

APTITUD COMBINATORIA Y COMPONENTES GENÉTICOS EN LÍNEAS DE MAÍZ

Combining ability and genetic components of inbred lines of maize.

J. Guadalupe Luna-Ortega, José Luis García-Hernández ✉, Ricardo David Valdez-Cepeda, Miguel Ángel Gallegos Robles, Pablo Preciado-Rangel, Cesar Guerrero-Guerrero, Armando Espinoza-Banda

(CGG) (AEB) (PPR) Departamento de Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad-Laguna. Torreón, Coahuila.

(RDVC) Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo.

(JGLO) (MAGR) (JLGH) Facultad de Agricultura y Zootecnia. Universidad Juárez del Estado de Durango. luis_garher@hotmail.com

Nota Científica recibido: 05 de noviembre de 2009 **aceptado:** 18 de septiembre de 2013

RESUMEN. El objetivo del trabajo fue evaluar la aptitud combinatoria general (ACG) de 24 líneas y la aptitud combinatoria específica (ACE) de las cruzas realizadas. El trabajo se realizó en dos etapas: 1) la formación de las cruzas, en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna (UAAAN-UL), y 2) la evaluación de las cruzas en dos localidades con tres ambientes en el 2007, en el campo experimental de la UAAAN-UL en los ciclos primavera y verano, y en el ejido El Niágara, municipio de Aguascalientes, en la primavera. El material genético utilizado estuvo constituido por 24 líneas endogámicas, siete del programa de la UAAAN-UL, tres del INIFAP y 14 del CIMMYT. Las cruzas se evaluaron en un diseño experimental de bloques al azar con dos repeticiones por localidad. El análisis genético se realizó con el diseño II de apareamiento de Carolina del Norte de Comstock & Robinson. Los resultados indicaron que los progenitores machos L-AN 447 (1 408 kg ha⁻¹), CML-264 (247 Kg ha⁻¹), y L-AN-388P (222 Kg ha⁻¹) tuvieron los mayores efectos de ACG. Mientras que para la ACE, los mayores efectos se observaron en las cruzas L-AN360PVxCML-311 (3,456 Kg ha⁻¹), LB-39xCML-314 (2,395 Kg ha⁻¹) y L-AN447xCML-278 (2,270 Kg ha⁻¹). Se encontró que para rendimiento la varianza aditiva fue de 0.04, superando a la varianza no aditiva que fue 0.014, la heredabilidad en sentido amplio fue 4 % y, en sentido estricto 3 % con grado de dominancia de 0.83.

Palabras clave: *Zea mays* L., cruzas simples, líneas endogámicas, probadores macho.

ABSTRACT. The purpose of this study was to evaluate the general combining ability (GCA) of 24 lines and the specific combining ability (SCA) of the obtained crosses. The study took place in two stages: 1) the formation of the crosses in the experimental field of the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna (UAAAN-UL) and 2) the evaluation of the crosses in two localities with three environments in 2007, in the experimental field of the UAAAN-UL during the Spring and Summer, and in the communal land of El Niagara, municipality of Aguascalientes, in the Spring. The genetic material used consisted of 24 inbred lines, seven from the UAAAN-UL programme, three from the INIFAP and 14 from the CIMMYT. The crosses were evaluated in a random block experimental design with two replicates per locality. The genetic analysis followed the North Carolina mating design II of Comstock & Robinson. The results indicated that the male parents L-AN 447 (1408 kg ha⁻¹), CML-264 (247 kg ha⁻¹) and L-AN-388P (222 kg ha⁻¹) recorded the greatest effects of GCA, whereas for the SCA, the greatest effects were observed in the crosses L-AN360PVxCML-311 (3,456 kg ha⁻¹), LB-39xCML-314 (2,395 kg ha⁻¹) and L-AN447xCML-278 (2,270 kg ha⁻¹). The additive variance for yield was 0.04, exceeding the non-additive variance of 0.014. The heritability in a broad sense was 4 % and in a narrow sense it was 3 %, with a degree of dominance of 0.83.

Key words: *Zea mays* L., single crosses, inbred lines, male testers.

INTRODUCCIÓN

Los programas de mejoramiento genético dedicados a la formación de híbridos y variedades comerciales de maíz, requieren generar nuevas líneas con alto potencial de rendimiento, buen compor-

tamiento agronómico y excelente aptitud combinatoria; se ha encontrado que las líneas que reúnen estas características presentan resultados satisfactorios en combinaciones híbridas (Fan *et al.* 2003). Los conceptos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE),

serven para expresar el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, y para designar las combinaciones híbridas que resultan mejor o peor de lo que se esperaría en relación con el promedio de la ACG de las dos líneas progenitoras, los cuales constituyen las herramientas de uso más frecuente para estimar efectos y varianzas de ACG y ACE (Sprague & Tatum 1942). Cuando en una población los efectos de aptitud combinatoria general son más importantes que los efectos específicos, es recomendable mejorar a la población por selección recurrente; por el contrario, si los efectos de aptitud combinatoria específica son los más importantes, la población deberá mejorarse por hibridación (Reyes *et al.* 2004). Conocer la acción génica que controla los caracteres de interés económico es básico para la planeación de un programa de mejoramiento genético. Mediante la aptitud combinatoria de los progenitores, el mejorador logra mayor eficiencia en su programa de mejoramiento, porque permite seleccionar progenitores con un comportamiento promedio aceptable en una serie de cruzamientos e identificar combinaciones específicas con un comportamiento superior a lo esperado, con base en el promedio de los progenitores que intervienen en el cruzamiento (Guillen *et al.* 2009). Se sabe que líneas autofecundadas de diferente origen permiten explotar la gran diversidad genética presente en el maíz (De León *et al.* 2006). El vigor híbrido se expresa solo en las cruzas, sin embargo, no todas las cruzas expresan el mismo nivel, por ello es importante elegir el germoplasma adecuado para la producción de híbridos; de los primeros conceptos relacionados con la explotación de este fenómeno en maíz (*Zea mays* L.) destaca el de línea pura, que ha sido el punto de partida para el estudio de la heterosis y la habilidad combinatoria general y específica donde la primera se asocia con el desempeño potencial de los progenitores y la segunda con el desempeño de los híbridos (De León *et al.* 2005).

Con la idea de identificar una alternativa que mejore el comportamiento de los híbridos, derivados del cruzamiento entre líneas endogámicas de los grupos tropical, subtropical húmedo y del trópico seco de México, se realizó un diseño genético de apareamiento entre tres grupos de líneas con el ob-

jetivo de estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de las líneas progenitoras, la aptitud combinatoria específica (ACE) y el vigor híbrido de las cruzas, así como determinar el rendimiento y sus componentes para identificar híbridos simples para la producción de grano en el norte de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Unidad Laguna, ubicado en Torreón, Coahuila y en el ejido Niágara del estado de Aguascalientes. El campo experimental de la UAAAN-UL se localiza entre los 24° 30' y 27° de latitud norte y entre los 102° y 104 ° 40' de longitud oeste, con altitud de 1120 msnm. Su clima se clasifica como muy seco con deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año y cuenta con inviernos benignos. El Ejido Niágara, se localiza en el estado de Aguascalientes, situado en la región occidental de la Altiplanicie Mexicana, en los 21° 53' de latitud norte, 102° 18' de latitud oeste y altitud de 1870 msnm. El clima es semiárido templado, con temperatura media anual de 17 °C, registrando las mayores temperaturas entre abril y junio, mientras que las más bajas ocurren entre diciembre y febrero. La precipitación pluvial es de 526 mm anuales, con lluvias abundantes en verano.

Material genético

Se utilizaron 14 líneas endogámicas provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), tres líneas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y siete líneas del programa de mejoramiento de maíz de la UAAAN-UL (Tabla 1). Las líneas identificadas con la letra "M" se usaron como líneas machos y con la letra "H" como hembras, lo que generó 144 cruzas, que se evaluaron en un diseño experimental de bloques al azar, con dos repeticiones por localidad. La parcela experimental fue de dos surcos de 2 m de largo y 0.70 m de ancho, con seis plantas por metro, para tener una población aproximada de 85 000 plantas ha⁻¹; el riego se aplicó con cintilla procurando mantener un

Tabla 1. Descripción y origen de las líneas progenitoras de híbridos simples. M = líneas machos y H = líneas hembras.
Table 1. Description and origin of the parental lines of single hybrids. M = male lines, H = female lines.

Padres	Origen	Descripción de las líneas
M1	L-AN123 R	Línea endogámica formada a partir de una variedad Criolla del Municipio de Concepción, Jalisco con precocidad y tolerancia a sequía.
M2	L-AN447	Línea de 8 autofecundaciones, derivada de generaciones avanzadas del híbrido AN-447 con características de amplia adaptabilidad.
M3	L-AN360 PV	Línea obtenida de la población enana denominada Pancho Villa, vigorosa y con hojas anchas.
M4	L-AN130	Proviene de la F4 del H-507, cruzada con la población de El Bajío de nominada Celaya-2.
M5	L-AN123	Obtenida de forma divergente y contrastada de variedad criolla de Jalisco; de hojas pálidas y onduladas.
M6	L-AN388 P	Línea enana, con hojas anchas y succulentas generada a partir de la F3 del híbrido AN-388.
M7	L B-32	La cual está identificada con la genealogía H-353-245-6-10.
M8	L B-39	Con origen de INIFAP-B39.
M9	L B-40	Con origen de formación en INIFAP-B40.
M10	CML-319	CIMMYT, RecyW89(Cr.Arg/CIM.ShPINPH)6-3-2-4BB.
M11	CML-264	Pob21 CIMMYT, POB21C5F219-3-1-B- -8-1-3-BBB-f.
M12	CML-316	CIMMYT, Pob500P500c0F114-1-1-B*3.
H13	CML-254	Pob21 CIMMYT, TUXSEQ-149-2-BBB-__-1-BB-F.
H14	CML-313	CIMMYT, Pob501c0F6-3-3-2-1-B-B.
H15	CML-273	Pob43 CIMMYT, (ACT643*43F7)-2-3-2-1-bb-F.
H16	CML-247	Pool24 CIMMYT, (G24F119*G24F54)-6-4-1-1-BB-f.
H17	CML-271	Pob29 CIMMYT, pob29stec1hc25-6-4-1-BBB-F.
H18	CML-311	CIMMYT, Pob500S89500 F2-2-2-2-B*5.
H19	CML-278	Pob43 CIMMYT, DMANTES8043-53-1-1-b-1-BB-f.
H20	CML-315	CIMMYT, Pob500P500c0F246-4-1-2-2-B*3.
H21	CML-318	Recy W87[B810(66)S3/G24S2]-B-8-1-1-3-B*4.
H22	CML-321	Pop 502 P502c0F1-1-3-1-B*4.
H23	CML-314	Pop 600P600COF14-2-1-2-B*4.
H24	Banda L-59	Pob59.

buen nivel de humedad durante el ciclo del cultivo en las dos localidades. Las variables evaluadas fueron: rendimiento de grano (RG), días a flor masculina (FM), número de granos por hilera (GHI), peso de mil granos (PMG), número de hileras (NOHI), longitud de mazorca (LMZ), diámetro de mazorca (DMZ), y altura de mazorca (AMZ). A las variables se les realizó el análisis genético con el diseño II de apareamiento de Carolina del Norte de Comstock & Robinson (1948), con el modelo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu + M_i + H_j + MH_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde, $i=1,2,\dots$ M (machos); $j= 1,2,\dots$ H (hembras); $k= 1,2,\dots r$ (rep); Y_{ijk} =observación de la craza entre el i -ésimo macho y la j -ésima hembra en la k -ésima repetición; μ =Media general; M_i y H_j =efecto del i -ésimo macho y j -ésima hembra; MH_{ij} =efecto de la interacción del i -ésimo macho

con la j -ésima hembra; ϵ_{ijk} =error experimental. La estimación de los efectos de ACG para los machos y hembras, y aptitud combinatoria específica (ACE) para las cruzas, se realizó de acuerdo con Sprague & Tatum (1942).

$$g_i = Y_{i..} - Y_{..}$$

$$g_j = Y_{.j} - Y_{..}$$

$$S_{ij} = Y_{ij} - g_i - g_j - Y_{..}$$

Donde: g_i , g_j y S_{ij} son los efectos de ACG y ACE, respectivamente para los i -machos, las j -hembras y sus ij cruzas; $Y_{i.}$ y $Y_{.j}$ son las medias de los machos y las hembras respectivamente, Y_{ij} es el valor de la craza del macho i x hembra j y $Y_{..}$ es la media de todas las i x j cruzas.

Table 2. Cuadrados medios del análisis de varianza del diseño II de Carolina del Norte en tres ambientes: dos localidades en UAAAN-UL Torreón, Coahuila y una en Aguascalientes, Aguascalientes.
Table 2. Analysis of variance mean squares of the North Carolina design II in three environments: two localities in UAAAA-UL Torreón, Coahuila and one in Aguascalientes, Aguascalientes.

F VGL	RG Kg ha ⁻¹	FM (d)	GHI	PMG (g)	NOHI	LMZ (cm)	DMZ (cm)	AMZ (m)
L 2	7.82 **	0.056	1708.4 **	1.659 **	131.7 **	0.104 **	0.103 **	1.12 **
R(L) ²	0.089 **	2.71	13.29	0.004	5.86 **	0.0030*	0.0009 **	0.417 **
T 143	0.015 **	33.92 **	30.69 **	0.0051 **	3.81 **	0.0017 **	0.0003 **	0.111 **
M 11	0.040 **	80.74 **	125.93 **	0.0165 **	18.53 **	0.0063 **	0.0005 **	0.596 **
H 11	0.012	24.88 **	43.59*	0.0084 **	7.05 **	0.0016	0.0005 **	0.115 **
M 121	0.0139	30.36 **	20.86	0.0038 **	2.14 **	0.0013	0.0002	0.068 **
x								
H								
Er- 143	0.0125	1.87	21.13	0.0026	1.17	0.0012	0.0002	0.03
ror								
Me- dia	10987	77.38	37.45	0.252	14.86	17	4.4	1.33
C.V. %	25.08	1.76	12.27	20.25	7.27	20.4	10.8	13.77

FM= Fuentes de variación, GL = Grados de libertad, RG= Rendimiento de grano, FM = Flor masculina, GHI = Granos por hilera, PMG = Peso de mil granos, NOHI = Número de hileras, LMZ = longitud de mazorca, DMZ = Diámetro de la mazorca, AMZ = Altura de mazorca, CV = Coeficiente de variación, * = p < 0.05, ** = p < 0.01

Table 3. Rendimiento y sus componentes de las líneas machos y hembras, en promedio de cruza simples en tres ambientes.

Table 3. Yield and its components of the male and female lines, on average of single crosses in three environments.

Padres	RG Kg ha ⁻¹	FM (d)	GHI	PMG (g)	NOHI	LMZ (cm)	DMZ (cm)	AMZ (m)
M1	11135	75.3	38.23	237	15.19	17	4.4	1.21
M2	12395	78.2	39.32	264	15.02	17.6	4.6	1.44
M3	9802	76.4	36.16	232	15.51	16.2	4.4	1.24
M4	10716	77	37.53	254	14.4	26.5*	4.4	1.34
M5	10740	76.6	39.59	233	15.02	18.3	4.2	1.3
M6	11209	78.1	37.05	248	15.52	17	4.4	1.21
M7	10938	76.9	35.72	269	14.68	16.1	4.4	1.46
M8	10839	78.8	38.34	234	14.85	16.4	4.4	1.37
M9	10888	76.9	37.88	254	14.49	18.7	4.3	1.44
M10	11185	77.4	37.37	270	13.8	18	4.3	1.26
M11	11234	79	36.88	271	14.44	17.2	4.6	1.3
M12	10888	77.5	35.34	261	14.4	15.6	4.4	1.4
H13	10493	77.2	36.09	243	14.25	16.6	4.3	1.31
H14	11382	77.6	38.29	275	14.87	17.6	4.5	1.28
H15	11407	78	37.52	269	14.84	17	4.5	1.35
H16	10641	77.7	37.82	246	14.62	17.7	4.4	1.35
H17	10864	77.6	36.86	250	15.06	16.5	4.4	1.34
H18	10913	76.5	37.91	239	14.95	17.6	4.4	1.31
H19	10790	78.2	38.81	246	14.66	16.5	4.4	1.38
H20	10814	76.8	37.6	248	14.89	16.9	4.3	1.38
H21	11209	76.4	37.81	247	14.88	17.2	4.4	1.37
H22	11456	77.6	37.48	260	14.75	17.5	4.4	1.33
H23	10814	76.3	36.7	249	14.93	16.7	4.4	1.25
H24	11160	77.2	36.53	256	15.6	16.6	4.6	1.31
DMS(0.05)	1565	3	1.5	16	0.35	1.1	0.3	0.06

RG = Rendimiento de grano, FM = Flor masculina, GHI = Granos por hilera, PMG = Peso de mil granos, NOHI = Número de hileras, LMZ = longitud de mazorca, DMZ = Diámetro de la mazorca, AMZ = Altura de mazorca). * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$

Table 4. Promedio de 15 cruzas con mayor rendimiento de grano y ocho variables generadas por el diseño II de Carolina del Norte en tres ambientes.

Table 4. Average of 15 crosses with greater grain yields and eight variables generated by the North Carolina design II in three environments.

Cruza	RG Kg ha ⁻¹	FM (d)	GHI	PMG (g)	NOHI	LMZ (cm)	DMZ (cm)	AMZ (M)
2 x 19	14 493	79	44.4	290	14.8	18.5	4.6	1.63
2 x 14	13 851	80	40.3	300	14	19.1	4.8	1.23
2 x 17	13 037	79	38.1	258	15.2	18	4.6	1.48
3 x 18	13 209	78	36.8	226	15.2	16.3	4.3	1.28
2 x 20	12 765	79	40.6	263	14.3	17.8	4.5	1.37
6 x 17	12 518	80	38.8	286	16.2	17.8	4.6	1.26
5 x 18	12 345	78	41	208	15	17	4	1.36
7 x 14	12 419	80	36.9	331	14.9	14.6	4	1.54
7 x 24	12 345	80	36.2	291	15.7	16.5	4.8	1.36
7 x 17	12 296	80	34.9	286	15	15.8	4.5	1.6
9 x 24	13 481	79	35.9	310	15.3	17.1	4.8	1.39
9 x 14	12 864	78	38.9	271	15.4	19.1	4.5	1.36
8 x 23	12 814	76	37.7	266	14.9	16.5	4.6	1.33
10 x 15	12 419	81	40.2	301	13.7	18.5	4.8	1.36
11 x 22	12 592	82	31.7	298	14.5	18.3	4.6	1.4
DMS(0.05)	1 565	3	1.5	16	0.35	1.1	0.3	0.06

RG = Rendimiento de grano, FM = Flor masculina, GHI = Granos por hilera, PMG = Peso de mil granos, NOHI= Número de hileras, LMZ = longitud de mazorca, DMZ = Diámetro de la mazorca, AMZ = Altura de mazorca). * = p < 0.05, ** = p < 0.01

Table 5. Valores estimados de aptitud combinatoria general (ACG) de las líneas machos y hembras en tres ambientes.
Table 5. Estimated values of the general combining ability (GCA) of the male and female lines in three environments.

Padres	RG	FM	GHI	PMG	NOHI	LMZ	DMZ	AMZ
M1	148	-2.08	0.78	-0.015	0.33	0	0	-0.12
M2	1 408	0.82	1.87	0.012	0.16	0.006	0.002	0.11
M3	-1 185	-0.98	-1.29	-0.02	0.65	-0.008	0	-0.09
M4	-271	-0.38	0.08	0.002	-0.46	-0.005	0	0.01
M5	-247	-0.78	2.14	-0.019	0.16	0.013	-0.002	-0.03
M6	222	0.72	-0.4	-0.004	0.66	0	0	-0.12
M7	-49	-0.48	-1.73	0.017	-0.18	-0.009	0	0.13
M8	-148	1.42	0.89	-0.018	-0.01	-0.006	0	0.04
M9	-99	-0.48	0.43	0.002	-0.37	0.017	-0.001	0.11
M10	198	0.02	-0.08	0.018	-1.06	0.01	-0.001	-0.07
M11	247	1.62	-0.57	0.019	-0.42	0.002	0.002	-0.03
M12	-99	0.12	-2.11	0.009	0.54	-0.014	0	0.07
H13	-494	-0.18	-1.36	-0.009	-0.61	-0.004	-0.001	-0.02
H14	395	0.22	0.84	0.023	0.01	0.006	0.001	-0.05
H15	420	0.62	0.07	0.017	-0.02	0	0.001	0.02
H16	-346	0.32	0.37	-0.006	-0.24	0.007	0	0.02
H17	-123	0.22	-0.59	-0.002	0.21	-0.005	0	0.01
H18	-74	-0.88	0.46	-0.013	0.09	0.006	0	-0.02
H19	-197	0.82	1.36	-0.006	-0.2	-0.005	0	0.05
H20	-173	-0.58	0.15	-0.004	0.03	-0.001	-0.001	0.05
H21	222	-0.98	0.36	-0.005	0.02	0.002	0	0.04
H22	469	0.22	0.03	0.008	-0.11	0.005	0	0
H23	-173	-1.08	-0.75	-0.003	0.07	-0.003	0	-0.08
H24	173	-0.18	-0.92	0.004	0.74	-0.004	0.002	-0.02
DMS	1 565	3	1.5	16	0.35	1.1	0.3	0.06

Rendimiento de grano, FM = Flor masculina, GHI = Granos por hilera, PMG = Peso de mil granos, NOHI = Número de hileras, LMZ = longitud de mazorca, DMZ = Diámetro de la mazorca, AMZ = Altura de mazorca). * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$

A partir de los cuadrados medios y las esperanzas, se estimó la varianza génica aditiva $\sqrt{A^2}$, de dominancia $\sqrt{D^2}$, fenotípica $\sqrt{F^2}$, grado de dominancia (d) y heredabilidad en sentido estricto (h). Los procedimientos se desarrollaron mediante el sistema para análisis estadístico (SAS, 2001).

RESULTADOS

Los resultados del análisis de varianza (Tabla 2), presentan diferencias estadísticas para localidades ($p < 0.01$) en todas las variables evaluadas, excepto para FM. Para la fuente de variación repeticiones dentro de localidades, las variables RG, NOHI, LMZ, DMZ y AMZ fueron altamente significativas ($p < 0.01$) para la fuente de variación tratamientos (T) todas las variables fueron significativas $p < 0.01$ lo que sugiere que existen diferencias genéticas entre las 144 cruzas evaluadas, lo que puede deberse a diferencias entre los progenitores utilizados. Para la fuente de variación machos (M) en todas las variables se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$), mientras que para las hembras (H) solo las variables RG y LMZ no tuvieron efectos significativos. La interacción de machos por hembras (M x H) tuvo efectos significativos ($p < 0.01$) sólo en las variables FM, PMG, NOHI y AMZ.

Para el rendimiento de grano y sus componentes en los progenitores, machos M2 y M11 tuvieron el mayor rendimiento de grano con 12 395 y 11 334 kg ha⁻¹, respectivamente; pero fueron estadísticamente iguales a los machos M6, M7, M8, M9 y M10 (Tabla 3). Para FM masculina los progenitores más precoces fueron los machos M1 y M3 con 75.3 y 76.4 d, mientras que los más tardíos fueron los machos M2 y M11, los cuales tuvieron el mayor RG. Respecto a las hembras, sobresalen la H15 y la H22, las cuales tuvieron R6 de 10 493 y 11 456 kg ha⁻¹; es probable que las combinaciones de los machos influyera en el comportamiento de las cruzas, ya que la similitud en el rendimiento de las líneas hembras quizás se deba a que 13 tienen el mismo origen (CIMMYT). Las hembras H21 y H23 fueron las más precoces con 76.4 y 76.3 RN. El mayor GHI lo tuvieron los machos M1, M2, M5 y M9, y las hembras H14, H19 y H18; es de resaltar que tres de los machos (M2, M5 y M11) también tuvieron la LMZ más larga. Para la variable PMG los machos y hembras que tuvieron los valores más altos y significativos fueron el M2, M7, M10, M11, M12, H14, H15 y H22. En NOHI sobresalen los machos M1, M3 y M6 con 15.1, 15.5 y 15.5 hileras y las hembras H17 y H24 con valores de 15.0 y 15.6 hileras, respectivamente. En DMZ tanto de machos como hembras fueron muy similares estadísticamente, con un valor mínimo de 4.2 cm en M5 y un máximo de 4.6 cm en M2 y M11, para

hembras el valor mínimo fue de 4.3 cm en H13 y H20, y el máximo de 4.6 cm en H24. Los machos fueron diferentes en cuanto a la AMZ que fue de 1.21 m a 1.46 m, sobresaliendo los machos M2, M7, M9 y M12 con la mayor altura; mientras que las hembras mostraron menor variación.

Los promedios de RG y siete características de las mejores 15 cruzas se pueden observar en la Tabla 4, donde las cruzas más sobresalientes en RG fluctuaron entre 12 296 y 14 493 kg ha⁻¹, siendo las cruzas 2 x 19, 2 x 14, 9 x 24, 3 x 18 y 2 x 17 que tuvieron el mayor RG; sobresale la craza 2 x 19 que tuvo valores aceptables de GHI (44.4), LMZ (18.5 cm), DMZ (4.6 cm), con la mayor AMZ (1.6 m), además de la craza 2 x 14 que tuvo GHI (40.3), LMZ (19.1 cm) y DMZ (4.8 cm). Los valores del RG de las mejores cruzas mostraron un promedio de 12 897 kg ha⁻¹. Para GHI y NOHI la variación fue de 31.6 a 44.4 granos por hilera y de 13.7 a 16.2 hileras por mazorca, respectivamente. Para LMZ los valores fueron de 14.6 a 19.1 cm, donde las cruzas 2 x 4 y 9 x 14 presentan la mazorca con mayor longitud con 19.1 cm, pero fueron estadísticamente igual a la mazorca de las cruzas 2 x 19, 10 x 15 y 11 x 22. En DMZ se presentaron valores de 4.0 a 4.8 cm, con la excepción de las cruzas 3 x 18 y 5 x 18, todas las cruzas fueron estadísticamente iguales. Para la variable AMZ las variaciones oscilaron de 1.2 hasta 1.6 m donde las cruzas 2 x 19 y 7 x 17 fueron significativamente iguales y superiores al resto; mientras que las cruzas 2 x 14, 3 x 18, y 6 x 17 fueron las de menor AMZ con 1.2, 1.2 y 1.2 m, respectivamente. Los mayores efectos de aptitud combinatoria general para la característica de RG se encontraron en las líneas macho M2 y M11 (Tabla 5), donde se observa que para M2, influyen en el rendimiento la FM, GHI, PMG y DMZ, en tanto que en el M11 el rendimiento está determinado por la FM, PMG y el DMZ. Las líneas hembras H14, H15 y H22 presentaron los mayores valores de ACG para RG. Observándose que las hembras H14 y H15 deben su potencial de rendimiento al PMG. Los valores de aptitud combinatoria específica para las 15 cruzas más sobresalientes en RG se muestran en la Tabla 6, donde las cruzas 3 x 18, 9 x 24, 2 x 19, 8 x 23, 10 x 15 y 11 x 22 presentan efectos significativos y positivos de ACE; con excepción de las cruzas 2 x 19 y 11 x 22 el resto de las cruzas resultan de dos progenitores con efectos negativos de ACG, lo cual no se esperaba. Lo anterior, puede deberse a la suma de los efectos aditivos de los genes de las líneas progenitoras, o a un efecto alto positivo de ACE. En la craza 2 x 19 el potencial de rendimiento está influenciado por los valores altos positivos y significativos de ACE para GHI, PMG y LMZ.

Table 6. Aptitud combinatoria específica (ACE) de cruzas simples de maíz.
Table 6. Specific combining ability (SCA) of single crosses of maize.

M X H	RG	FM	GHI	PMG	NOHI	LMZ	DMZ	AMZ
3 x 18	3.456*	2*	0.2	0.001	-0.44	-0.008	0	1.37
8 x 23	2.395*	2*	-1.03	0.052	1.1*	-0.013	-0.01	1.28
2 x 19	2.270*	0	3.76*	0.032*	-0.05	0.009*	-0.01	1.52*
9 x 24	2.123*	-2	0.12	0.029	0.02	-0.001	0	1.29
11 x 22	1.827*	-1	-0.73	0.033	0.12	0.005	0	1.34
10 x 15	1.802*	0	2.32*	0.052*	0.19*	0.015*	0	1.32
2 x 20	1.654	2*	0.94	-0.02	-0.12	-0.019	-0	1.39*
9 x 14	1.556	1	0.93	0.22	-0.48	-0.003	0	1.25
7 x 17	1.457	2*	1.62*	0.025*	0.08	1E - 04	0	1.41*
5 x 18	1.456	3*	-0.19	0.003	0.1	-0.006	0	1.47*
6 x 17	1.407	2	2.37*	0.034*	0.48*	0.005*	0	1.38
7 x 14	1.357	0	-0.43	0.027	0.62*	0.004*	0	1.46*
2 x 14	1.26	-2	0.78	0.007	0.1	0.001	0	1.25
7 x 24	1.209	2*	1.35	0.017	1.23*	0.003*	-0.01	1.23
2 x 17	1.061	3*	1.56*	0.019	0.17	-0.001	0	1.3
DMS	1.565	3	1.5	16	0.35	1.1	0.3	0.06

Rendimiento de grano, FM= Flor masculina, GHI= Granos por hilera, PMG = Peso de mil granos, NOHI= Número de hileras, LMZ = longitud de mazorca, DMZ = Diámetro de la mazorca, AMZ = Altura de mazorca). * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$

Table 7. Valores estimados de los principales parámetros genéticos de ocho variables de maíz.
Table 7. Estimated values of the main genetic parameters of eight maize variables.

Carácter	$\sqrt{A^2}$	$\sqrt{D^2}$	$\sqrt{F^2}$	$\sqrt{G^2}$	D	H ²	h ²	Media
RG (kg/ha)	0.04	0.014	01.33	0.054	0.8	4	3	10987
FM (días)	80.74	30.36	10.2	111.1	0.9	1	71	77.38
GHI	125.9	20.86	289	146.7	0.6	50.7	44	37.45
PMG (g)	0.02	0.003	0.28	0.019	0.6	6.8	5.7	252
NOHI	18.53	2.14	23.9	20.67	0.5	86.4	78	14.86
LMZ (cm)	0.01	0.001	0.02	0.0073	0.7	42.9	35	17
DMZ (cm)	0.0001	0.0002	0.02	0.0003	1.5	1.7	0.6	4.4
AMZ (m)	8.74	0.07	10.2	0.664	0.5	204	85	1.33

En la Tabla 7, se observa que la varianza aditiva $\sqrt{A^2}$ fue de 3 y 4 veces superior que la varianza de dominancia $\sqrt{D^2}$; el grado de dominancia (d) presentó valores menores a la unidad, en todas las variables, con excepción del DMZ, lo que indica expresión de sobre-dominancia y de efectos heteróticos. El valor de heredabilidad (h²) para RG, PMG y DMZ fue de 3.0, 5.7 y 0.5, respectivamente, los cuales resultaron relativamente bajos como en la mayoría de los caracteres de herencia múltiple. Las características que presentan los valores más altos de heredabilidad (h²) fueron, GHI, NOHI, LMZ y AMZ con valores de, 43.5, 77.5, 35.2 y 85.4 %, respectivamente; lo que indica que están estrechamente asociados con el rendimiento, lo cual se considera alto ya que son caracteres que están controlados por varios

pares de genes, excepto para AMZ cuyo valor parece lógico al ser más de carácter cualitativo.

DISCUSIÓN

Las diferencias estadísticas de las variables en el análisis de varianza se deben a lo contrastante de los ambientes de prueba y a la diversidad de material genético utilizado, como lo indican Antuna *et al.* (2003) y De la Cruz *et al.* (2003). Asimismo, los resultados encontrados en este trabajo coinciden con los resultados de Coutiño-Estrada & Vidal-Martínez (2006) quienes evaluaron el rendimiento y humedad de grano de 40 híbridos en 22 ambientes de la faja maicera de los Estados Unidos y determinaron que el principal componente

de la variación fenotípica fue atribuible a diferencias entre localidades. Estos resultados también resaltan el diferente comportamiento de los progenitores utilizados en el presente trabajo tanto machos como hembras, excepto para las variables rendimiento de grano y longitud de mazorca, sin embargo las cruzas tuvieron el mismo comportamiento en las diferentes localidades evaluadas. Respecto a los coeficientes de variación, se consideran dentro de los rangos aceptables por ser evaluados en tres ambientes, ya que reflejan la medida de precisión en la conducción de los experimentos, además, de acuerdo con Singh & Chaudhry (1997), 10 % o menos de coeficiente de variación es deseable para la selección de variables en el mejoramiento de poblaciones. En trabajos realizados con maíz para rendimiento de grano, se han reportado coeficientes de variación desde 25.0 hasta 7.2 % (Ruiz-Ramírez 2010) para el resto de los componentes del rendimiento, valores que se consideran aceptables para experimentos agrícolas (Falconer 1985). De acuerdo con el alto coeficiente de variación, se considera que existe variación entre los valores de cada característica evaluada, por lo que algunos componentes de rendimiento influyeron en los resultados más que otros, considerando que al conjuntarse por recombinación y selección en líneas contrastantes podrían resultar patrones heteróticos definidos, como ocurrió con la línea M2 y las líneas H19 y H14 de germoplasma contrastante proveniente de la UAAAN-UL y el CIMMYT, estos efectos también pueden deberse a que un mismo grupo de genes no controlan todas las respuestas de heterosis como lo señalan

Springer & Stupar (2007) o factores hereditarios, como la aditividad, la dominancia, la sobredominancia y la epistásis como lo señalan Lippman & Zamir (2007). Es probable que machos y hembras con baja ACG produzcan cruzas sobresalientes, al respecto Palemón et al. (2012) encontraron que líneas con buenos efectos de ACG al cruzarse con líneas de bajos efectos de ACG produjeron buenos híbridos, lo que se puede deber al efecto de dominancia, sobre esto mismo De la Cruz et al. (2003) encontraron que en las mejores cruzas participaron padres con bajos efectos de ACG. Las líneas macho M2, M6 y M11 y las hembras H14, H15 y H22 presentaron valores altos y positivos de ACG; mientras que la ACE fue alta y positiva para las cruzas 3 x 18, 8 x 23, 2 x 19, 9 x 24 y 11 x 22, donde las variables RG, PMG y AMZ influyeron para el rendimiento de grano. La varianza genética aditiva resultó con valores más altos que la varianza no aditiva para todas las variables evaluadas, excepto para el diámetro de la mazorca. Con base en las 15 cruzas superiores, todas las variables evaluadas RG, FM, GHI, PMG, NOHI, LMZ, DMZ y AMZ, serán de utilidad para producir buenos híbridos.

AGRADECIMIENTOS

Al Lic. Juan Manuel Castañeda Muñoz y al Sr. Leonel Quezada, de la Fundación PRODUCE Aguascalientes, A.C., por su valioso apoyo en la realización del trabajo. Se agradece también al M.C. Miguel Ángel Perales de la Cruz por su valiosa intervención técnica.

LITERATURA CITADA

- Antuna- Grijalva O, Sánchez FR, Gutiérrez-Del Rio E, Torres NR, García LB (2003) Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26 (1): 11-17.
- Comstock RE, Robinson HF (1948) The components of genetic variance in populations of biparental and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics* 4: 254-266.
- Coutiño-Estrada B, Vidal-Martínez VA (2006) Componentes de varianza de híbridos de maíz evaluados en la faja maicera de los Estados Unidos. *Agrociencia* 40: 89-98
- De la Cruz LE, Gutiérrez DE, Palomo GA, Rodríguez HS (2003) Aptitud combinatoria y Heterosis de líneas de maíz en la comarca lagunera. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26(4): 279-284.
- De León CH, Rincón-Sánchez F, Reyes-Valdez HM, Sámano-Garduño D, Martínez-Zambrano G, Cavazos-Cadena R, Figueroa-Cárdenas JD (2005) Potencial de rendimiento y estabilidad de combinaciones germoplásmicas formadas entre grupos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28(2): 135-143.
- De León CH, De la Rosa-Loera A, Rincón Sánchez F, Martínez-Zambrano G (2006) Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados a el bajío mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(3): 247-254.
- Falconer DS (1985) *Introducción a la Genética Cuantitativa*. CECSA. México. 135 p.
- Fan XM, Tan J, Chen M, Yang YJ, Yang HJ (2003) Heterotic grouping for tropical and temperate maize inbreds by analyzing combining ability and SSR markers. *Maydica* 48: 251-257.

- Guillen DCP, De la Cruz LE, Castañón-Nájera G, Osorio-Osorio R, Brito-Manzano NP, Lozano-Del Río A, López-Noverola U (2009) Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 101-107.
- Lippman ZB, Zamir D (2007) Heterosis: revisiting the magic. *Trends in Genetics* 23: 60-66.
- Palemón AF, Gómez MNO, Castillo GF, Ramírez VP, Molina GJD, Miranda CS (2012) Potencial productivo de cruza intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3 (1): 157-171.
- Reyes LD, Molina GJD, Oropeza RMA, Moreno PEC (2004) Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza tuxpeño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27 (1): 49-56.
- Ruiz-Ramírez J (2010) Eficiencia relativa y calidad de los experimentos de Fertilización en el cultivo de caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 28: 149-154
- Singh RK Chaudhary BD (1997) *Biometrical methods in quantitative genetic analysis*. Kalyani Publication, New Delhi, India.
- Sprague GF, Tatum LA (1942) General versus specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of American Society of Agronomy* 34: 923-932
- Springer NM, Stupar RM (2007) Allelic variation and heterosis in maize: How do two halves make more than a whole? *Genome Research* 17: 264-275
- SAS. 2001. *SAS/STAT User's Guide*. Release 8.1. SAS. Inst. Inc., Cary, NC, USA.