con protuberancias muy acentuadas de forma irregular) y 5 al tipo “hongo” (rosetas redondas) (Figura 2.1).



Figura 2.1. Escala visual de la forma de la roseta de palomitas para calificar la calidad de la palomita

Para el rendimiento de grano (Rend, kg ha^{-1}), se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Rend = \frac{(PC \cdot \%MS \cdot \%G) \cdot FC}{8600}$$

dónde: PC= peso de campo en kilogramos; %MS = porcentaje de materia seca de las mazorcas; %G. = porcentaje de grano. Estos tres factores se determinaron previamente en el laboratorio; Fc = factor de conversión para obtener el rendimiento por ha, que se obtiene al dividir

10000 m² entre el tamaño de la parcela útil en m²; 8600 = es una constante para estimar el rendimiento con una humedad comercial del 14%.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza utilizando el modelo lineal de diseño en bloques completos al azar combinado para las dos localidades. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para cada variable; ambos procedimientos se hicieron mediante el paquete estadístico SAS® versión 9.0 (SAS institute Inc., 2002).

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) para todas las variables entre los genotipos (G). Entre tamaños de grano (T) solo la variable de rendimiento no tuvo diferencias altamente significativas. Entre los ambientes (A) solo las variables rendimiento, tiempo de reventado y la forma de la roseta fueron altamente significativas. En la interacción: Genotipo x ambiente (G x A) casi todas las variables presentaron diferencias altamente significativas, con excepción del tiempo de reventado, y en la interacción tamaños de grano por genotipos (T x G) solo la variable de porcentaje de granos no reventados fue altamente significativa.

La significancia detectada entre los ambientes puede ser atribuible a que el rendimiento es un carácter poligénico (Ma *et al.*, 2007) y su comportamiento es altamente influenciado por el ambiente, mientras que el reventado es controlado por una menor cantidad de genes (Lu *et al.*, 2003), haciendo que esta característica y sus componentes tengan una menor influencia ambiental (Cuadro 2.1).

De los valores del coeficiente de variación, solo el de la variable porcentaje sin reventar superó el 20 %, lo que se debe a la propia naturaleza de la variable, que arroja valores muy variables, los que señalan que la muestra es dispersa. En cuanto a las otras variables, los valores van de 8.24 a 18.9 % lo que indica cierta normalidad y control aceptable (<20%) de la variabilidad experimental. Estos valores sugieren que la conducción de los experimentos y los datos y resultados obtenidos son confiables.

El rendimiento tiene una media de 5981 kg ha⁻¹, superando, por mucho, a la media nacional (2680 kg ha⁻¹) (SIAP, 2019). La significancia que se encontró entre ambientes indica que estos tuvieron diferencias en sus condiciones agroecológicas, como la precipitación y la retención de la humedad influenciada por la textura de cada suelo, lo que influyó en la expresión promedio global de los genotipos para casi todas las variables.

Las diferencias altamente significativas entre los genotipos, indican la diversidad genética existente entre las poblaciones élites, que repercute en el comportamiento de sus respectivas cruzas, más la variación con la que contribuyeron los testigos empleados. Por su parte, las significancias entre los tamaños de grano muestran la influencia que tiene el tamaño de los granos, sobre todo en el tiempo de reventado y el volumen de expansión.

En la comparación de medias entre ambientes para la variable rendimiento, se definió que el ambiente con mayor rendimiento y volumen de expansión fue FESC-UNAM (6690 kg ha⁻¹; 12.9 cm³ g⁻¹), el cual fue diferente estadísticamente a CEVAMEX- INIFAP (5271 kg ha⁻¹; 12.4 cm³ g⁻¹); este resultado se debió en parte a que las condiciones edafoclimáticas se mostraron favorables en el primer ambiente, sobre todo de las propiedades del suelo con características de suelo arcilloso, el cual se caracteriza por retener humedad (Cuadro 2.2).

En la comparación de medias entre los tamaños de granos, el tamaño del grano de 5 mm (Kararbaba, 2006) resultó ser mejor en las variables de volumen de expansión y el porcentaje de granos sin reventar ($14.6 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, 12%) comparado con los resultados mostrados del tamaño de grano de 7 mm ($10.76 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, 21%). El resultado del volumen de expansión confirma lo reportado por Pordesimo *et al.* (1990) y Song *et al.* (1991), en el sentido de que los granos con un tamaño de 5 mm producen valores altos en volumen de expansión (Cuadro 2.2).

Con respecto a la comparación de promedios entre los materiales genéticos, la variable de rendimiento indica que las cruzas (directas y recíprocas) de las poblaciones PB3, PB6 y PB1 (PB3 x PB6, PB6 x PB3, PB3 x PB1 y PB1 x PB3), así como la craza que tiene a la población PB1 como progenitor hembra (PB4 x PB1) registraron los rendimientos más elevados (7961-9149 kg ha^{-1}), pero también mostraron volúmenes de expansión inferiores a la media ($12.6 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$). La craza PB6 x PB3 tuvo el mejor rendimiento con 9149 kg ha^{-1} , pero ya en caracteres de calidad de expansión mostró un valor inferior en volumen de expansión ($5.1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$), y un valor alto en el porcentaje de granos sin reventar (48.9 %), por lo que tal craza no sería recomendable para usar su germoplasma para fines de producción de maíces palomeros, pero en su siembra sería necesario asociarla con maíces de grano dentado, semidentado y harinoso que mejoren la calidad para su uso en la elaboración de tortilla (Bautista- Ramírez *et al.*, 2020).

Con respecto a la comparación de promedios entre los materiales genéticos, la variable de rendimiento indica que las cruzas (directas y recíprocas) de las poblaciones PB3, PB6 y PB1 (PB3 x PB6, PB6 x PB3, PB3 x PB1 y PB1 x PB3), así como la craza que tiene a la población PB1 como progenitor hembra (PB4 x PB1) registraron los rendimientos más elevados (7961-9149 kg ha^{-1}), pero también mostraron volúmenes de expansión inferiores a la media ($12.6 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$). La craza PB6 x PB3 tuvo el mejor rendimiento con 9149 kg ha^{-1} , pero ya en caracteres de calidad de

expansión mostró un valor inferior en volumen de expansión ($5.1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$), y un valor alto en el porcentaje de granos sin reventar (48.9 %), por lo que tal cruce no sería recomendable para usar su germoplasma para fines de producción de maíces palomeros, pero en su siembra sería necesario asociarla con maíces de grano dentado, semidentado y harinoso que mejoren la calidad para su uso en la elaboración de tortilla (Bautista- Ramírez *et al.*, 2020).

Para los volúmenes de expansión, los mejores valores los mostraron un testigo, una población y seis cruces ($21.7\text{-}15.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$); de estos materiales, solo dos cruces tuvieron rendimientos superiores a la media (PB3 x PB5, 6134 kg ha^{-1} ; PB4 x PB2, 6114 kg ha^{-1}) (Cuadro 2.3). Estas cruces superan en rendimiento a la variedad comercial V460P, el cual muestra valores 5 t ha^{-1} en riego y 2.3 t ha^{-1} en temporal en la zona de las Huastecas en Tamaulipas (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2014). En los porcentajes de granos sin reventar, estos dos materiales tuvieron valores bajos (8.2% y 11.7%) y una forma de roseta clasificada en la escala 3. Dichos valores mostrados hacen que estos materiales puedan ser considerados como una alternativa para el uso comercial de maíces palomeros para los Valles Altos.

Cuadro 2.1. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza de la evaluación de las poblaciones élite, cruza directas y recíprocas de maíz palomero, y testigos de maíz palomero en los Valles Altos. Primavera y verano de 2020.

Fuente de variación	Ambiente (A)	Genotipo (G)	Tamaño (T)	G x A	T x G	T x A	Error	Media	CV (%)
GL	1	39	1	39	39	1	-	-	-
Rend	241479766.5**	24373511.5**	0	3472341**	0	0	834748	5981	15.3
TR	1.38**	0.04**	2.16**	0.02	0.01	0.00001	0.02	01:36	8.24
VE	26.8*	143.8**	1756.6**	17.32**	8.9*	5.1	5.7	12.6	18.9
PGSR	0.09	701**	8795**	107**	98**	205	55.77	16.6	44.9
FR	67**	0.95**	1.5*	0.95**	0.11	2*	0.33	3	17.1

** $p \leq 0.01$, * $p \leq 0.05$; GL: Grados de libertad; Rend: Rendimiento; TR: Tiempo de reventado; VE: Volumen de expansión; PGSR: Porcentaje de granos sin reventar; FR: Forma de la roseta; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 2.2. Comparación de medias entre ambientes y tamaños de grano del análisis estadístico de la evaluación del promedio de poblaciones élite de maíz palomero. Primavera-verano de 2020.

Fuente de Variación	Ambientes		Tamaño		
	FESC- UNAM	CEVAMEX-INIFAP	5 mm	7 mm	DHS
Rend (kg ha ⁻¹)	6690 a	5271 b	5980 a	5980 a	164.03
TR (min)	1.56 b	1.67 a	1.68 a	1.55 b	0.02
	01:33	01:40	01:40	01:33	
VE (cm ³ g ⁻¹)	12.9 a	12.4 b	14.6 a	10.7 b	0.43
PGSR (%)	17 a	17 a	12 b	21 a	1.34
FR	4a	3b	4a	3b	0.1

Medias con diferente letra en cada hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DHS: diferencia significativa honesta; Rend: Rendimiento; TR: Tiempo de reventado; VE: Volumen de expansión; PGSR: Porcentaje de granos sin reventar; FR: Forma de la roseta.

Cuadro 2.3. Comportamiento medio de las poblaciones élite, cruzas directas y recíprocas de maíz palomero, y testigos de maíz palomero. Primavera -verano de 2020.

Genotipo	Rendimiento	VE	TR		PGSR	FR
T4	2842 q	21.7 a	1.68 ad	01:40	3.3 j	3 abc
PB5	2547 q	19.5 ab	1.7 ac	01:42	6.9 ij	3 abc
PB4 x PB5	5630 ho	18.1 abc	1.66 ad	01:39	9.0 gj	3 abc
PB3 x PB5	6134 fl	17.8 bcd	1.58 ad	01:34	8.2 hi	4 abc
PB2 x PB5	4315 op	16.8 be	1.58 ad	01:34	10.5 fj	3 abc
PB5 x PB2	4926 mp	16.2 bf	1.55 ad	01:33	11.8 ej	3 abc
PB4 x PB2	6114 fl	15.5 cg	1.65 ad	01:39	11.7 ej	3 abc
PB2	4449 op	15.4 ch	1.62 ad	01:37	10.3 fj	3 abc
PB5 x PB4	5419 io	15.3 ch	1.63 ad	01:37	13.7 dj	4 abc
PB5 x PB3	3547 pq	15.2 ch	1.62 ad	01:37	20.2 bg	4 abc
PB5 x PB1	5946 fn	14.5 ci	1.62 ad	01:37	11.9 ej	4a
PB4 x PB3	6400 fk	14.1 dj	1.66 ad	01:39	15.4 ci	3 bc
PB1 x PB5	6498 ek	13.9 ej	1.64 ad	01:38	9.7 fj	3 abc
PB5 x PB6	5967 fn	13.9 ej	1.6 ad	01:36	13.1 ej	4 ab
PB3	7318 bf	13.7 ek	1.59 ad	01:35	14.5 cj	3 abc
PB6 x PB5	7127 bg	13.6 ek	1.57 ad	01:34	11.6 ej	3 abc
PB2 x PB4	5694 go	13.6 ek	1.6 ad	01:36	15.3 ci	4 abc
PB3 x PB2	6374 fl	13.3 el	1.56 ad	01:33	10.1 fj	3 abc
PB2 x PB1	5243 jo	13.1 el	1.56 ad	01:33	12.5 ej	3 abc
PB2 x PB6	7312 bf	12.5 fm	1.63 ad	01:37	15.5 ci	3 abc
PB3 x PB4	6122 fl	12.0 gn	1.62 ad	01:37	15.5 ci	4 ab
PB6 x PB2	6667 dk	11.8 go	1.55 ad	01:33	15.6 ci	3 abc
PB3 x PB1	8105 ad	11.6 hp	1.75 a	01:45	19.6 bh	4 ab
T2	5173 lo	11.6 hp	1.58 ad	01:34	13.1 ej	3 abc
PB2 x PB3	5290 io	11.5 hp	1.54 ad	01:32	17.4 ci	4 ab
PB4 x PB1	8146 ac	11.2 ip	1.67 ad	01:40	18.6 bi	4a
PB4	5384 io	11.1 ip	1.62 ad	01:37	19.7 bh	3 abc
PB1 x PB2	4360 op	11.1 ip	1.65 ad	01:39	15.7 ci	4 abc
PB4 x PB6	6752 ci	11.0 ip	1.61 ad	01:36	18.7 bi	3 abc
PB1 x PB3	7961 ae	10.5 jp	1.63 ad	01:37	19.9 bh	4 ab
T1	5199 lo	10.0 kp	1.71 ac	01:42	22.5 be	3 abc
PB1 x PB4	6683 ck	9.7 lp	1.64 ad	01:38	20.9 bg	4 ab
T3	4614 np	9.6 lp	1.47 d	01:28	25.1 bd	4a
PB6 x PB4	6403 f-k	9.0 mp	1.61 ad	01:36	22.8 be	4 ab
PB6	6243 fl	8.9 mp	1.53 bd	01:31	18.6 bi	4 abc
PB1 x PB6	6703 cj	8.4 nq	1.54 ad	01:32	20.4 bg	4 abc
PB3 x PB6	8232 ab	8.2 oq	1.6 ad	01:36	21.3 bf	3 abc
PB6 x PB1	7022 bh	8.1 oq	1.51 cd	01:30	26.2 bc	4 abc
PB1	5225 ko	7.8 pq	1.74 ab	01:44	29.5 b	3 abc
PB6 x PB3	9149 a	5.1 q	1.55 ad	01:33	48.9 a	3 c

Medias con diferente letra en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p < 0.05$); DSH: diferencia significativa honesta; TR: Tiempo de reventado; VE: Volumen de expansión; PGSR: Porcentaje de granos sin reventar; FR: Forma de la roseta.

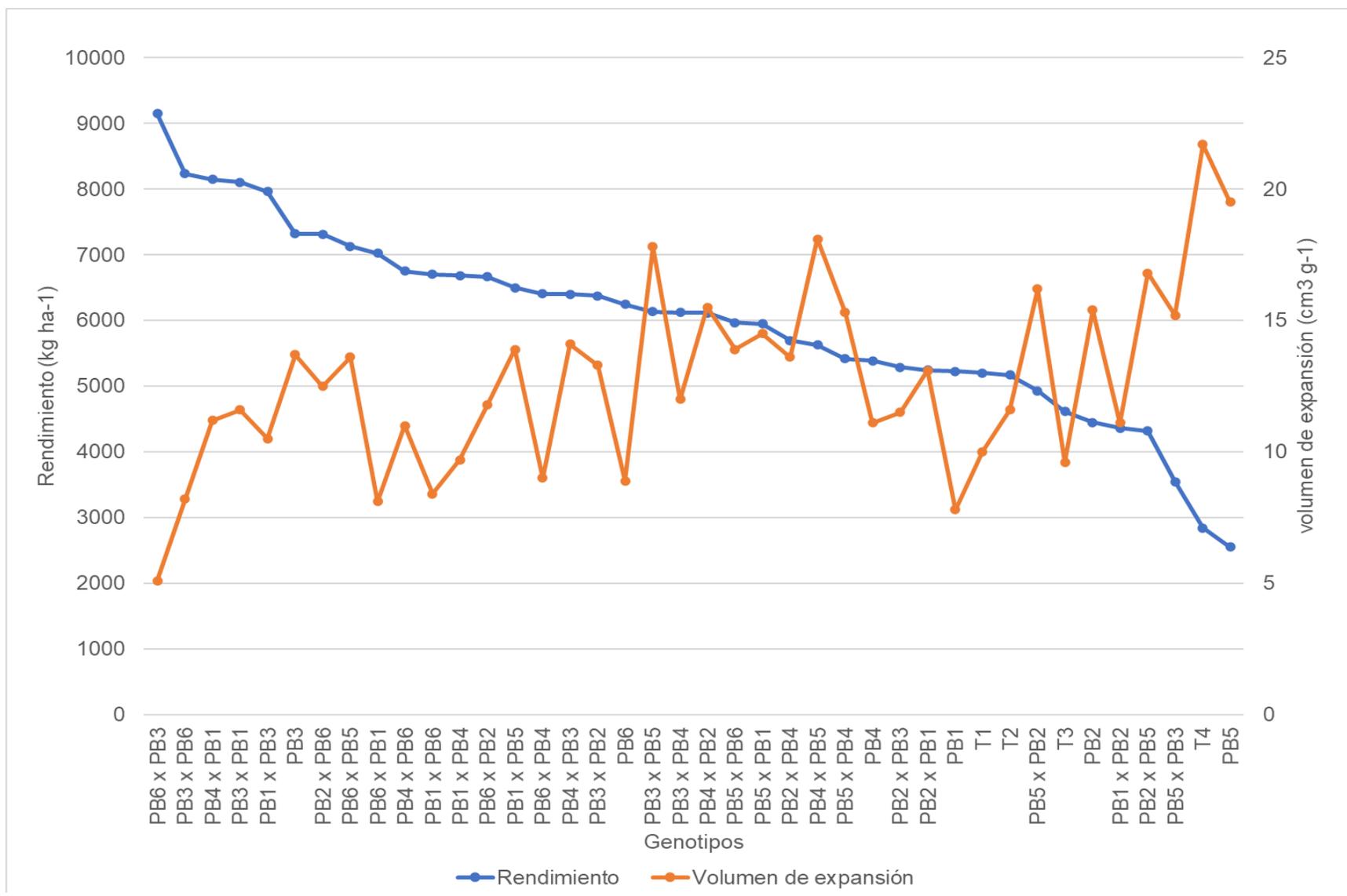


Figura 2.2. Comportamiento del volumen de expansión de los genotipos con respecto a su rendimiento

2.6. CONCLUSIONES

Más de la mitad de las poblaciones de maíces palomeros evaluados, cuya estructura genética es resultado de combinaciones de cruzas de material genético de diferentes regiones, en su estado actual no cuentan por completo con los atributos de reventado excelente deseados en el mercado para la elaboración de palomitas.

Existen poblaciones y cruzas sobresalientes en rendimiento de grano y capacidad de expansión que permitirán continuar con el programa de selección y mejoramiento genético, tal es el caso de la población PB3xPB5 y PB4xPB2 cuyo rendimiento y volumen de expansión superaron los promedios del experimento, por lo cual podría ser una alternativa para los productores de la región de los valles altos.

CAPÍTULO 3. APTITUD COMBINATORIA GENERAL Y ESPECÍFICA DE MAÍZ PALOMERO PARA LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO

3.1. RESUMEN

La demanda de maíz palomero (*Zea mays* L.) en México aumenta cada vez, pero su producción anual nacional es insuficiente, y la demanda de 80 mil toneladas se cubre con importaciones. La oferta de variedades mejoradas nacionales de este tipo de maíz es muy escasa. Con el objetivo de identificar materiales de maíz palomero sobresalientes, en este trabajo se estimaron los efectos de aptitud combinatoria general, específica, y efectos maternos y recíprocos para rendimiento de seis poblaciones élites de maíz palomero y sus cruzas dialélicas. Los materiales se evaluaron en seis ambientes, en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, en los años 2018 a 2020. Dentro de los materiales sobresalientes, la población 6 (PB6) por su alto rendimiento, tendría una alta contribución en la expresión del rendimiento de su progenie. Las cruzas con mayor aptitud combinatoria específica (ACE) para rendimiento fueron PB3 x PB6 y PB6 x PB3, respectivamente. Las poblaciones de maíz palomero de este trabajo que presentaron altos efectos de ACG para rendimiento pueden emplearse para desarrollar variedades sintéticas o seguir avanzándolas con más ciclos de selección, mientras que las cruzas con alta ACE se pueden usar para obtener híbridos de maíz palomero en México.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica, maíz palomero, poblaciones, rendimiento.

CHAPTER 3. GENERAL AND SPECIFIC COMBINATORY ABILITY OF POPCORN FOR THE HIGH VALLEYS OF MEXICO

3.2. ABSTRACT

The demand for popcorn (*Zea mays* L.) in Mexico is increasing every time, but its national annual production is insufficient, and the demand of 80 thousand tons is covered by imports. The offer of national improved varieties of this type of maize is very scarce. In order to identify outstanding popcorn materials, in this work the effects of general and specific combining ability, and maternal and reciprocal effects for the yield of six elite populations of popcorn and their diallel crosses were estimated. The materials were evaluated in six environments, in a randomized complete block experimental design with three replications, in the years 2018 to 2020. Among the outstanding materials, population 6 (PB6), due to its high performance, would have a high contribution in expression of the performance of their progeny. The crosses with the highest specific combining ability (SCA) for grain yield were PB3 x PB6 and PB6 x PB3, respectively. The popcorn populations in this work that showed high GCA effects for grain yield can be used to develop synthetic varieties or further advance them with more selection cycles, while the high GCA crosses can be used to obtain popcorn hybrids in Mexico.

Keywords: *Zea mays* L., general combining ability, specific combining ability, popcorn, populations, grain yield.

3.3. INTRODUCCIÓN

El consumo anual de maíz palomero (*Zea mays* L.) en México se estima en 80 mil toneladas, de las cuales en el país solamente se producen 596 toneladas (SIAP, 2019) y el resto se importa. Esta situación genera que México dependa de la producción extranjera de maíz palomero, por lo que se requiere con urgencia la generación de variedades mejoradas nacionales de este tipo de maíz. No obstante, la falta de variedades “reventadoras” y el rezago tecnológico han dificultado estructurar un programa nacional de producción de maíz palomero que permita satisfacer el consumo interno (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2014).

Casi todo el maíz palomero que se consume en el país es de importación, en su gran mayoría de Estados Unidos. Sin embargo, en México existen razas de maíces que producen granos “reventadores”, que en teoría son aptos para producir “palomitas”, pero con baja capacidad de expansión, por lo que el mercado y los consumidores no los aceptan. Tales maíces podrían utilizarse en programas de mejoramiento genético para obtener variedades e híbridos de maíz palomero en México. No obstante, al respecto existen antecedentes de que en el año 1977 se liberó el primer híbrido de maíz palomero en México (H 367 P) (Miranda; 1977; Ángeles, 2000), y en el año 2012 se liberó la variedad de maíz palomero V 460 P (Valadez *et al.*, 2014), lo cual es un aliciente.

El centro de origen del maíz palomero es Mesoamérica, y este tipo de maíz se considera el más primitivo (Mangelsdorf y Smith, 1949); numerosas evidencias demuestran que su grado de rusticidad y capacidad de reventado están emparentados con el teocintle (Piperno y Pearsall, 1993); pero su relación con otros grupos de maíces está aún bajo discusión (Ziegler, 2001). Este origen

le confiere al maíz palomero una alta adaptación a las condiciones ecológicas de México y una gran diversidad que se puede aprovechar para su mejoramiento genético.

Entre los métodos para estudiar las cualidades de un conjunto de progenitores de maíz palomero se encuentran los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956), que permiten estimar sus parámetros genéticos tales como su aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE); además, permiten definir el método más adecuado de mejoramiento genético para predecir cruzas superiores y combinar las mejores características de importancia agrícola (Cai *et al.*, 2012; Melani y Carena, 2005). La ACE es más importante que la ACG en un programa de mejoramiento cuya finalidad sea la obtención de híbridos (Hoegemeyer y Hallauer, 1976), ya que con la ACE se puede hacer mejor uso de la dominancia y la epistasis.

Dado que en México se tiene necesidad de generar materiales sobresalientes de maíz palomero para disminuir su dependencia del grano extranjero, y ante el interés estratégico de ofrecer variedades mejoradas utilizando el germoplasma nativo nacional disponible, desde hace más de 20 años en la Facultad de estudios Superiores Cuautitlán de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC UNAM) y Campo Experimental del Valle de México del CEVAMEX INIFAP se trabaja en el desarrollo de variedades de maíz palomero para ofrecer alternativas competitivas de este tipo de materiales a los productores; en el proceso de mejoramiento genético aplicado durante todo este tiempo, se concentró con énfasis en el criterio de rendimiento, dejando un tanto de lado el carácter de reventador. Producto de estos trabajos se cuenta con variedades experimentales y poblaciones élites, en las cuales se genera la tecnología para su producción (Espinosa *et al.*, 2018).

Desde 1997 se combinaron fuentes de calidad proteínica (QPM) con variedades palomeras nativas y líneas traídas de Tamaulipas y del exterior, con la intención de agregar calidad de expansión a las palomitas, después de efectuaron varios ciclos de retrocruza hacia calidad palomera (Espinosa *et al.*, 2018).

Con base en seis poblaciones élite, el objetivo de esta investigación fue determinar los componentes genéticos de ACG, ACE, y efectos recíprocos y maternos involucrados en la expresión del rendimiento de seis variedades de maíz palomero adaptado a los Valles Altos de México y sus respectivas cruzas.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los ciclos primavera verano de 2018 a 2020 se sembraron en seis ambientes (combinación de localidad y año), 36 genotipos de maíz con potencial de reventado en tres localidades del Estado de México: en los tres años se sembró en terrenos de la FESC-UNAM; en el año 2018 se sembró en terrenos ejidales de la comunidad de Huexotla, Texcoco, Estado de México, y en 2019 y 2020 en el CEVAMEX-INIFAP. La FESC-UNAM está ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, México (19° 41' N, 99° 11' O; 2274 m de altitud), y tiene suelo de textura franco arcillosa. El CEVAMEX-INIFAP se encuentra en Santa Lucía de Prías, Coatlinchán, municipio de Texcoco, Estado de México (19° 27' N, 98° 51' O, 2326 m de altitud), con suelo de textura franco arenosa. El ejido Huexotla está ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México (19° 29' N, 98° 52' O, 2300 m de altitud), con suelo de textura franco limosa.

Los genotipos evaluados incluyeron seis poblaciones élite de maíz palomero que fueron integradas desde 1997, para ello se combinaron fuentes de calidad proteínica (QPM) con variedades palomeras nativas y líneas provenientes de Tamaulipas, así como con otras fuentes

traídas de Estados Unidos, con la intención de agregar calidad a las palomitas; después se efectuaron varios ciclos de retrocruza hacia calidad palomera (Anexo 1). También se incluyeron cuatro testigos, y 15 cruzas directas y 15 recíprocas correspondientes a un dialélico completo [Método I de Griffing (1956)] (Figura 1).

	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6
PB1	PB1xPB1	PB1xPB2	PB1xPB3	PB1xPB4	PB1xPB5	PB1xPB6
PB2	PB2xPB1	PB2xPB2	PB2xPB3	PB2xPB4	PB2xPB5	PB2xPB6
PB3	PB3xPB1	PB3xPB2	PB3xPB3	PB3xPB4	PB3xPB5	PB3xPB6
PB4	PB4xPB1	PB4xPB2	PB4xPB3	PB4xPB4	PB4xPB5	PB4xPB6
PB5	PB5xPB1	PB5xPB2	PB5xPB3	PB5xPB4	PB5xPB5	PB5xPB6
PB6	PB6xPB1	PB6xPB2	PB6xPB3	PB6xPB4	PB6xPB5	PB6xPB6

Figura 3.1. Esquema de cruzas directas (diagonal derecha superior) y recíprocas (diagonal izquierda inferior) de las seis poblaciones elite (PB) de maíz palomero para definir ACE y ACG.

En cada uno de los seis ambientes que se definen por la localidad y año, se estableció un experimento donde los genotipos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, a una densidad de 65 000 plantas ha⁻¹, y la parcela experimental consistió de un surco de 5 m de largo por 0.80 m de ancho. La siembra se efectuó en el mes de junio en seis ambientes, es decir en tres años y en las tres localidades. En 2018, en Huexotla había humedad en el suelo al momento de la siembra y se aplicaron tres riegos de auxilio; en 2019 y 2020, en Santa Lucía se aplicó riego de siembra y después dos riegos de auxilio; en la FESC-UNAM, en los tres años solo se aplicó un riego a la siembra, y la humedad posterior se cubrió con la precipitación pluvial.

En el periodo de crecimiento hasta la fecha de cosecha, se obtuvo información sobre 18 rasgos cuantitativos relacionados con las características morfológicas y la composición del rendimiento.

La cosecha fue manual entre los meses de noviembre y diciembre. En cada parcela se cosecharon todas las mazorcas, y se registró su peso en campo (PC). Al azar se tomaron cinco mazorcas de cada unidad experimental y se desgranaron para registrar su porcentaje de humedad, utilizando un determinador de humedad marca DICKEY-john, modelo: mini GAC plus, por diferencia de 100 %, se obtuvo el porcentaje de materia seca (% MS); además, se calculó el porcentaje de grano mediante el cociente de peso del grano entre el peso de grano más olotes (% G). Para determinar el rendimiento de grano por hectárea se usó la fórmula:

$$\text{Rendimiento: } (PC \times \% MS \times \% G \times FC) / 8600,$$

donde PC: peso de campo del total de mazorcas cosechadas por parcela (en kg); FC: factor de conversión para obtener rendimiento por ha, el cual se obtuvo al dividir 10000 m² entre el tamaño de la parcela útil en m² (4 m²); 8600: es un valor constante que permite estimar el rendimiento con una humedad uniforme del 14 %, en la cual se manejan las semillas en forma comercial.

De acuerdo con los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico para identificar las variables con mayor correlación con el rendimiento de grano. Los componentes más relacionados con el rendimiento se definen como: floración masculina (número de días) y peso volumétrico (kg hL⁻¹).

El análisis genético estadístico se realizó con el programa SAS® v 9.0 (SAS, 1996) para la variable de rendimiento con el Modelo I (de efectos fijos), Método I (dialélico completo) de Griffing (1956), el cual examina las líneas parentales, las cruzas directas y recíprocas, esto mediante el programa DIALLEL-SAS propuesto por Zhang y Kang (2003), que permite la división de los efectos recíprocos (ER) maternos y no maternos. La importancia relativa de ACG y ACE se evaluó con la fórmula que propuso Baker (1978):

$$[2 \times CM_{ACG}] / [2 \times CM_{ACG} + CM_{ACE}]$$

donde CM_{ACG} es el cuadrado medio de la ACG y CM_{ACE} es el cuadrado medio de la ACE.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

Se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre ambientes, cruzas, ACG, ACE, así como en la interacción ambiente por cruzas (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Cuadrados medios y significancia estadística para rendimiento, floración masculina y peso volumétrico de cruzas dialélicas con poblaciones élite de maíz palomero aplicando el Modelo I de Griffing (1956) en Valles Altos de México.

Factores de Variación	GL	Rendimiento	Floración Masculina	Peso Volumétrico
Ambiente	5	356950476**	743.8**	1038.1**
Cruzas	35	23437657**	15.9**	39.3*
ACG	5	75872456.6**	35.6**	87.75**
ACE	15	8940684.7**	8.9	20.21
EMat	5	43093328.6**	24.7**	20.68
ERec	15	20456363.5**	16.3**	42.18*
Amb x cruzas	175	2576993**	6.7	31.26*
Amb x ACG	4	8162806.4**	1.9	51.4
Amb x ACE	15	2172078.9**	2.3	23.11
Error	420	1244922	5.7	24.17
C.V. (%)		22.7	3.1	6.38
Media		4923	77	77.04
ACG: ACE		0.94	0.89	0.91

Significancia estadística **, *: $p \leq 0.01, 0.05$, respectivamente; GL: Grados de libertad; CM: Cuadrados medios; ACG: Aptitud Combinatoria General; ACE: Aptitud Combinatoria Específica; EMat: Efectos maternos; ERec: Efectos recíprocos; Amb: Ambiente; C.V.: Coeficiente de variación.

Las diferencias estadísticas entre cruzas se atribuyen a la expresión de variación genética entre ellas, y está relacionada con el tipo de acción génica expresada en cada cruzamiento, como aditividad y dominancia generada por la interacción de las poblaciones parentales.

Las diferencias expresadas entre ambientes indican que las condiciones ambientales en diferentes años han cambiado, así como sus efectos en los genotipos, lo cual es el resultado de diferencias entre el clima, el suelo y las condiciones de cultivo. Dichos contrastes se mostraron en la interacción significativa del ambiente por cruza, que Hallauer *et al.* (2010) atribuyen a la amplia variación de las cruzas involucradas en el linaje poblacional utilizado (Anexo 1).

Las diferencias significativas mostradas entre las cruzas llevaron a que la suma de cuadrados se dividiera en la ACG y los efectos maternos de las poblaciones progenitoras, y en la ACE y efectos recíprocos de los cruzamientos. En el caso del rendimiento, tanto la ACG como la ACE mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$), indicando contrastes genéticos debidos a efectos aditivos y no aditivos, cuya contribución de la ACG fue de 94 %. Para las demás variables evaluadas, solo la ACG exhibió diferencias significativas ($p \leq 0.01$), lo que indica que la mayor proporción de la variabilidad genética observada en las poblaciones estuvo asociada con efectos aditivos (Guillen-de la Cruz *et al.*, 2009), cuya contribución fue de 89 % para floración masculina y de 91 % para peso volumétrico.

Baker (1978) propuso la relación entre ACG y ACE para inferir su importancia en el comportamiento de la descendencia. Un valor cercano a 1 indica una mayor probabilidad de comportamiento basado solo en AGC. Además, la proporción relativa de los efectos de ACG y ACE definida por el cuadrado medio señala el tipo de acción génica (Antuna *et al.*, 2003), donde ACG se relaciona principalmente con efectos aditivos y ACE con los no aditivos. Por lo tanto, con base en los resultados de este estudio, se puede inferir que la varianza genética aditiva en las poblaciones es mayor que la no aditiva.

La contribución de los cuadrados medios de la ACG a la variación fue superior a la presentada por la ACE para todas las variables, con excepción de altura de planta y longitud de mazorca.

Los efectos maternos (EMat) fueron significativos ($p \leq 0.01$); es decir, la característica evaluada (rendimiento) estuvo determinada tanto por genes nucleares como por citoplasmáticos, lo que significa que estas cruzas en particular pueden realizarse y utilizarse en ambos sentidos (directo y recíproco). Los efectos recíprocos (ERec) también mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$), lo que se atribuye a los efectos de interacción entre el ADN nuclear y el citoplásmico (Sánchez-Hernández *et al.*, 2011) en las cruzas.

La interacción significativa Amb x cruzas condicionó la división de los efectos de interacción de Amb x ACG y Amb x ACE, las cuales también fueron significativas ($p \leq 0.01$).

Efecto de ACG de las poblaciones

Se encontraron diferencias entre poblaciones ($p \leq 0.01$) para rendimiento (Cuadro 3.2); la PB6 ($5179 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) presentó el valor más alto y PB5 ($1663 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) el menor.

PB6 tendrá una alta contribución en la expresión del rendimiento de su progenie, y como los efectos aditivos resultaron ser los más importantes, podría incluirse en un programa de mejoramiento genético de maíz por selección, para contribuir con alelos favorables para rendimiento (Guillén-de la Cruz *et al.*, 2009), y posteriormente también podría aprovecharse para derivar líneas para la formación de híbridos palomeros rendidores.

Todas las poblaciones progenitoras presentaron valores deseables para las diversas variables evaluadas, con especial énfasis en floración masculina (-0.708) para PB2 (75 días a FM) y peso volumétrico para PB6 (78.2 kg hl⁻¹).

Cuadro 3.2. Efectos de ACG para rendimiento y variables agronómicas evaluadas de seis poblaciones élite de maíz palomero en seis ambientes. Primavera verano 2018 a 2020.

Población	Rendimiento	Floración Masculina	Peso Volumétrico
PB1	-276.02**	-0.181	-0.54
PB2	-268.9**	-0.708**	-0.02
PB3	134.9*	0.25	-0.27
PB4	140.3*	0.028	-0.62*
PB5	-740.6**	0.17	1.06**
PB6	1010.8**	0.44**	0.38

Significancia estadística **, *: $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$.

Los progenitores mostraron valores de efectos maternos superiores (positivos) para rendimiento (Cuadro 3.3), lo que indica que los progenitores pueden expresar su potencial en la variable evaluada en el caso de sus cruzas directas; es decir, cuando se usan exclusivamente como progenitor femenino.

PB2 y PB5 presentaron valores negativos para la variable rendimiento, por lo que se espera que sus cruzas directas se comporten desfavorablemente, es decir, cuando estos progenitores se empleen como hembra, su progenie mostrará detrimento en esta característica (Núñez-Terrones *et al.*, 2019; López-López, 2021).

El efecto de la ACE para el rendimiento fue variable para la mayoría de las cruzas (Cuadro 3.4). Doce cruzas directas fueron superiores ($p \leq 0.01$) a las demás con un rendimiento entre 3858 a 6493 kg·ha⁻¹. Las cruzas directas con mayor ACE para rendimiento fueron PB1 x PB3 (5604 kg·ha⁻¹) y PB5 x PB6 (5279 kg·ha⁻¹).

Cuadro 3.3. Efectos maternos para rendimiento y variables agronómicas evaluadas de seis poblaciones élite de maíz palomero en seis ambientes de Valles Altos. Primavera verano 2018 a 2020.

Población	Rendimiento	Floración Masculina	Peso Volumétrico
PB1	671.6**	0.15	0.32
PB2	-678**	0.294	-0.23
PB3	431.2**	0.156	-0.19
PB4	113.4	0.344	0.55
PB5	-570.9**	-0.222	-0.44
PB6	32.7	-0.722**	-0.015

Significancia estadística **, *: $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$.

Efecto de la ACE de las cruzas de las poblaciones

La craza con mayor ACE no produjo el mejor rendimiento, ya que fue el producto de cruzar dos progenitores de baja ACG, pero las cruzas con mayor rendimiento tuvieron una ACE intermedia, siendo el resultado de cruzar dos progenitores de alta ACG, como lo señalan Espinosa *et al.* (1998); Escorcia-Gutiérrez *et al.* (2010), Guerrero-Guerrero *et al.* (2011) y López-López (2021), al indicar que una craza simple es de alto rendimiento cuando sus progenitores son de alta ACG, o al menos uno de ellos lo es, pero presentan efectos altos positivos de ACE.

Por su parte, ocho cruzas recíprocas (Cuadro 3.4) presentaron diferencias ($p \leq 0.01$), con rendimientos entre 2801 a 6493 kg·ha⁻¹. La craza recíproca con uno de los mayores efectos de ACE para rendimiento fue PB6 x PB3. La craza directa PB3 x PB6 y su craza recíproca (PB6 x PB3), la cual presentó una diferencia altamente significativa, tuvieron rendimientos de los más altos (6945 y 6493 kg·ha⁻¹, respectivamente); estas cruzas son el resultado del cruzamiento entre dos progenitores de alta ACG de igual genealogía.

Para los días a floración masculina de las cruzas, solo una presentó diferencia significativa ($p \leq 0.01$), y el efecto aditivo fue el que predominó en la progenie cuando PB6 se usó como progenitor hembra, pero no fue precoz, ya que presentó 77 días a floración

Cuadro 3.4. Efecto de ACE de 15 cruzas directas y 15 cruzas recíprocas del cruzamiento de seis poblaciones élite de maíz palomero, para rendimiento de grano y variables agronómicas evaluadas en seis ambientes de Valles Altos. Primavera verano 2018 a 2020.

Tipo de cruza	CPP	Rendimiento		Floración Masculina		Peso Volumétrico	
		ACE	kg·ha ⁻¹	ACE	días	ACE	kg hl ⁻¹
Directa	PB1 x PB2	-768.94**	3858	-0.167	77	0.09	77
	PB1 x PB3	547.9**	5604	0.403	77	0.76	78.1
	PB1 x PB4	257.4	5690	0.736*	77	-1.27	75.5
	PB1 x PB5	-367.9*	5414	0.292	78	-0.3	78.4
	PB1 x PB6	-165.1	5807	-0.431	78	-0.71	74.1
	PB2 x PB3	476.9*	4097	-0.125	75	0.05	76.4
	PB2 x PB4	393.6*	4207	0.014	77	0.48	76.7
	PB2 x PB5	202.5	3416	0.125	77	-0.36	77.4
	PB2 x PB6	-85.2	5290	0.542	79	0.07	77.7
	PB3 x PB4	-292	5125	0.722*	78	-0.78	75.6
	PB3 x PB5	-414.3**	4412	-0.167	78	0.09	78.6
	PB3 x PB6	343.8*	6945	0.306	79	0.015	76.1
	PB4 x PB5	-749.5**	4346	-0.278	77	1.16	79.9
	PB4 x PB6	96.3	5848	-0.67**	78	-0.31	79
	PB5 x PB6	483.8*	5279	0.111	77	-0.71	78.3
Recíproca	PB2 x PB1	248.7	4167	0.694	75	0.46	76.7
	PB3 x PB1	274.4	6435	-0.389	76	1.12	77.2
	PB4 x PB1	644.9**	6169	-0.667	76	0.92	77.1
	PB5 x PB1	1875.5**	4817	0.194	77	1.13	78.1
	PB6 x PB1	314.3	5870	0.917*	76	-2.04*	77.2
	PB3 x PB2	-1169**	4530	0.444	77	-0.41	76.4
	PB4 x PB2	-981.04**	4687	0.194	78	-0.18	75.2
	PB5 x PB2	-700.6**	3394	0.222	77	-0.36	77.3
	PB6 x PB2	-290.5	5879	1.31**	77	0.26	78.2
	PB4 x PB3	219.3	5498	-0.25	77	0.19	76.5
	PB5 x PB3	509.2**	2801	0.333	77	0.65	77.4
	PB6 x PB3	533**	6493	0.75	76	-1.8	74
	PB5 x PB4	772.2**	4287	-0.278	77	1.24	79.3
	PB6 x PB4	-322.1	6076	1.278**	79	2.5**	77.3
	PB6 x PB5	-398.3	6271	-0.689	78	0.47	79.4

Significancia estadística **, *: $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.05$; CPP: Cruzas por población; ACE: Aptitud combinatoria específica.

Para el peso volumétrico, la presencia de los progenitores PB4, PB5 y PB6 aumenta la densidad del grano, lo que está relacionado en forma directa con la dureza del grano de su progenie (78.2 a 79.9 kg hl⁻¹) a pesar que en la ACE, tanto en cruce directa como recíproca, no tuvieron significancia alguna. La cruce recíproca PB6 x PB4 fue altamente significativa (2.5), pero mantiene el valor promedio mostrado por las cruces.

Los efectos recíprocos (ERec) son un factor relevante en el mejoramiento genético del maíz, por lo que se debe tener en cuenta la expresión de estos efectos a través de la diversidad genética de los padres (Khehra y Bhalla, 1976).

3.6. CONCLUSIONES

En los materiales evaluados de maíz palomero, los efectos de aptitud combinatoria general (efectos aditivos) fueron más importantes que los de aptitud combinatoria específica, para el rendimiento, floración masculina y peso volumétrico. En las cruces se encontraron efectos maternos y recíprocos, por lo que las características evaluadas están determinadas por la herencia nuclear y citoplasmática, lo que permite cruzar progenitores directa y recíprocamente para el desarrollo y uso de PB6 x PB3 y PB3 x PB6. La cruce directa con mayor aptitud combinatoria específica para rendimiento fue PB3 x PB6. La cruce recíproca con uno de los mayores efectos de ACE para rendimiento fue PB6 x PB3.

El empleo de progenitores de ACG contrastante (alta y baja) permitió que su progenie se expresara con rendimientos favorables. Las poblaciones de maíces palomeros con efectos altos de ACG se pueden usar para desarrollar variedades sintéticas o impulsar ciclos de mejoramiento genético, mientras que las cruces con altos niveles de ACE se pueden usar para la hibridación.

CONCLUSIONES GENERALES

La estimación de la heterosis en los materiales de maíz palomero evaluados permitió identificar a las poblaciones elite PB5 y PB6 como las más aptas para generar combinaciones con potencial para rendimiento de grano, pues sus progenies mostraron rendimientos altos, pero no los mejores, además expresaron valores superiores en cada característica agronómica evaluada, como ciclo vegetativo precoz, granos pesados y grandes, y una buena relación grano/mazorca. El uso de estas cruzas de poblaciones de maíz palomero resulta una alternativa para incrementar el rendimiento de grano, ya que más de mitad de las cruzas de las poblaciones superaron el rendimiento medio de los testigos.

Más de la mitad combinaciones, cruzas de maíces palomeros evaluados, cuyo origen de las poblaciones elite son resultados de varias cruzas de material genético de diferentes regiones, las cuales en su estado actual no cuentan con los atributos de reventado deseados en el mercado para la elaboración de palomitas.

Existen poblaciones y cruzas sobresalientes en rendimiento de grano y capacidad de expansión que permitirán iniciar programas de mejoramiento genético, tal es el caso de las combinaciones de las poblaciones PB3xPB5 y PB4xPB2 cuyo rendimiento y volumen de expansión superaron los promedios del experimento, por lo cual podría ser una alternativa para los productores de la región de los valles altos.

En los materiales evaluados de maíz palomero, los efectos de aptitud combinatoria general (efectos aditivos) fueron más importantes que los de aptitud combinatoria específica, para el rendimiento, floración masculina y peso volumétrico. En las cruzas se encontraron efectos maternos y recíprocos, por lo que las características evaluadas están determinadas por la herencia

nuclear y citoplasmática, lo que permite cruzar progenitores directa y recíprocamente para el desarrollo y uso de PB6 x PB3 y PB3 x PB6. La cruce directa con mayor aptitud combinatoria específica para rendimiento fue PB3 x PB6. La cruce recíproca con uno de los mayores efectos de ACE para rendimiento fue PB6 x PB3.

El empleo de progenitores de ACG contrastante (alta y baja) permitió que su progenie se expresara con rendimientos favorables. Las poblaciones de maíces palomeros con efectos altos de ACG se pueden usar para desarrollar variedades sintéticas o impulsar más ciclos de mejoramiento genético, mientras que las cruces con altos niveles de ACE se pueden usar para la hibridación.

ANEXOS

Cuadro Anexo 1. Genealogía de poblaciones de maíz palomero que se utilizaron para el diseño dialélico I de Griffing.

Poblaciones	
PB1	(242AExPOB42xPBxPB) x 244Fx244F) x LP) x Pal) x Pal Tam 2004R) #
PB2	(141 x MU2000@) x Pal Resurrección) x Palomero Tam 2004) #
PB3	(141 x MU2000@) x Palomero Resurrección) x Pal YW) #
PB4	(141 x MU2000) x Palomero Resurrección) X Palomero) #
PB5	(141 x MU2000) x PAL RES) x Pal Resurrección) #
PB6	(242AE x POB42 x PB x PB) x YW x 244AE) x 244 x 244) x LP x Pal) x Pal) #

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Aguilar V. K. E., 2021, Productividad de colectas de maíz palomero toluqueño (*Zea mays everta*) en Valles Altos de México. Tesis que para obtener el título de ingeniero agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ángeles A., H. H. 2000. Mejoramiento genético de maíz en México: El INIA, sus antecesores y un vistazo a su sucesor, el INIFAP. *Agricultura Técnica en México* 26: 31-48.
- Antuna G., O., F. Rincón S., E. Gutiérrez R., N. A. Ruiz T. y L. Bustamante G. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas de líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26(1): 11-17.
- Baker, R. J. 1978. Issues in diallel analysis. *Crop Science* 18: 533-536. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800040001x>
- Bautista-Ramírez, E., A. Santacruz-Varela, L. Córdova-Téllez, A. Muñoz-Orozco, H. López-Sánchez, G. Esquivel-Esquivel. 2020. Rendimiento y capacidad de expansión del grano de maíz en la raza Palomero Toluqueño. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*. 11(7): 1607-1618. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2130>.
- Cai, Q. S., L. L. Wang, W. H. Yao, Y. D. Zhang, L. Liu, L. J. Yu, and X. M. Fan. 2012. Diallel analysis of photosynthetic traits in maize. *Crop Science* 52:551-559. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.06.0333>
- De la Cruz L, J R Parra, J L R Díaz, J J S González, M M M Rivera, M C Bonaparte, S A H de la Peña, S M Mungía (2003) Aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 26 (1): 1-10.
- De la O- Olán, M., A. Santacruz-Varela, D.M. Sangerman-Jarquín, A. J. Gámez-Vázquez, J. L. Arellano-Vázquez, M. G. Valadez-Bustos, M. A. Ávila-Perches. 2018. Estandarización del método de reventado para la evaluación experimental del maíz palomero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(7): 1471-1482. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1675>
- Escorcía G. N., Molina, G. J., Castillo, G. F., y Mejía, C. J. (2010). Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruas simples de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 271-279.
- Escorcía-Gutiérrez, N., J. D Molina-Galán, F. Castillo-González, J. A. Mejía-Contreras. 2010. Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruas simples de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 271-279. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.3.271>
- Espinosa-Calderón A., J. Ortiz-Cereceres, A. Ramírez-Fonseca, Noel O Gómez-Montiel, Martínez-Garza (1998) Estabilidad y comportamiento de líneas per se y cruas de maíz en la producción de semillas. *Agricultura Técnica en México*, Vol. 24 (1): 27-36.
- Espinosa-Calderón A., M. Tadeo-Robledo, I. Arteaga-Escamilla, A. Turrent-Fernández, M. Sierra-Macías, N. Gómez-Montiel, A. Palafox-Caballero, R. Valdivia-Bernal, V. Trejo-Pastor y

- E. Canales-Islas (2012) Rendimiento de las generaciones F1 y F2 de híbridos trilineales de maíz en los valles altos de México. *Universidad y Ciencia* 28:57-64
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Cardenas-Marcelo, A. L., López-López, C., Canales-Islas, E. I., Sierra-Macías, M., Gómez-Montiel, N. O. 2018. Rendimiento y perspectivas de uso comercial de variedades de maíz palomero en Valles Altos de México. En: *Acta Fitogenética*, Vol 5 (1): 84.
- Esquivel Esquivel G, Castillo González F, Hernández Casillas JM, Santacruz Varela A, García de los Santos G, Acosta Gallegos JA, Ramírez Hernández A. Aptitud Combinatoria y Heterosis en Etapas Tempranas del desarrollo del Maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* (2009), 32: 311-318.
- Gaytán, B.R.; Mayek, P.N. (2010). Heterosis en híbridos de maíz producidos de cruzamientos entre progenitores de Valles Altos x Tropicales. *Investigación y Ciencia*, 18(48): 4-8.
- Gökmen, S. 2004. Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *J. Food Eng.* 65(3):357-362. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.01.034.+
- Griffing B. J. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. Biol. Sci.* 9: 463-493. DOI: <https://doi.org/10.1071/BI9560463>
- Guerrero-Guerrero, C., A. Espinoza-Banda, A. Palomo-Gil, E. Gutiérrez-del Río, H. Zermeño-González y M.P. González-Castillo. 2011. Aptitud combinatoria del rendimiento y sus componentes en dos grupos de líneas de maíz. *Agronomía. Mesoamericana* 22(2):257-267.
- Guillén-de la Cruz, P., E. de La Cruz-Lázaro, G. Castañón-Najera, R. Osorio-Osorio, N.P. Brito-Manzano, A. Lozano-del Río y U. López-Noverola. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 101-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902018005000204>
- Hallauer, A., Carena R.M., and Miranda, J.B. 2010. *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Springer-Verlag. New York Inc.664 p.
- Hoegemeyer, T. C., and A. R. Hallauer. 1976. Selection among and within full-sib families to develop single crosses of maize. *Crop Science* 16: 76-8. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600010019x>
- Hoseney, R. C.; Zeleznak, K. and Abdelrahman, A. 1983. Mechanism of popcorn popping. *J. Cereal Sci.* 1(1):43-52. Doi: 10.1016/S0733-5210(83)80007-1.
- Jugenheimer, R.H. (1981). *Maíz. Variedades mejoradas, métodos de cultivo y producción de semillas*. Ed. Limusa. 841 p.
- Karababa E. 2005. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*. 72: 100-107.
- Kato-Y, T. A.; 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 (UNAM)-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, DF. 115 p.
- Khehra, A. S., S.K. Bhalla. 1976. Cytoplasmic Effects on Quantitative Characters in Maize (*Zea mays* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 47(6): 271-274. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00281931>
- López L. C. 2021. Aptitud combinatoria general, específica y heterosis en variedades y cruzas de maíces amarillos de valles altos. Tesis presentada para obtener el grado en Doctora en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco.
- López-López, C., M. Tadeo-Robledo, J. J. García-Zavala, A. Espinosa-Calderón y J. A. Mejía-Contreras. 2021. Aptitud combinatoria general, específica y heterosis en variedades y cruzas de maíces amarillos de valles altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 22(4): 699-711. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2786>
- Lu, H. J., Bernardo, R. and Ohm, H. W. 2003. Mapping QTL for popping expansion volume in popcorn with simple sequence repeat markers. *Theor. Appl. Gen.* 106(3):423-427. DOI: 10.1007/s00122-002-1041-y.
- Ma, X. Q.; Tang, J. H.; Teng, W. T.; Yan, J. B.; Meng, Y. J. and Li, J. S. 2007. Epistatic interaction is an important genetic basis of grain yield and its components in maize. *Mol. Breed.* 20(1):41-51. DOI: 10.1007/s11032-006-9071-9.
- Mangelsdorf P. C., E. Smith C. Jr. 1949. A discovery of remains of primitive maize in New Mexico. *The Journal of Heredity*. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a105980>
- Márquez, S.F. 2007. ¿Para qué sirve la endogamia? *Revista Ciencia*. 72-78.
- Melani M. D. and M. J. Carena. 2005. Alternative maize heterotic patterns for the Northern corn belt. *Crop Science* 45: 2186-2194. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0289>
- Miranda J., O. 1977. H 367 P híbrido de maíz palomero de riego para El Bajío. *Campo Experimental Bajío*. Desplegable 68, CIAB, INIA, SARH.
- Núñez-Terrones, E., M. del C. Mendoza-Castillo, A. Delgado-Alvarado, F. Castillo-González, y F. J. Sánchez-Ramírez. 2019. Análisis genético de componentes nutricionales en cruzas simples de maíz de grano blanco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (2): 163-172.
- Piperno D. R. and Pearsall D. M. 1993. Phytoliths in the reproductive structures of maize and teosinte: implications for the study of maize evolution. *Journal of Archaeological Science*. 20: 337-362.
- Poehlman J. M. and D. A. Sleper. 1995. *Breeding Field Crops*. 4th ed. Iowa State University Press, Ames, Iowa, p. 473.
- Poehlman J. M. and D. A. Sleper. 1995. *Breeding Field Crops*. 4th ed. Iowa State University Press, Ames, Iowa, p. 473.

- Pordesimo, L. O., Anantheswaran, R. C., Fleischmann, A. M., Lin, Y. E., & Hanna, M. A. (1990). Physical properties as indicators of popping characteristics of microwave popcorn. *Journal of Food Science*, 55, 1352–1355. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03934.x>
- Romero, C. T.; González, D. L. y Reyes, R. G. 2006. Geografía e historia cultural del maíz palomero toluqueño (*Zea mays everta*). México. *Ciencia Ergo Sum*. 1(13):47-56.
- Sánchez-Hernández, C., C. Villanueva-Verduzco, J. Sahagún-Castellanos, J. Martínez-Solís, J.P. Legaria-Soriano, M.A. Sánchez-Hernández. 2011. Efectos de aptitud combinatoria en híbridos de calabacita tipo Grey Zucchini. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(2):89-103. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.02.009>
- Santacruz-Varela, A. 2001. Genetic diversity of North American popcorn and its relationship with Mexican and South American popcorns. Ph. D. Dissertation. Iowa State University. Ames, Iowa, USA. 326 p.
- SAS Institute Inc. (2002). *Statistical Analysis System User's Guide*. SAS Institute. Cary. USA. 956 p.
- Shull, G. H., 1948, What is "Heterosis"? *Genetics*, 33(5): 439-446. DOI: <https://doi.org/10.1093/genetics/33.5.439>
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera) 2019. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera) 2020. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Song, A., Eckhoff, S. R., Paulsen, M., & Litchfield, J. B. (1991). Effects of kernel size and genotype on popcorn popping volume and number of unpopped kernels. *Cereal Chemistry*, 68, 464–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.034>
- Soylu, S. and Tekkanat, A. 2007. Interactions amongst kernel properties and expansion volume in various popcorn genotypes. *Journal of Food Engineering*. 80(1):336-341. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.06.00.
- Tian, F. 2011. Genome-wide association study of leaf architecture in the maize nested association mapping population. *Nat. Genet.* 43,159–162.
- Valadez-Gutiérrez, J., N. O. Gómez-Montiel, R. E. Preciado-Ortiz, C. A. Reyes-Méndez, A. Peña-Ramos. 2014. V460P, variedad de maíz palomero para la región de Las Huastecas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp.* 7:1303-1308.
- Valadez-Gutiérrez, J., N. O. Gómez-Montiel, R. E. Preciado-Ortiz, C. A. Reyes-Méndez, A. Peña-Ramos. 2014. V460P, variedad de maíz palomero para la región de Las Huastecas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp.* 7:1303-1308. DOI: 10.29312/remexca.v0i7.1112

- Villanueva, F. R., 2008, El maíz reventador como alternativa industrial, *Ingeniería Industrial*, núm. 26, pp. 113-124, Lima, Perú.
- Wellhausen, E. J.; Roberts, L. M.; Hernández, X. E. y Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz en México. Su origen características y distribución. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F. Folleto técnico núm. 5. 237 p.
- Zhang Y. and Kang M. S. (2003). DIALLEL–SAS: a program for Griffing's diallel methods. 1-19 p in M.S. Kang, eds. *Handbook of Formulas and Software for Plants Geneticists and Breeders*. Food Products Press, New York, USA.
- Ziegler, K. E. 2001. Popcorn. In: Hallauer, A. R. (Ed.). *Specialty corns*. CRC Press. Boca Raton, FL. 199-234 pp.