

Estimación de varianzas genéticas en ocho variedades criollas de maíz para el Bajío mexicano¹

Estimate of genetic variances in eight creole maize varieties for the Mexican low-land region

Luis Ángel Muñoz-Romero², Enrique Navarro-Guerrero², Manuel De-la-Rosa-Ibarra², Luis Pérez-Romero², Ángel Enrique Caamal-Dzul²

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue estimar la aptitud combinatoria, varianzas genéticas y heterosis en ocho variedades criollas de maíz. La investigación se efectuó en Irapuato, Guanajuato, México, durante 2008 y 2009. Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones para evaluar las veintiocho cruces con el método 4 de Griffing (1956). Cada parcela experimental consistió de cuatro surcos de cinco metros de largo con una separación de 0,75 m. La aptitud combinatoria general y específica (ACG y ACE) fueron altamente significativas ($P \leq 0.01$) para todas las variables excepto días a floración. La varianza genética de dominancia (σ^2D) fue mucho más grande e importante que la varianza genética aditiva (σ^2A) para la mayoría de las variables en estudio, de tal forma que los efectos genéticos no aditivos fueron los que determinaron la expresión de las variables en los cruzamientos. Las variedades P6 (criollo #5), P7 (criollo #2) y P8 (criollo San Antonio) tuvieron los mayores valores para las varianzas asociadas a los efectos de aptitud combinatoria específica (σ^2ACE) para longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de mazorcas totales y rendimiento de grano. Algunos cruzamientos fueron identificados por su rendimiento de grano y heterosis, principalmente los que incluyeron germoplasma de los criollos #5, #2 y San Antonio, por lo que se recomienda derivar líneas de estas poblaciones para formación de híbridos.

Palabras claves: aptitud combinatoria, cruces dialélicas, *Zea mays*, heterosis.

Abstract

The aim of this work was to estimate the combinatorial aptitude, genetic variance and heterosis of eight creole corn varieties. The research work was carried in Irapuato, Guanajuato, México, during 2008 and 2009. A randomized complete block design with three replications was used to evaluate the twenty-eight crosses under method 4 Griffing (1956). Each experimental plot included four rows five meters long with a separation of 0,75 m. The general combining ability and specific (ACG and ACE) were highly significant ($P < 0.01$) for all traits except flowering days. The dominance variance (σ^2D) was larger and more important than additive variance (σ^2A) for most of the traits, indicating that non-additive genetic genes were important on the expression of those traits on crosses. It was observed that

¹ Recibido: 12 de noviembre, 2015. Aceptado: 28 de enero, 2016. Este trabajo formó parte de la tesis para obtener título Ingeniero Agrónomo en Producción del último autor. Dicha investigación fue financiada con recursos propios del Profr. L.A. Muñoz Romero. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Saltillo, Coahuila. 25315. México. munozromero_45@hotmail.com, eng-801@hotmail.com, mribarra@prodigy.net.mx, lupero53@hotmail.com, angel_enr_89@hotmail.com



varieties P6 (creole #5), P7 (creole #2) and P8 (creole San Antonio) had larger variance effects (σ^2 ACE) for long cob, number of rows per cob, total cob number, and grain yield. Some outstanding crosses were identified for their high grain yield as well as heterosis, mainly those that included germoplasm of creole #5, #2 and San Antonio. According to the aforementioned we recommend to draw lines from the above populations and cross them to produce hybrids.

Keywords: combining ability, diallel crosses, *Zea mays*, heterosis.

Introducción

Por la gran diversidad genética de maíces criollos y silvestres se considera a México como país de origen de ese cultivo (Mangelsdorf et al., 1964). Los habitantes mesoamericanos desde hace más de siete mil años han cultivado, mejorado y conservado este importante recurso genético, ya que ha formado parte de su alimentación, cultura y tradiciones. Las comunidades indígenas han logrado preservar esta diversidad genética que representa un legado para la humanidad. La gama de maíces criollos, aunque son de bajo rendimiento (1 a 1,5 t/ha), sobresalen por su adaptabilidad a condiciones adversas, capaces de sobrevivir donde los maíces híbridos no tienen oportunidad, debido al estrés hídrico a que están expuestos. Productores de las regiones con escasa precipitación prefieren maíces criollos, por la adaptación a las condiciones ambientales, a las parcelas, por las características de los alimentos que con ellos preparan, además de satisfacer las necesidades del ganado (forraje). De manera general, la preferencia entre los distintos tipos de maíz es por su color, sabor, textura, tamaño y resistencia de la masa para la elaboración de tortillas (Antuna et al., 2008). Otra de las razones de mejorar las variedades criollas es que puedan utilizarse en regiones productivas, optimizando la heterosis que comúnmente se encuentra en materiales de distinto origen y al maximizar la combinación de las variedades criollas con las mejoradas. Para la formación de variedades mejoradas de maíz, se han utilizado maíces criollos, para lo cual se hacen pruebas durante años y en diferentes localidades, con el propósito de detectar el grupo superior, y así liberar alguna variedad como tal, o bien someterla al proceso de mejoramiento genético de poblaciones (Márquez, 1991).

En México alrededor del 70% de la superficie maicera se cultiva con variedades criollas (Márquez, 2008), la obtención de materiales genéticamente mejorados prácticamente se ha dirigido a maíces híbridos, cuyo potencial productivo en su mayoría es para ambientes favorables. Por otro lado, donde la agricultura es tradicional o de subsistencia existen pocas poblaciones de maíz mejoradas, de manera que cuando se trata de introducir material mejorado a esas condiciones, generalmente no se adaptan, dado que no fueron creados para dichos ambientes. Empezar programas de mejoramiento genético para mejorar las variedades criollas en esas regiones con ese tipo de agricultura, sería un proceso de selección a largo plazo para incrementar las frecuencias génicas de los caracteres que se desean mejorar, dada la variabilidad ambiental y étnica que se encuentra en la República Mexicana. Ante estas circunstancias, el mejorador debe decidir con anticipación el diseño y desarrollo de variedades de maíz apropiadas para una agricultura intensiva y altamente desarrollada, para tal efecto, los tipos de acción génica de caracteres de interés agronómico como rendimiento de grano es un requisito indispensable (Martínez y De León, 1996). Los diseños genéticos constituyen una herramienta útil para caracterizar y estimar los parámetros genéticos de progenitores y sus cruza, mediante aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) y así, definir el método de mejoramiento genético más adecuado y predecir cruza superiores considerando patrones heteróticos (Hallauer y Miranda, 1988).

Un gran número de estudios (De León, 1981; Morales, 1999; Antuna, 2001) han sido llevados a cabo para conocer los patrones heteróticos entre variedades de maíz, para determinar la aptitud de los progenitores y sus cruza, ya que a mayor heterosis se infiere mayor divergencia genética entre poblaciones y viceversa, lo cual se fundamenta en el principio de diferencias en las frecuencias génicas entre las poblaciones parentales (Falconer, 1981).

Trabajos sobre heterosis y aptitud combinatoria en maíz se han realizado en caracteres de importancia económica. Se ha observado una heterosis promedio para precocidad de -0,8%, longitud de mazorca de 12,9%, peso de diez mazorcas de 28,2% y altura de mazorca de 8,6% (Dickert y Tracy, 2002). Por otro lado, Sadaiah et al. (2013) identificaron híbridos simples que superaron a los testigos para contenido de azúcar en el grano de maíz con base en la heterosis y aptitud combinatoria; Gama et al. (1995) lograron identificar líneas sobresalientes de maíz con base en la aptitud combinatoria general e incorporarlas en un programa de producción de semillas, la mayoría de la variación total observada en las cruza fue del tipo aditivo.

Los diseños de cruza dialélicas han sido utilizados en investigaciones sobre mejoramiento en plantas y animales con el propósito de obtener información experimental que permita evaluar aspectos genéticos asociados a "p" progenitores (Baker, 1978). Estos diseños han proporcionado información sobre los efectos de aptitud combinatoria general y específica, efectos maternos y recíprocos, además de componentes de varianza, importantes para la toma de decisiones en la elección de material genético para los programas de mejoramiento genético (Mendoza et al., 2000; Mastache y Martínez, 2003). La aptitud combinatoria general se debe a efectos genéticos aditivos, y es la estimación de la cuantía de los efectos de los genes de acción aditiva, mientras que la aptitud combinatoria específica está en función de los efectos no aditivos, como la dominancia y/o epistasia (Sprague y Tatum, 1942).

El objetivo del presente trabajo fue estimar la aptitud combinatoria, varianzas genéticas y heterosis en ocho variedades criollas de maíz.

Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación se realizó en Irapuato, Guanajuato, México, durante los años 2008 y 2009. Irapuato está situado a una altitud de 1730 msnm, con una precipitación pluvial de 600-900 mm, y una temperatura media anual de 19,6 C°. Durante 2008 se produjeron las cruza directas de ocho variedades de maíz criollo recolectadas en diferentes municipios del estado de Guanajuato (Pénjamo, Irapuato, Cuerámaro, Huanímaro y Salvatierra); las colectas se realizaron durante 2006 y una muestra de 10 kg de cada criollo fue proporcionada por los productores (Cuadro 1).

Antes de la floración femenina se procedió a colocar bolsas de papel glassine (también conocido como papel cristal) en cada una de las ocho variedades para evitar contaminación con polen extraño, las variedades criollas fueron de grano blanco a excepción del VS-370 (grano morado), todas con buena calidad culinaria. Después de

Cuadro 1. Rasgos agronómicos de variedades de maíz criollo recolectados en el Estado de Guanajuato, México. 2006.
Table 1. Agronomic traits of creole maize varieties collected in Guanajuato, México. 2006.

Criollo	Color grano	Tipo de grano	Ciclo Vegetativo	Sitio
Olote colorado	Blanco	---	Mediano	Parámaro
Criollo 7	Blanco	---	Mediano	Pénjamo
VS -201	Blanco	---	Precoz	Irapuato
Pepitilla	Blanco	Alargado y puntiagudo	Mediano	Cuerámaro
VS -370 (criollo morado)	Morado	---	Mediano	El Duranguito
Criollo #5	Blanco	---	Mediano	Huanímaro
Criollo #2	Blanco	---	Mediano	Arciga
San Antonio	Blanco	---	Mediano	La purísima

cinco días se recolectó polen de las parcelas de los progenitores macho, cubriendo un mínimo de ochenta espigas para tener una muestra representativa de los gametos masculinos, y este fue llevado a las parcelas hembra. En cada uno de los cruzamientos se cosecharon treinta mazorcas, se desgranaron y mezclaron mecánicamente para evaluar el comportamiento de las cruzas en ensayos de rendimiento.

Las veintiocho cruzas obtenidas en el dialélico fueron evaluadas en 2009, bajo un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. La parcela experimental estuvo constituida de cuatro surcos de 5 m con una separación entre surcos de 0,75 m con cuatro plantas por metro (densidades de planta y manejo agronómico similares a las utilizadas por los productores del Bajío-INIFAP, 2007), y como parcela útil los dos surcos centrales.

Para determinar la aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE), sus efectos y estimar las varianzas genéticas de las ocho variedades criollas de maíz, se utilizó el método 4 del dialélico de Griffing (1956) para cada una de las variables bajo estudio, las cuales fueron: días a floración (DF), tiempo (días) transcurrido de siembra al 50% de espigas masculinas con polen, altura de planta (AP), medición (m) del suelo a la punta de la espiga en diez plantas al azar en cada parcela experimental, altura de mazorca (AM), medición (m) del suelo a la mazorca principal en diez plantas al azar en cada parcela experimental, número de hojas arriba de mazorca (NHAM), número (No.) de hojas de diez plantas al azar en cada parcela experimental, longitud de mazorca (LM), largo (cm) de diez mazorcas de cada parcela experimental, diámetro de mazorca (DM), grosor (cm) de diez mazorcas de cada parcela experimental, número de hileras de la mazorca (NHM), conteo (No.) de hileras de diez mazorcas de cada parcela experimental, granos por hilera por mazorca (GHM), conteo (No.) de granos/hilera de diez mazorcas de cada parcela experimental, diámetro de olote (DO), grosor (cm) del olote de diez mazorcas de cada parcela experimental, número de mazorcas totales (NMT), conteo (No.) del total de mazorcas en cada parcela experimental, rendimiento (REND), peso total (kg) de cada parcela experimental.

En el cálculo de las varianzas genéticas se consideró un coeficiente de endogamia ($F=0$) para las variedades criollas (SAS, 1985). La heterosis de las veintiocho cruzas posibles entre las ocho variedades criollas, se estimó con base en la media de los progenitores y el mejor progenitor de las variables en estudio.

Resultados

Se observó que los valores de los cuadrados medios de aptitud combinatoria general y específica (ACG y ACE) fueron altamente significativos para todas las variables ($P \leq 0,01$), excepto para días a floración, la cual no mostró diferencias significativas (Cuadro 2). Estos resultados indican que el componente de aptitud combinatoria específica (σ^2_s) fue más grande e importante que el de aptitud combinatoria general (σ^2_G) para todas las variables en estudio, excepto para número de hojas arriba de la mazorca, por lo que, se puede inferir que la mayor parte de la variación genética total se debió a efectos génicos no aditivos. Es por esta razón que se recomendaría derivar líneas de los materiales superiores que mostraron mayor ACE para formación de híbridos experimentales (Hull, 1945).

En el Cuadro 3 se observan los componentes de varianza genética aditiva (σ^2_A) y varianza de dominancia (σ^2_D); se aprecia que todas las variables presentaron valores (%) de varianza aditiva bajos en comparación con el porcentaje de varianza de dominancia, a excepción de número de hojas arriba de la mazorca (85,71%). Los principales componentes de rendimiento como: largo de mazorca, diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca, número total de mazorcas, presentaron los valores más bajos de varianza aditiva, por lo que, la aplicación de los métodos de selección recurrente intrapoblacional sería ineficiente para incrementar la frecuencia de esos alelos en esas variables (Gardner, 1961; Russell et al., 1973).

El componente de varianza que sobresalió por su magnitud fue la aptitud combinatoria específica (σ^2_{ACE}) para la mayoría de las variables (Cuadro 4). Las mejores variedades fueron P6 (criollo #5), P7 (criollo #2), P8 (criollo San Antonio), entre otros, para longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de mazorcas totales y

Cuadro 2. Cuadrados medios de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) y sus respectivos componentes de varianza para las once variables en ocho variedades criollas de maíz, en Irapuato, Guanajuato, México, durante 2009.

Table 2. Mean squares for general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) and their variance components for eleven variables on eight corn varieties, in Irapuato, Guanajuato, México, during 2009.

Variable	ACG	σ^2_G	ACE	σ^2_s	$\epsilon \epsilon$	C.V %
DF	4,5980NS	0,4410	7,2470NS	1,8680	5,3790	5,59
AP	0,0183**	0,0020	0,0063**	0,0057	0,0070	5,74
AM	0,0116**	0,0009	0,0058**	0,0052	0,0060	9,33
NHAM	0,4741**	0,0757	0,0195**	0,0137	0,0580	7,05
LM	0,4206**	0,0411	0,3345**	0,3158	0,3750	6,56
DM	0,0057**	0,0012	0,0129**	0,0122	0,0150	4,43
NHM	0,5415**	0,0446	0,8093**	0,7732	0,7220	10,71
GHM	2,0149**	0,0596	2,3725**	2,2846	1,7590	6,68
DO	0,0176**	0,0012	0,0101**	0,0091	0,0203	9,68
NMT	2,1800**	0,4287	4,7520**	4,6682	3,3500	7,31
REND	0,3873**	0,0107	0,3227**	0,3152	0,3020	13,12

σ^2_G : varianza aptitud combinatoria general; σ^2_s : varianza aptitud combinatoria específica; $\epsilon \epsilon$: error experimental; CV: coeficiente de variación (%) / σ^2_G : general combining ability variance, σ^2_s : specific combining ability variance, $\epsilon \epsilon$: Experimental error and CV: variance coefficient (%).

DF: días a floración; AP: altura de planta (m); AM: altura de mazorca (m); NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; LM: longitud de mazorca (cm); DM: diámetro de mazorca (cm); NHM: número de hileras por mazorca; GHM: granos por hilera de mazorca; DO: diámetro del olote (cm); NMT: número de mazorca total; REND: rendimiento (kg). NS: no significativo; **: significativo ($P \leq 0,01$) / DF: days to flower; AP: plant height (m); AM: corn height (m); NHAM: leaves number above cob; LM: cob length (cm); DM: cob diameter (cm); NHM: row number per cob; GHM: row grains per cob; DO: corncob diameter (cm); NMT: total cob number; REND: grain yield (kg). NS: non-significant; **: significant ($P < 0.01$).

rendimiento de grano. Si el objetivo fuera índices de selección, estos padres serían seleccionados considerando las variables anteriores para ver reflejado un incremento importante en rendimiento de grano.

De las veintiocho cruzas posibles se observó que el 75%, 68% y 79% de las cruzas superaron al progenitor medio para las variables días a floración, altura de planta y mazorca, respectivamente; sin embargo, es de resaltar que la heterosis sobre el mejor progenitor para las variables señaladas, tuvieron un rango de -36 a -54%, es decir, fueron más precoces y de menor altura de planta como de mazorca. Por otro lado, también se aprecia que las variables más relacionadas con rendimiento de grano, tales como longitud de mazorca (LM), número de hileras por mazorca (NHM), granos por hilera de mazorca (GHM) y número de mazorcas totales (NMT), presentaron una heterosis media en un rango de 54 a 71% y de un 43 a 57% sobre el mejor progenitor. Los cruzamientos más sobresalientes fueron aquellos donde intervinieron las variedades 6, 7 y 8 (criollo #5, criollo #2 y criollo San Antonio). Los cruzamientos más rendidores estuvieron asociados con los porcentajes de heterosis más altos y fueron aquellos que incluyeron germoplasma de las variedades criollo #5, criollo #2 y criollo San Antonio (2 x 7, 1 x 7, 1 x 6, 3 x 8, 5 x 7, 3 x 7, 4 x 8, entre otros).

Cuadro 3. Componentes de varianza genética aditiva (σ^2A) y varianza genética de dominancia (σ^2D), y porcentaje en relación a la varianza genética total para las once variables, en ocho variedades criollas de maíz en Irapuato, Guanajuato, México, durante 2009.
Table 3. Additive genetic variance (σ^2A) and dominance genetic variance (σ^2D) components, and percentage to total genetic variance for eleven variables, on eight corn varieties, in Irapuato, Guanajuato, México, during 2009.

Variable	Varianzas		Componente genético	
	(σ^2A)	(σ^2D)	% σ^2A	% σ^2D
DF	1,64	7,47	18,00	82,00
AP	0,01	0,02	33,33	66,67
AM	0,02	0,04	33,33	66,67
NHAM	0,30	0,05	85,71	14,29
LM	0,06	1,26	4,55	95,45
DM	0,01	0,04	20,00	80,00
NHM	0,18	3,09	5,50	94,50
GHM	0,24	9,14	2,56	97,44
DO	0,01	0,04	20,00	80,00
NMT	1,71	18,67	8,39	91,61
REND	0,04	1,26	3,08	96,92

DF: días a floración; AP: altura de planta; AM: altura de mazorca; NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; NHM: número de hileras por mazorca; GHM: granos por hilera de mazorca; DO: diámetro del olote; NMT: número de mazorca total y REND: rendimiento / DF: days to flower; AP: plant height; AM: cob height; NHAM: leaves number above cob; LM: long cob; DM: cob diameter; NHM: row number per cob; GHM: row grains per cob; DO: corncob diameter NMT: total cob number and REND: grain yield.

Discusión

Una gran cantidad de estudios sobre maíces criollos se han realizado para determinar su potencial agronómico y caracterización de los mismos para áreas donde no es factible la compra de semilla híbrida. Para la mayoría de los agricultores de temporal es difícil utilizar semilla híbrida en forma recurrente principalmente por su costo, por lo que una alternativa sería el uso de variedades mejoradas que conserven sus características culinarias así como su potencial productivo.

Los efectos de ACE fueron más grandes e importantes que los de ACG para la mayoría de las variables (Cuadro 2); estos resultados no coinciden con la mayoría de los estudios sobre acción génica en poblaciones o variedades de maíz, probablemente se deba a que el material utilizado se haya cruzado con híbridos en forma natural y/o este demasiado acriollado, es decir, los productores lo han ido seleccionando y mejorando a través del tiempo, a tal grado que su nivel de dominancia es alto y por ende, su varianza de dominancia. Es así que Coutiño et al. (2010) determinaron la aptitud combinatoria general y específica de seis variedades criollas de maíz elotero y sus cruza directas, y encontraron que los efectos génicos aditivos fueron significativos e importantes para contenido de azúcar, y señalan que esta característica puede ser mejorada en aquellas variedades criollas con altos valores

Cuadro 4. Varianzas asociadas a los efectos de aptitud combinatoria general (σ^2ACG) y aptitud combinatoria específica (σ^2ACE) para las once variables en ocho variedades criollas de maíz en Irapuato, Guanajuato, México, durante 2009.
Table 4. Associated variances for general combining ability (σ^2GCA) and specific combining ability (σ^2SCA) effects for eleven variables on eight corn varieties, in Irapuato, Guanajuato, México, during 2009.

Variable	P1		P2		P3		P4	
	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE
DF	0,30025	-0,57600	1,18309	-2,86195	2,03961	-3,04050	-0,64385	-1,75423
AP	0,00056	0,00311	0,00927	0,006710	0,00164	0,00619	0,00271	0,00191
AM	0,00031	0,00353	0,00389	0,00508	0,00154	0,00737	0,00032	0,00114
NHAM	0,00889	0,00806	0,00636	0,02651	0,00076	0,02663	0,00778	0,00807
LM	0,13550	0,36472*	0,04961	0,27450*	0,12096	0,23217*	0,03413	0,03782
DM	0,00120	0,02688*	0,00240	0,05091*	0,00007	0,08891	0,00160	0,03422**
NHM	0,07352	0,60697**	0,07653	1,51950**	0,24380	0,47171**	0,02346	0,64591**
GHM	0,64522	1,49074*	0,22610	1,78070*	0,46562	0,75485*	-0,00876	0,28902
DO	0,01032	0,00835	0,00185	0,01355	0,00002	0,00209	0,00054	0,01181
NMT	0,05032	2,14222*	-0,00531	2,78965*	0,55012	2,04870*	0,16132	2,38226*
REND	0,04845	0,25528*	0,00414	0,41854**	0,01822	0,32193**	0,07696	0,09317*

Variable	P5		P6		P7		P8	
	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE	σ^2ACG	σ^2ACE
DF	-0,28292	11,7521	-0,66400	-2,23633	-0,64400	-1,87268	-0,64370	11,2458
AP	-0,00010	0,00373	0,00048	0,00095	0,00541	0,00804	-0,00009	0,00660
AM	-0,00007	0,00151	0,00184	0,00251	0,00491	0,00567	0,00014	0,00774
NHAM	0,00035	0,00763	0,17270	0,00288	0,0078	0,01369	-0,00075	0,02186
LM	-0,00268	0,11496*	0,00695	0,42666***	0,02637	0,62221**	0,09871	0,16295*
DM	0,00006	0,03007**	0,00008	0,03590*	0,00008	0,03076*	0,00064	0,03377*
NHM	0,46918	0,30163*	0,20203	0,99791**	0,00966	0,59761*	0,49642	1,35136**
GHM	-0,01220	1,45181*	0,41685	3,91060**	0,39549	3,75857**	0,12355	1,79111**
DO	0,00457	0,00539	-0,00012	0,00721	0,00127	0,00242	-0,00094	0,00984
NMT	1,04435	3,13152*	0,32812	5,51586**	0,21065	6,99781**	0,02556	6,16249**
REND	0,05664	0,08539*	0,28908**	0,28908**	0,13521	0,41595**	0,09819	0,23358**

P1-P8: progenitores, σ^2ACG : efectos de varianza para aptitud combinatoria general, σ^2ACE : efectos de varianza para aptitud específica, DF: días a floración; AP: altura de planta; AM: altura de mazorca; NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; NHM: número de hileras por mazorca; GHM: granos por hilera de mazorca; DO: diámetro del olote; NMT:número de mazorca total y REND:rendimiento. *, ** : significativo ($P \leq 0,05$ y $P \leq 0,01$, respectivamente) / P1-P8: progenitors, σ^2ACG :general combining ability variance effect, σ^2ACE :specific combining ability variance effect, DF: days to flower; AP: plant height; AM: cob height; NHAM: leaves number above cob; LM: cob length; DM: cob diameter; NHM: row number per cob; GHM: row grains per cob; DO: corncob diameter NMT: total cob number and REND: grain yield. *,** : significant ($P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively).

de aptitud combinatoria general, con el uso de algún método de selección recurrente intrapoblacional. Por otro lado, Dzib-Aguilar et al. (2011) observaron que para rendimiento de grano la ACG fue mayor que la ACE, por lo

que, se sugirió mejoramiento por selección; además, se detectó buenas combinaciones entre poblaciones nativas con mejoradas, para rendimiento de grano con reducción en altura de planta y longitud del ciclo. En otro trabajo conducido por Barrera et al. (2005) se midió la aptitud combinatoria en razas de maíz mejoradas por retrocruza limitada y encontraron que para rendimiento, las diez poblaciones retrocruzadas fueron similares a los progenitores. También se observó una altura de planta similar a la de los híbridos comerciales, además de un incremento en precocidad; sin embargo, hubo una reducción en la variabilidad de ACG y más se acentuó en la ACE, por lo que, se sugirió restituir la diversidad de los efectos de ambas aptitudes combinatorias a través de la autofecundación para mantener las características raciales de la mazorca. En aras de ver la utilidad de las variedades criollas, se evaluó el potencial agronómico de veinticuatro variedades criollas de maíz de la raza Chalqueño, y aunque ninguna superó al testigo H-139 en productividad, todas las variedades de maíz azul presentaron mejor peso de cien semillas, y una gran mayoría de estas tuvieron mayor vigor de germinación de plantas normales; aunado a la alta concentración de lisina y antioxidantes en los criollos de grano azul (Antonio et al., 2004). Podría ser esto una alternativa para conservar y mejorar este tipo de criollos para el consumo humano e industrial.

La varianza de dominancia fue más importante que la varianza aditiva para la mayoría de las variables estudiadas, esto coincide con lo reportado por Abdel-Moneam et al. (2015), quienes determinaron la aptitud combinatoria de seis líneas amarillas de maíz y observaron que la relación de la ACG/ACE fue menor a la unidad para todos los caracteres (longitud de mazorca, número de hileras/mazorca) e indicaron que los efectos no aditivos fueron más importantes que los aditivos; la misma tendencia se presentó para rendimiento de grano y sus componentes de rendimiento. Lo anterior contrasta con lo observado en variedades y/o poblaciones de maíz en donde la varianza aditiva fue hasta dos veces más grande que la varianza de dominancia en caracteres de importancia económica como rendimiento de grano (Gardner, 1961; Caballero y Cervantes, 1990; Sahagún et al., 1991). En este sentido Reyes et al. (2004) estimaron la acción génica de la población Tuxpeño utilizando el método 4 de Griffing y encontraron que la varianza de los efectos aditivos fue mayor que los no aditivos (varianza de dominancia) para rendimiento de mazorca, concluyendo que una cruce simple será de alto rendimiento si sus líneas progenitoras son de alta ACG y su efecto de ACE también es alto, y que si las líneas son de baja ACG y su efecto de ACE es bajo, el rendimiento también será bajo. Finalmente, Esquivel et al. (2009) estimaron la aptitud combinatoria y heterosis en etapas de crecimiento inicial del desarrollo del maíz de quince poblaciones nativas y sus cruces utilizando el diseño 2 de Griffing y otros genotipos adicionales del área de distribución de la raza Chalqueño en los Valles Altos de México; observaron un mayor efecto de ACG en relación a la ACE en los diversos caracteres medidos en el vigor inicial de la semilla de maíz, por lo que, es probable mejorar estos atributos por selección recurrente. Además, detectaron la presencia de heterosis entre los progenitores de diferente origen geográfico, lo que indica que la diversidad genética estuvo asociada con la geografía. Lo anterior concuerda con los valores obtenidos (Cuadro 4) en esta investigación, donde los criollos #5, #2, y San Antonio exhibieron los valores más altos de heterosis, lo cual probablemente se debió a que estos fueron recolectados en sitios geográficos diferentes.

Conclusiones

En los resultados e interpretación de este diseño dialélico, que incluye ocho poblaciones criollas de maíz y sus cruces directas, se observó que los principales efectos genéticos fueron los del tipo de aptitud combinatoria específica (σ^2_{ACE}), los cuales están relacionados con la varianza genética de dominancia (σ^2_D), y estos fueron muy superiores y de gran magnitud versus la varianza genética aditiva (σ^2_A) para todas las variables a excepción de número de hojas arriba de la mazorca (NHAM). Sobresalieron la variedad 6 (criollo #5), variedad 7 (criollo #2) y la variedad 8 (criollo San Antonio), por la magnitud de sus varianzas asociadas a los efectos de aptitud combinatoria específica (σ^2_{ACE}) para las variables relacionadas con rendimiento de grano tales como, longitud de mazorca, número y granos por hilera de mazorca y número total de mazorcas. Un alto porcentaje de cruces mostró efectos

heteróticos. De continuar con un programa de mejoramiento, hay que derivar líneas de aquellos progenitores que mostraron los valores heteróticos más altos para incluirlos en programas de hibridación.

Literatura citada

- Abdel Moneam, M.A., M.S. Sultan, S.E. Sadek, and M.S. Shalof. 2015. Combining abilities for yield and yield components in diallel crosses of six new yellow maize inbred lines. *Inter. J. Plant Breed. Genet.* 9:86-94.
- Antonio, M., J.L. Arellano-Vázquez, G. García-De-Los-Santos, S. Miranda-Colín, J.A. Mejía-Contreras, y F.V. González-Cossio. 2004. Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:9-15.
- Antuna, G.O. 2001. Calidad fisiológica de semillas y comportamiento agronómico de seis líneas de maíz y su combinación híbrida. Tesis MSc., UAAAN, Saltillo, Coahuila, MEX.
- Antuna, G.O., S.A. Rodríguez-Herrera, G. Arámbula-Villa, A. Palomo-Gil, E. Gutiérrez-Arias, A. Espinoza Banda, E.F. Navarro-Orona, y E. Andrio-Enríquez. 2008. Calidad nixtamalera y tortillera en maíces criollos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 31:23-27.
- Barrera, G.E., A. Muñoz-Orozco, F. Márquez-Sánchez, y A. Martínez-Garza. 2005. Aptitud combinatoria en razas de maíz mejoradas por retro-cruza limitada. I. Caracteres agronómicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 28:231-242.
- Baker, R.J. 1978. Issues in diallel analysis. *Crop Sci.* 18:533-536.
- Caballero, H.F., y T. Cervantes. 1990. Estudio genético y taxonómico de poblaciones de maíz de la raza Tuxpeño. *Agrociencia* 1:43-64.
- Coutiño, E.B., V.A. Vidal-Martínez, B. Cruz-Gómez, y C. Cruz-Vázquez. 2010. Aptitud combinatoria general y específica del contenido de azúcares en maíces criollos eloteros. *Rev. Fitotec. Mex.* 33:57-61.
- De León, C.H. 1981. Rendimiento y heterosis de híbridos de maíz con materiales sobresalientes del INIA y la UAAAN. Tesis Lic., UAAAN, Saltillo, Coahuila, MEX.
- Dickert, T.E., and W.F. Tracy. 2002. Heterosis for flowering time and agronomic traits among early open-pollinated sweet corn cultivars. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 127:793-797.
- Dzib-Aguilar, L.A., J.C. Segura-Correa, R. Ortega-Paczka, y L. Latournerie-Moreno. 2011. Cruzas dialélicas entre poblaciones nativas de maíz de Yucatán y poblaciones mejoradas. *Trop. Subt. Agroecosys.* 14:119-127.
- Esquivel, E.G., G.F. Castillo, C.J.M. Hernández, V.A. Santacruz, S.G. García, G.J.A. Acosta, y H.A. Ramírez. 2009. Aptitud combinatoria y heterosis en etapas tempranas del desarrollo del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 32:311-318.
- Falconer, D.S. 1981. Introduction to quantitative genetics. 2nd ed. Longman Inc, N.Y., USA.
- Gama, E.E., A.R. Hallauer, R.G. Ferrao, and D.M. Barbosa. 1995. Heterosis in maize single crosses derived from a yellow Tuxpeño variety in Brazil. *Rev. Bras. Genet.* 18:81-85.
- Gardner, C.O. 1961. An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yields of corn. *Crop Sci.* 1:241:45.
- Griffing, B.J. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. Biol. Sci.* 9:463-493.
- Hallauer, A.R., and J.B. Miranda. 1988. Quantitative genetics in maize breeding. 2nd ed. Iowa State University Press, Ames, IA, USA.

- Hull, H.F. 1945. Recurrent selection for specific combining ability in corn. *J. Am. Soc. Agron.* 37:134-45.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2007. Paquete tecnológico para maíz de temporal (ciclo agrícola primavera-verano) para condiciones de alto, medio y bajo potencial productivo. SAGARPA, México, D.F., MEX.
- Mangelsdorf, P.C., R.S. Mac Neish, and W.C. Galinat. 1964. Domestication of corn. *Science* 143:538-545.
- Márquez, S.F. 2008. De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agric. Soc. Desarrollo* 5:151-166.
- Márquez, S.F. 1991. Genotecnia vegetal: métodos, teoría y resultados. Tomo III. A.G.T. Editor S.A., MEX.
- Martínez, G., y C.H. De León. 1996. Efectos genéticos en híbridos de maíz tropical (*Zea mays* L). III. Acame, mala cobertura y pudrición de mazorca. *Agron. Mesoam.* 7(1):47-52.
- Mastache, L.A., y A.A. Martínez. 2003. Un algoritmo para el análisis, estimación y predicción de experimentos dialélicos balanceados. *Rev. Fitotec. Mex.* 26:191-200.
- Mendoza, M., A. Oyervides, y A. López. 2000. Nuevos cultivares de maíz con potencial agronómico para el trópico húmedo. *Agron. Mesoam.* 11(1):83-88.
- Morales, M.N. 1999. Estudio comparativo de ocho características de 96 híbridos de sorgo para grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) evaluados en la Región Norte de Tamaulipas. Tesis Lic., UAAAN, Saltillo, Coahuila, MEX.
- Reyes, L.D., J.D. Molina-Galván, M.A. Oropeza-Rosas, y E.D. Moreno-Pérez. 2004. Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza Tuxpeño. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:49-56.
- Russell, W. A., S.A. Eberhart, and U.A. Vega. 1973. Recurrent selection for specific combining ability for yield in two maize populations. *Crop Sci.* 13:257-261.
- Sadaiah, K., V. Narsimha, and S. Sudheer . 2013. Heterosis and combining ability studies for sugar content in sweet corn (*Zea mays saccharata* L.). *IJSRP* 3(3):1-5.
- Sahagún, C.L., J.D. Molina., G.F. Castillo, y J.C. Sahagún. 1991. Efecto de la selección masal en las varianzas genéticas de la variedad de maíz Zac. 58. *Agrociencia* 2:65-79.
- SAS, 1985. SAS/STAT User`s guide version. 5th ed. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sprague, G.F., and L.A. Tatum. 1942. General vs specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34:923-932.