RENDIMIENTO, COMPONENTES DE RENDIMIENTO Y HETEROSIS DE GERMOPLASMA DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS

YIELD, YIELD COMPONENTS AND HETEROSIS OF MAIZE GERMPLASM ADAPTED TO HIGHLANDS

Ángela M. Velasco-García[1], J. Jesús García-Zavala[1]*, Jaime Sahagún-Castellanos[2], Ricardo Lobato-Ortiz[1], Carlos Sánchez-Abarca[2] e Iván M. Marín-Montes[1]

[1]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [2]Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

**Autor de correspondencia* (zavala@colpos.mx).

RESUMEN

Las variedades de maíz (*Zea mays* L.) introducidas de otras latitudes son una fuente de alelos favorables de utilidad en el mejoramiento genético, pero antes de ser empleados deben adaptarse a las condiciones climáticas de los ambientes de interés. El objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento y sus componentes en poblaciones representativas de razas de maíz originarias del trópico y subtrópico adaptadas por selección masal recurrente a los Valles Altos de México, así como la heterosis de sus cruzas interraciales para identificar genotipos útiles al mejoramiento genético del maíz para esos ambientes. Se evaluaron nueve poblaciones de maíz adaptado, ocho cruzas de dos poblaciones, una cruza de tres poblaciones, generaciones avanzadas de las cruzas y cuatro testigos comerciales. Los genotipos se evaluaron en tres ambientes bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se registró el rendimiento y sus componentes. Se realizó análisis de varianza, comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$), análisis de correlación y se estimó la heterosis con respecto al progenitor medio. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre genotipos para todos los caracteres; los materiales adaptados rindieron de 3.89 a 11.71 t ha^{-1} y los testigos de 8.06 a 11.56 t ha^{-1}. El rendimiento correlacionó con el índice de prolificidad (r = 0.67), longitud (r = 0.64), diámetro de mazorca (r = 0.65) y número de granos por hilera (r = 0.64). La heterosis promedio para rendimiento y sus componentes fluctuó de -5.30 a 6.53 %, con 5.68 % para rendimiento, donde la cruza F_1 P9 × P8 presentó la mayor heterosis (26.19 %). Las poblaciones adaptadas y sus cruzas presentaron rendimientos similares a los testigos comerciales; por esto, pueden aprovecharse *per se* o como participantes para mejoramiento genético del maíz local de Valles Altos.

Palabras clave: *Zea mays*, germoplasma adaptado, rendimiento, componentes de rendimiento, heterosis.

SUMMARY

Varieties of maize (*Zea mays* L.) introduced from other latitudes are a source of favorable alleles useful in plant breeding, but before being used they must be adapted to the climatic conditions of the target environments. The objective of this study was to evaluate the yield and its components in representative populations of tropical and subtropical maize races adapted by recurrent mass selection to the Mexican highlands, as well as the heterosis of their interracial crosses to identify genotypes useful for maize breeding in those environments. Nine adapted maize populations, eight crosses of two populations, one cross of three populations, advanced generations of the crosses and four commercial checks were evaluated. Genotypes were tested in three environments under a randomized complete blocks design with three replications. Grain yield and its components were recorded. Analysis of variance, comparison of means (Tukey, $P \leq 0.05$), correlation analysis were performed and the heterosis was estimated in relation to the mid- parent. There were significant differences ($P \leq 0.01$) between genotypes for all the traits; the adapted materials yielded from 3.89 to 11.71 t ha^{-1} and the checks from 8.06 to 11.56 t ha^{-1}. The yield correlated with the prolificacy index (r = 0.67), ear length (r = 0.64), ear diameter (r = 0.65) and number of grains per row (r = 0.64). The average heterosis for yield and its components ranged from -5.30 to 6.53 %, with 5.68 % for yield, where the F_1 P9 × P8 cross showed the highest heterosis (26.19 %). Adapted populations and their crosses showed a performance similar to that of commercial checks; thus, they can be used by themselves or as participants for breeding local maize of highlands.

Index words: *Zea mays*, adapted germplasm, yield, yield components, heterosis.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético es el arte y la ciencia que permite el desarrollo de cultivares superiores (Hallauer *et al*., 2010), el cual permite generar genotipos que se adapten a diferentes ambientes y que satisfagan las necesidades de la sociedad y de los productores.

El maíz (*Zea mays* L.) posee una variabilidad genética enorme, aun en razas previamente consideradas uniformes genéticamente, como Zapalote Chico de la región istmeña de Oaxaca, México (Cabrera-Toledo *et al*., 2019); sin embargo, el proceso de mejoramiento provoca la reducción severa de la base genética (Fernie *et al*., 2006); por esto, en la faja maicera de Estados Unidos de América la mayoría de los programas de mejoramiento se enfocaron al uso de líneas o variedades que se originaron a partir del entrecruzamiento de materiales élite ya existente (Goodman, 1999); en el caso de México, se generaron variedades mejoradas a partir de germoplasma de origen templado, tropical y subtropical del interés de los mejoradores en las áreas productoras de maíz, lo cual provocó una pérdida de variabilidad en estas regiones (De La Cruz *et al*., 2003). Es muy importante el conocimiento

Recibido: 7 de mayo de 2018
Aceptado: 1 de agosto de 2019

sobre la diversidad genética para hacer uso efectivo y eficiente del germoplasma con uso potencial para los programas de mejoramiento (Adebayo *et al.*, 2015).

Las poblaciones nativas de maíz en México son una fuente valiosa de variantes alélicas, porque en el proceso de selección continua y dinámica por los agricultores las variedades de cada raza han adquirido características de adaptación para regiones agrícolas particulares (Prasanna, 2012). En este contexto, una alternativa para ampliar la variabilidad genética del maíz dentro de cada región agrícola es la introducción y uso de germoplasma de otras regiones; con ello, además de aportar genes nuevos y variedades diferentes a las locales, es factible incrementar la heterosis de rendimiento entre cruzas de germoplasma diferente (Mickelson *et al.*, 2001), su tolerancia a plagas y enfermedades y a otros factores adversos (Hallauer y Carena, 2009).

No obstante, emplear germoplasma introducido de maíz en una región no es sencillo porque requiere de un proceso de adaptación a las condiciones ambientales donde será utilizado (Gouesnard *et al.*, 1996). En este sentido, diferentes autores han demostrado que la selección masal recurrente es una metodología eficiente para adaptar un maíz de origen tropical a Valles Altos de México; de esta manera, se esperaría que en ciclos avanzados de selección se pueda explotar las varianzas genéticas aditiva y de dominancia, y que sus poblaciones resultantes puedan ser empleadas *per se* o en la formación de variedades e híbridos con mayor heterosis en rendimiento y de sus componentes (Gómez-Espejo *et al.*, 2015; Pérez-Colmenarez *et al.*, 2000).

Diferentes trabajos confirman las bondades de usar germoplasma adaptado a una región agrícola, particularmente, de materiales originarios del trópico adaptado a una región templada. Gómez-Espejo *et al.* (2015) observaron valores de heterosis altos para rendimiento entre maíz Chalqueño y Tepecintle (16 a 58.5 %) y entre la cruza Tepecintle original × Tepecintle adaptado (126 %); asimismo, Carrera-Valtierra y Cervantes-Santana (2002) observaron mayor heterosis al cruzar líneas tropicales de maíz con líneas locales de Valles Altos (90.36 a 164.86 %) comparado con cruzas entre líneas tropicales previamente adaptadas a Valles Altos (17.24 a 40.19 %). De manera similar, Palemón *et al.* (2012) obtuvieron heterosis de 10.6 % en promedio en cruzas intervarietales de germoplasma tropical adaptado a Valles Altos con material subtropical en la región semi cálida de Guerrero.

En México existen reportes de programas de mejoramiento genético de maíz que han adaptado e incorporado germoplasma exótico para ampliar la base genética de sus materiales e incorporarles genes favorables (Gómez-Espejo *et al.*, 2015); asimismo, se cuenta con 10 razas tropicales y subtropicales de maíz que fueron sometidas a selección masal visual para adaptación en Montecillo, Estado de México, donde prevalecen condiciones de clima templado (Pérez *et al.*, 2002). En este contexto, los objetivos del presente trabajo fueron a) evaluar el rendimiento y sus componentes en poblaciones de maíz tropical y subtropical adaptado por selección a Valles Altos y en sus cruzas interraciales y, b) evaluar la heterosis de cruzas interraciales de maíz tropical y subtropical adaptado por selección a Valles Altos para identificar y seleccionar genotipos como fuente potencial para el mejoramiento genético del maíz en dicha región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

Se evaluaron siete poblaciones de maíz adaptado a Valles Altos mediante 20 ciclos de selección masal visual (Pérez *et al.*, 2002): Pepitilla (P1), Tabloncillo (P2), Comiteco (P3), Celaya (P4), Vandeño (P5), Tepecintle (P6) y Nal-Tel (P8); dos poblaciones con 19 ciclos de selección masal: Tuxpeño (P7) y Zapalote Chico (P9); ocho cruzas formadas entre dos poblaciones adaptadas: F1(P1×P3), F1(P2×P1), F1(P4×P1), F1(P4×P3), F1(P7×P5), F1(P6×P5), F1(P7×P6) y F1(P9×P8); dos cruzas entre dos cruzas poblacionales: F1(P2P1×P4P3) y F1(P5P7×P6P7); una entre tres cruzas poblacionales: F1(P5P7×P6P7×P6P5); tres generaciones F2: F2(P9×P8), F2(P2P1×P4P3) y F2(P5P7×P6P7); dos generaciones F3: F3(P9×P8) y F3(P2P1×P4P3); una generación F4: F4(P9×P8) y cuatro testigos locales de maíz Chalqueño: híbrido Promesa (H-PROMESA), híbrido San Josecito (H-SJOSECITO), Criollo de San Juan Tezontla (CSJTEZONTLA) y Compuesto Xolache (COM.XOLACHE).

Sitio experimental

La evaluación agronómica se realizó en tres ambientes diferentes, dos ambientes en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, en Montecillo, Texcoco, Estado de México, en las coordenadas 19° 27' 38 N., 98° 54' 11'' O a una altitud de 2250 m, donde se establecieron dos experimentos en lotes contrastantes en cuanto a características edáficas y de humedad, además de fecha de siembra diferente. El tercer lote de evaluación se ubicó en el Campo Agrícola Experimental San Martín de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, en las coordenadas 19° 29' 05'' N, 98° 53' 11'' O, a una altitud de 2250 msnm.

Manejo agronómico

La preparación del terreno en los tres ambientes consistió

en un barbecho, un paso de rastra, y posteriormente se realizó el surcado. La siembra se realizó el 17 y 23 de mayo de 2017 para los ambientes de Montecillo y el 25 de mayo para el ambiente de Chapingo. En los tres ambientes se sembró a una densidad de población de 54,166 plantas ha^{-1}. La dosis de fertilización fue 160N-80P-00K, se aplicó todo el P y la mitad del N a la siembra y el resto del N se aplicó al aporque 35 días después de la siembra (dds). Para el control de maleza se aplicó Gesaprim Calibre 90 GDA® (1 kg ha^{-1}) combinado con Primagran® Gold (3 L ha^{-1}) a los 7 dds; posteriormente, a los 60 dds una mezcla de Gesaprim Calibre 90 GDA® más Gramoxone®.

Diseño experimental

Los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental estuvo conformada por una parcela de dos surcos de 6 m de largo separados a 0.80 m y matas de dos plantas cada 50 cm, para obtener un total de 52 plantas por parcela. La siembra se hizo manual con pala, depositándose dos semillas por sitio y no se hizo aclareo de plantas.

Caracteres evaluados

Los caracteres evaluados fueron rendimiento de mazorca a humedad constante (REN, t ha^{-1}), índice de prolificidad (IP, número de mazorcas/planta), longitud de mazorca (LM, cm), diámetro de mazorca (DM, cm), número de hileras por mazorca (NHM), número de granos por hilera (NGH) y peso de 200 granos (PDG, g). Los componentes del rendimiento LM, DM, NHM, NGH y PDG se midieron en una muestra de 10 mazorcas representativas en cada parcela. El IP se obtuvo al dividir el número de mazorcas cosechadas en la parcela entre el número total de plantas de la parcela. Para estimar el REN se obtuvo el rendimiento de mazorca por planta (RMP) al dividir el peso seco a humedad constante del total de mazorcas de la parcela entre el número de plantas cosechadas con competencia completa en la parcela; este valor se multiplicó por la densidad de plantas por hectárea (54,166) para obtener el REN (t ha^{-1}).

Análisis estadístico

Para todos los caracteres se realizó análisis de varianza combinado de los tres ambientes, comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) y un análisis de correlación fenotípica entre los caracteres. Estos análisis se hicieron mediante el paquete estadístico SAS® 9.0 (SAS Institute, 2002). La heterosis, con respecto al progenitor medio en los tres ambientes de forma combinada, se calculó con la fórmula $H = [(F1 - PM) / PM] \times 100$, donde H: heterosis porcentual (%); F1: media fenotípica de la población F1; PM= (Pi + Pj)/2, media fenotípica del progenitor medio; Pi y Pj: media fenotípica del padre i y del padre j (Falconer y Mackay, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

El análisis de varianza (Cuadro 1) detectó diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) entre los genotipos (GEN) para todos los caracteres, lo que puede atribuirse en parte a que los materiales genéticos de las cruzas son de origen geográfico diferente y, no obstante su adaptación por selección, presentan variación genética intrínseca entre ellos porque los genotipos adaptados pueden tener expresión fenotípica diferente bajo condiciones ambientales de Valles Altos (Gómez-Espejo *et al.*, 2015). Por otro lado, el haber incluido genotipos productivos localmente adaptados como testigos también contribuyó a la significancia de esta fuente de variación.

El análisis de varianza también detectó significancia ($P \leq$

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia del análisis de varianza combinado del rendimiento y sus componentes de rendimiento en poblaciones y cruzas interraciales de maíz tropical adaptado a Valles Altos, ciclo primavera-verano 2017.

FV	GL	REN	IP	LM	DM	PDG	NHM	NGH
Amb	2	181.37**	4.54**	4.42**	0.06	282.99**	0.03	9.47*
Rep(Amb)	6	9.80**	0.13*	0.80*	0.11**	6.77	0.96	5.67
Gen	29	49.31**	0.21**	32.28**	1.13**	864.74**	16.47**	150.81**
Gen × Amb	58	3.05*	0.06	0.91**	0.03	48.01**	0.74*	4.58**
Error	174	1.9	0.05	0.3	0.03	6.69	0.48	2.83
CV (%)		16.46	15.96	3.84	3.55	4.12	4.76	5.43

**: $P \leq 0.01$, *: $P \leq 0.05$, FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, REN: rendimiento de mazorca, IP: índice de prolificidad, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, PDG: peso de 200 granos, NHM: número de hilera por mazorca, NGH: número de granos por hilera, CV: coeficiente de variación.

0.0001) entre ambientes para IP, REN, LM, PDG y NGH, lo que indica que al menos un ambiente fue diferente al resto para estas características y esto se atribuye a diferencias ambientales con efectos contrastantes entre sitios; por ejemplo, la variación en la precipitación, además de las características edáficas diferentes donde se establecieron los genotipos, como textura del suelo, salinidad, y pH (López *et al.*, 2017), lo cual provocó diferente retención de humedad y por consiguiente variabilidad en los procesos fisiológicos de las plantas.

La interacción genotipo × ambiente (Cuadro 1) resultó significativa (P ≤ 0.0001) para todos los caracteres, excepto para IP (P ≤ 0.0908) y DM (P ≤ 0.1515). Lo anterior indicó que las diferencias entre los genotipos no fueron consistentes a través de ambientes, excepto para IP y DM; es decir, los genotipos presentaron una respuesta diferente en su comportamiento agronómico a través de los ambientes de prueba debido a la existencia de variabilidad genotípica en las poblaciones evaluadas, que permitió una respuesta diferencial para el efecto de cada ambiente (García *et al.*, 2002). Los coeficientes de variación mostraron un intervalo de 3.54 a 16.45 % (Cuadro 1), esto sugiere que el experimento se realizó bajo un buen manejo agronómico y experimental, lo cual minimizó el error experimental y validó los resultados obtenidos.

Comparación de medias

La comparación de medias (Cuadro 2) mostró que la población Tuxpeño (P7) (11.71 t ha^{-1}) y el testigo H-PROMESA (11.56 t ha^{-1}) fueron estadísticamente superiores en REN. Este resultado es interesante porque indica que la población de Tuxpeño adaptada por selección masal a condiciones de Valles Altos tiene un rendimiento competitivo con el testigo superior; de acuerdo con Prasanna (2012), la población tropical Tuxpeño seleccionada presenta mayor número de alelos adaptativos, lo que la hace tener un mejor rendimiento *per se* y también podría generar híbridos como el F1(P7×P6) (10.74 t ha^{-1}), que fue estadísticamente similar a los híbridos comerciales empleados como testigos. Zapalote Chico (P9) (3.89 t ha^{-1}) y Nal-Tel (P8) (4.2 t ha^{-1}) tuvieron rendimientos menores comparado con los demás genotipos, pero presentaron un ciclo vegetativo corto (68 y 73 días respectivamente), lo que representa una ventaja para Valles Altos, donde el periodo libre de heladas es corto, de esta manera permitirían ampliar el ciclo de siembras, inclusive se podría llegar a tener dos por año.

Con respecto al índice de prolificidad, la población P7 fue significativamente (P ≤ 0.0001) mayor (1.66 mazorcas/planta) y le siguieron las poblaciones Pepitilla (P1) y Tepecintle (P6) con 1.63 y 1.62 mazorcas/planta, respectivamente. Martínez *et al.* (1992) indicaron que el índice de prolificidad responde de manera positiva al proceso de selección; de manera similar, Biasutti *et al.* (2004) y Montenegro *et al.* (2002) encontraron que a mayor prolificidad el rendimiento potencial de grano incrementa, esto permitió inferir que las poblaciones P7, P1 y P6 tuvieron respuesta positiva a la selección de esta característica.

La LM fluctuó de 10.55 a 17.47 cm. El testigo H-SJOSECITO fue significativamente (P ≤ 0.0001) mejor con respecto a las demás poblaciones estudiadas (17.47 cm), seguido por la población Comiteco (P3) (16.39 cm). Hernández y Esquivel (2004) reportaron valores similares para cruzas de maíz criollo de Valles Altos; en cambio, Carrera y Cervantes (2006) observaron que cruzas dobles de maíz tropical y subtropical presentan mayor longitud de mazorca que los híbridos para Valles Altos. La población P3 podría ser una opción adecuada para mejorar esta característica porque presentó 16.4 cm para LM, el cual es superior estadísticamente comparado con el resto de las poblaciones adaptadas.

Para PDG el genotipo local criollo CSJTEZONTLA de la raza Chalqueño fue estadísticamente (P ≤ 0.0001) superior (90.3 g) con respecto al resto de las poblaciones, lo cual concuerda con lo reportado por Antonio *et al.* (2004), quienes encontraron que variedades de maíz criollo de la raza Chalqueño fueron superiores al híbrido comercial H-139 porque presentó un PDG de 102.6 g. En contraste, en el presente estudio las poblaciones tropicales y subtropicales adaptadas y sus cruzas fueron las de menor peso de grano en comparación con los testigos; esto se podría explicar por lo reportado por Cázares-Sánchez *et al.* (2015), quienes indicaron que para maíz tropical el porcentaje de almidón en el grano fluctuó de 57.54 a 69.92 %, lo cual genera menor peso en comparación con maíces originarios de regiones templadas como el Chalqueño. En relación con el NHM, el testigo COM.XOLACHE fue estadísticamente (P ≤ 0.0001) superior a los demás genotipos con 17.24 hileras (P ≤ 0.05), lo que concuerda con lo reportado por Wellhausen *et al.* (1952), quienes observaron que la raza Chalqueño presenta mayor NHM comparado con los maíces tropicales y subtropicales.

Por otro lado, la F1 de la cruza simple Pepitilla × Comiteco (P1 × P3) fue significativamente mejor para NGH con 35.86, el cual es superior al valor promedio de diferentes híbridos experimentales de maíz para Valles Altos observado por Espinosa-Calderón *et al.* (2012). En cuanto al DM, H-PROMESA presentó 5.24 cm y fue superior estadísticamente (P ≤ 0.0001) a las demás poblaciones; en contraste, el material Nal-Tel (P8) fue el de menor DM (3.84 cm). Estos resultados coincidieron con los obtenidos por

Cuadro 2. Comparación de medias del rendimiento y sus componentes a través de ambientes para las 11 mejores y cinco peores poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales adaptadas a Valles Altos, ciclo primavera-verano 2017.

GEN	REN (t ha^{-1})	IP	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM	NGH
F1(P1×P3)	10.05 a-e	1.41 a-d	15.82 b-d	4.72 d-f	60.49 f-i	16.34 a-c	35.86 a
F1(P7×P5)	8.89 b-f	1.38 a-d	15.45 b-e	4.6 d-g	56.5 i-j	15.01 d-f	34.42 a-c
F1(P7×P6)	10.74 a-d	1.54 a-c	15.79 b-d	4.7 d-f	60.97 f-i	14.5 e-g	34.76 a-b
F1(P9×P8)	5.1 g-h	1.18 c-e	11.87 j	4.16 i-j	62.54 e-g	12.52 j-k	25.24 g-h
F2(P9×P8)	4.37 g-h	1.25 b-e	11.05 j-k	4.01 j-k	53.97 j-k	13 h-j	23.38 h
F3(P9×P8)	4.49 g-h	1.27 a-e	10.56 k	3.94 j-k	50.16 k-l	13.56 g-i	23.37 h
P1	9.34 a-e	1.63 a-b	14.4 f-h	4.54 e-g	64.87 c-f	13.9 f-i	31.58 c-e
P3	9.9 a-e	1.46 a-d	16.39 b	4.6 d-g	58.56 g-j	15.56 c-e	34.36 a-c
P6	8.89 b-f	1.62 ab	13.53 h-i	4.58 d-g	62.19 e-h	14.42 e-g	27.1 f-g
P7	11.71 a	1.66 a	14.17 g-h	4.64 d-g	51.76 k-l	15.42 c-e	33.69 a-c
P8	4.2 h	1.34 a-e	11.63 j	3.84 k	44.33 m	14.38 e-g	24.86 g-h
P9	3.89 h	0.98 e	10.55 k	4.06 j-k	60.28 f-i	11.44 k	23.39 h
CSJTEZONTLA	8.06 e-f	1.08 d-e	15 d-g	5.09 a-b	90.3 a	13.93 f-h	32.42 b-d
COM. XOLACHE	8.29 d-f	1.27 a-e	14.66 e-g	5.04 a-c	66.8 c-e	17.24 a	30.41 d-e
H-PROMESA	11.56 a	1.39 a-d	14.66 e-g	5.24 a	75.4 b	16.82 a-b	30.4 d-e
H-SJOSECITO	11.23 a-b	1.28 a-e	17.47 a	5.11 a-b	80.01 b	15.54 c-e	34.5 a-c
$DSH_{(0.05)}$	2.48	0.39	0.98	0.28	4.64	1.24	3.02

Medias con letras iguales dentro de la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05), GEN: genotipo, IP. índice de prolificidad, REN: rendimiento de mazorca, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, PDG: peso de 200 granos, NHM: número de hilera por mazorca, NGH: número de granos por hilera.

Martínez-Lázaro *et al.* (2006), quienes observaron que el híbrido Promesa presentó 0.5 cm más que los híbridos de maíz de cruza simple de Valles Altos para DM.

Los resultados anteriores indican que la selección masal aplicada por varios ciclos de selección a poblaciones de maíz tropicales introducidas en Valles Altos propició una adaptación adecuada de dichos materiales a dicha región, medida con base en el rendimiento y sus componentes de las poblaciones evaluadas (Gómez-Espejo *et al.*, 2015). En la presente investigación los resultados comprueban que la generación de mayor diversidad fue de gran importancia porque se podría ampliar la base genética de las variedades locales para mejorar el rendimiento de maíz de Valles Altos (Badu-Apraku *et al.*, 2015; Edmeades *et al.*, 2017).

Heterosis

La heterosis promedio para todos los caracteres evaluados con respecto al progenitor medio, en los tres ambientes, fluctuó de -5.30 a 6.53 % (Cuadro 3) y resultó positiva para rendimiento (5.68 %) con valores individuales de 4.3 a 26.19 %, ésto significó un aumento promedio de 0.48 t ha^{-1} en el rendimiento de las cruzas, como fue el caso de la F1(P9×P8) que presentó la mayor heterosis (26.19 %) y REN de 5.1 t ha^{-1}, superior a la media de Valles Altos de 2.79 t ha^{-1} (SIAP, 2019). Estos valores se asemejan a los reportados por Escorcia-Gutiérrez *et al.* (2010) y Palemón *et al.* (2012). La heterosis alta de la cruza F1(P9×P8) se explica por los bajos rendimientos que presentaron los progenitores, como lo sugirieron De la Cruz-Lázaro *et al.* (2010).

Para el índice de prolificidad (IP), sólo las cruzas F1(P6×P5) y F1(P9×P8) presentaron heterosis positiva individual (3.0 % y 2.0 %); en cambio, la heterosis promedio del carácter fue negativa (-5.3 %), lo que indica que el IP no exhibe heterosis, aunque en la mayoría de las cruzas simples esta aparente pérdida de prolificidad de mazorca por planta se compensó con heterosis positivas para el rendimiento de mazorca y sus componentes.

El carácter LM presentó una heterosis promedio de 4.73 %, con una variación de -6.03 % a 13.99 %; la F1(P5P7×P6P7) presentó heterosis negativa para este carácter (-6.03 %); en cambio, las cruzas F1(P7×P5) (13.05 %) y F1(P7×P6)

Cuadro 3. Heterosis (%) estimada en 11 cruzas de maíz de origen tropical y subtropical adaptado a Valles Altos en tres ambientes de evaluación, ciclo primavera-verano 2017.

Genotipo	REN	IP	LM	DM	PDG	NHM	NGH
F1(P2P1×P4P3)	-10.52	-2.64	0.74	-4.66	1.13	-6.84	-2.14
F1(P5P7×P6P7)	-11.03	-6.57	-6.03	0.98	7.55	1.36	-6.71
F1(P5P7×P6P7×P6P5)	-7.06	-10.15	2.09	0.34	-3.27	2.25	1.83
F1(P1×P3)	4.49	-8.93	2.74	3.26	-1.98	10.98	8.76
F1(P2×P1)	21.99	-2.7	5.17	6.45	-6.13	20.3	14.22
F1(P4×P1)	12.08	-7.86	5.23	0.72	5.11	3.04	10.31
F1(P4×P3)	10.16	-6.49	1.89	5.57	7.76	4.75	5.73
F1(P6×P5)	15.73	3.03	6.12	1.43	1.75	0.69	12.79
F1(P7×P5)	-3.79	-11.63	13.05	4.01	9.59	0.52	8
F1(P7×P6)	4.3	-6.32	13.99	1.93	7.01	-2.83	14.35
F1(P9×P8)	26.19	1.96	7.07	5.35	19.58	-3.01	4.65
Promedio	5.68	-5.3	4.73	2.31	4.37	2.84	6.53

IP. índice de prolificidad, REN: rendimiento de mazorca, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, PDG: peso de 200 granos, NHM: número de hilera por mazorca, NGH: número de granos por hilera.

(13.99 %) fueron las de mayor heterosis. Este resultado pudo deberse a que en la cruza participa P7 como progenitor en común en ambas cruzas poblacionales, lo que generó *loci* comunes para longitud de mazorca, y por lo tanto, una menor divergencia genética y expresión del carácter (De la Cruz *et al*., 2003).

Para DM se obtuvo una heterosis promedio de 2.31 %. La cruza que presentó mayor heterosis fue F1 (P9×P8) con 5.35 %. Estos resultados fueron similares los reportados por Amiruzzaman *et al.* (2010), quienes observaron heterosis de -12.16 a 8.78 % para DM en cruzas de líneas de maíces de origen tropical y subtropical.

El NGH y peso de grano son componentes de rendimiento importantes, por lo que se busca que la heterosis para estos caracteres sea positiva. El carácter NGH presentó una fluctuación de -6.71 a 14.35 %, donde la cruza F1(P7×P6) presentó la mayor heterosis (14.35 %), ésto significó que la combinación de Tuxpeño con Tepecintle mostró diversidad para esta característica. Así, De la Cruz *et al.* (2003) obtuvieron heterosis de 1 a 24 % para NGH en cruzas de maíz de poblaciones exóticas y adaptadas × exóticas; por lo anterior, se puede inferir que las poblaciones de este trabajo adaptadas a Valles Altos presentaron divergencia genética para NGH, lo que favoreció al rendimiento.

La heterosis de PDG fluctuó entre -6.13 y 19.58 %. La cruza con mayor heterosis fue F1(P9×P8) (19.58 %), ésto indicó que, aunque los progenitores son de semilla pequeña y de rendimiento menor, poseen características que impactan positivamente el rendimiento de grano cuando se cruzan y podrían ser empleadas para el mejoramiento genético. Amiruzzaman *et al.* (2010) observaron resultados similares al evaluar cruzas entre líneas de maíz divergente.

El carácter NHM tuvo una heterosis de -6.84 a 20.30 %, donde la cruza F1 (P2×P1) presentó la mayor heterosis. Esto contrastó con lo reportado por Malik *et al.* (2004), quienes identificaron heterosis de hasta 49.6 % con respecto al progenitor medio en líneas de origen templado, subtropical y tropical.

Los resultados obtenidos demostraron que las poblaciones adaptadas tienen gran potencial para ser empleadas *per se,* o bien como progenitores en cruzas simples; por ejemplo, las cruzas F1(P2×P1), F1(P6×P5), F1(P7×P6) y F1(P9×P8) mostraron el mayor incremento para rendimiento y sus componentes; ésto también permitiría ampliar la variabilidad morfológica de poblaciones de Valles Altos.

Correlación

El análisis de correlación fenotípica mostró correlación positiva entre la mayoría de los caracteres evaluados, excepto en el carácter IP. En el caso del REN, los componentes que correlacionaron de manera significativa ($P \leq 0.0001$) y positiva fueron IP ($r = 0.67$), LM ($r = 0.64$), DM ($r = 0.65$) y NGH ($r = 0.64$), lo cual indicó que los genotipos con mayor índice de prolificidad, mayor longitud y diámetro de mazorca, y más NGH presentaron rendimiento superior tales como P7, H-PROMESA y H-SJOSECITO. Al respecto, diferentes autores observaron correlación positiva entre

REN, NGH, DM y LM (Rafiq *et al*., 2010; Rani *et al*., 2017), por lo que estos componentes son características que deben tomarse en cuenta en el mejoramiento del maíz para Valles Altos.

CONCLUSIONES

Las poblaciones de maíz tropical y subtropical adaptadas a Valles Altos presentaron características sobresalientes para rendimiento y sus componentes en las condiciones agronómicas de Valles Altos, por lo que podrían ser empleadas en el mejoramiento genético de maíz, especialmente aquella de la raza Tuxpeño. Debido a su ciclo vegetativo precoz, la cruza de las poblaciones adaptadas de Zapalote Chico y Nal-Tel serían una alternativa de producción para regiones que presentan un ciclo agrícola reducido o para aquellas sin restricciones de humedad, porque se podría obtener más de un ciclo de siembra por año. El rendimiento correlacionó de manera positiva con índice de prolificidad, longitud de mazorca, diámetro de mazorca y número de granos por hilera; por ésto, se debe considerar tales componentes en la selección para rendimiento del maíz. Las cruzas interraciales de maíz presentaron heterosis positiva en la mayoría de caracteres evaluados, sus progenitores podrían ser una opción viable para emplearse en el mejoramiento genético de componentes de rendimiento de variedades locales de Valles Altos.

BIBLIOGRAFÍA

Adebayo M. A., A. Menkir, M. Gedil, E. Blay, V. Gracen, E. Danquah and L. Funmilayo (2015) Diversity assessment of drought tolerant exotic and adapted maize (*Zea mays* L.) inbred lines with microsatellite markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 18:147-154, https://doi.org/10.1007/s12892-014-0076-3

Amiruzzaman M., M. A. Islam, L. Hassan and M. M. Rohman (2010) Combining ability and heterosis for yield and component characters in maize. *Academic Journal of Plant Sciences* 3:79-84.

Antonio M. M., J. L. Arellano V., G. García S., S. Miranda C., J. A. Mejía C. y F. V. González C. (2004) Variedades criollas de maíz azul raza Chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:9-15.

Badu-Apraku B., M. A. B. Fakorede, M. Gedil, A. O. Talabi, B. Annor, M. Oyekunle, R. O. Akinwale, T. Y. Fasanmade, I. C. Akaogu and M. Aderounmu (2015) Heterotic responses among crosses of IITA and CIMMYT early white maize inbred lines under multiple stress enviroments. *Euphytica* 206:245-262, https://doi.org/10.1007/s10681-015-1506-0

Biasutti C. A., D. A. Peiretti, M. C. Nazar y G. A. Alemanno (2004) Respuesta a la selección masal por prolificidad en maíz en diferentes ambientes. *AgriScientia* 21:45-50**.**

Cabrera-Toledo J. M., A. Carballo-Carballo, J. A. Mejía-Contreras, G. García-De los Santos y H. Vaquera-Huerta (2019) Caracterización de poblaciones sobresalientes de maíz de la raza Zapalote Chico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:269-279.

Carrera-Valtierra J. A. y T. Cervantes-Santana (2002) Comportamiento *per se* y en cruzas de poblaciones tropicales de maíz seleccionadas en valles altos. *Agrociencia* 36:693-701.

Carrera V. J. A. y T. Cervantes S. (2006) Respuesta a densidad de población de cruzas de maíz tropical y subtropical adaptadas a valles altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:331-338.

Cázares-Sánchez E., J. L. Chávez-Servia, Y. Salinas-Moreno, F. Castillo-González y P. Ramírez-Vallejo (2015) Variación en la composición del grano entre poblaciones de maíz (*Zea mays* L.) nativas de Yucatán, México. *Agrociencia* 49:15-30.

De la Cruz-Lázaro E., G. Castañón-Nájera, N. P. Brito-Manzano, A. Gómez-Vázquez, V. Robledo-Torres y A. J. Lozano R. (2010) Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Phyton* 79:11-17.

De La Cruz L. L., J. Ron P., J. L. Ramírez D., J. J. Sánchez G., M. M. Morales R., M. Chuela B., S. A. Hurtado P. y S. Mena M. (2003) Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:1-10.

Edmeades G. O., W. Trevisan, B. M. Prassana and H. Campos (2017) Tropical maize (*Zea mays* L.). *In*: Genetic Improvement of Tropical Crops. H. Campos and P. D. S. Caligari (eds.). Springer. New York, USA. pp:57-109.

Escorcia-Gutiérrez N., J. D. Molina-Galán, F. Castillo-González y J. A. Mejía-Contreras (2010) Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruzas simples de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:271-279.

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 F_1 y F_2 de híbridos trilineales de maíz en los valles altos de México. *Universidad y Ciencia* 28:57-64.

Falconer D. S. and T. F. C. Mackay (1996) Introduction to Quantitative Genetics. Longman Group Ltd. Harlow, England. 464 p.

Fernie A. R., Y. Tadmor and D. Zamir (2006) Natural genetic variation for improving crop quality. *Current Opinion in Plant Biology* 9:196-202, https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.010

García Z. J., J. López R., J. Molina G. y T. Cervantes S. (2002) Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una cruza intervarietal F_2 de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:387-391.

Gómez-Espejo A. L., J. D. Molina-Galán, J. J. García-Zavala, M. C. Mendoza-Castillo y A. de-la-Rosa-Loera (2015) Poblaciones exóticas originales y adaptadas de maíz. I: variedades locales de clima templado × variedades tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:57-66.

Goodman M. M. (1999) Broadening the genetic diversity in maize breeding by use of exotic germplasm. *In:* The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. J. G. Coors and S. Pandey (eds.). ASA, CSSA. Madison, WI, USA. pp:139-148.

Gouesnard B., J. Sanou, A. Panouillé, V. Bourion and A. Boyat (1996) Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germ plasm polymorphism in adapted × exotic maize crosses. *Theoretical and Applied Genetics* 92:368-374, https://doi.org/10.1007/BF00223681

Hallauer A. R. and M. J. Carena (2009) Maize breeding. *In*: Cereals. M. J. Carena (ed.). Springer. New York, USA. pp:3-98

Hallauer A. R., M. J. Carena and J. B. Miranda F. (2010) Quantitative Genetics in Maize Breeding. Third edition. Springer. New York, USA. 663 p.

Hernández C. J. M. y G. Esquivel E. (2004) Rendimiento de grano y características agronómicas en germoplasma de maíz de valles altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:27-31.

López G. J. A., J. A. Aguilar C., J. J. García Z., R. Lobato O. y P. Sánchez G. (2017) Comportamiento agronómico de poblaciones de maíz raza Jala en Nayarit y Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1537-1548, https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.510

Malik H. N., S. I. Malik, S. R. Chughtai and H. I. Javed (2004) Estimates of heterosis among temperate, subtropical and subtropical maize germplasm. *Asian Journal of Plant Sciences* 3:6-10, https://doi.org/10.3923/ajps.2004.6.10

Martínez O., H. Aramendis y M. Torregroza C. (1992) Selección masal divergente por prolificidad en maíz y sus efectos en las características de la espiga. *Agronomía Colombiana* 9:40-48.

Martínez-Lázaro C., L. E. Mendoza-Onofre, G. García-de los Santos, M. C. Mendoza-Castillo y A. Martínez-Garza (2006) Rendimiento de grano de híbridos isogénicos de maíz formados mediante androesterilidad *vs.* desespigamiento. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:365-368.

Mickelson H. R., H. Cordova, K. V. Pixley and M. S. Bjarnason (2001) Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize populations. *Crop Science* 41:1012-1020, https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4141012x

Montenegro T. H., F. Rincón S., N. A. Ruíz T., H. de León C. y G. Castañon N. (2002) Potencial genético y aptitud combinatoria de germoplasma de maíz tropical. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:135-142.

Palemón A. F., N. O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J. D. Molina G. y S. Miranda C. (2012) Potencial productivo de cruzas intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:157-171.

Pérez C. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002) Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:435-441.

Pérez-Colmenarez A. A., J. D. Molina-Galán y A. Martínez-Garza (2000) Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34:533-542.

Prasanna B. M. (2012) Diversity in global maize germplasm: characterization and utilization. *Journal of Biosciences* 37:843-855, https://doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1

Rafiq C. M., M. Rafique, A. Hussain and M. Altaf (2010) Studies on heritability, correlation and path analysis in maize (*Zea mays* L.). *Journal Agricultural Research* 48:35-38.

Rani G. U., V. S. Rao, M. L. Ahmad. and K. L. N. Rao (2017) Character association and path coefficient analysis of grain yield and yield components in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6:4044-4050, https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.465

SAS Institute (2002) User´s Guide SAS/STAT® 9.0. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 550 p.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp. (Septiembre, 2018).

Wellhausen E. J., L. M. Roberts, E. Hernandez X. and P. C. Mangelsdorf (1952) Races of Maize in Mexico. Their Origin, Characteristics and Distribution. The Bussey Institution of Harvard University. Cambridge, Massachusetts, USA. 223 p.