

APTITUD COMBINATORIA Y HETEROSIS DE LÍNEAS DE MAÍZ EN LA COMARCA LAGUNERA

COMBINING ABILITY AND HETEROSIS OF MAIZE INBRED LINES AT THE COMARCA LAGUNERA

Efraín de la Cruz Lázaro^{1*}, Emiliano Gutiérrez del Río², Arturo Palomo Gil² y Sergio Rodríguez Herrera¹

¹ Programa de Postgrado en Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN). Dom. Conocido, Buenavista. C.P. 25315. Saltillo, Coah., México. Correo electrónico eclazaro@hotmail.com ²Departamento de Fitomejoramiento, UAAAN- Unidad Laguna. Carr. A Santa Fe y Peri-férico, C.P. 27000. Torreón, Coah., México.

* Autor responsable

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la Comarca Lagunera en 1999, en las localidades de San Pedro y Torreón Coah., México. El objetivo fue estimar la aptitud combinatoria general (ACG) y la aptitud combinatoria específica (ACE) para rendimiento de grano (REND), días a floración (DF), altura de planta (AP) e índice de cosecha (IC) de seis líneas del programa de mejoramiento genético de maíz de la Universidad Antonio Narro – Unidad Laguna. Las líneas fueron: L-AN-123R (P₁), L-AN-447 (P₂), L-AN-360PV (P₃), L-AN-130 (P₄), L-AN-123 (P₅) y L-AN-388R (P₆). Para estimar los efectos de ACG y ACE se empleó el método 2 de efectos fijos del dialélico de Griffing (1956), con el diseño experimental de bloques completos al azar y dos repeticiones por localidad. Los resultados del análisis combinado indicaron diferencias entre localidades y genotipos. El análisis dialélico indicó alta significancia para ACE en cada una de las variables evaluadas; en cambio, para ACG no se encontró significancia para ninguna variable. Las cruzas con alta ACE fueron P₂xP₅, P₂xP₃, P₃xP₄ y P₃xP₆. Se encontraron efectos positivos de heterosis, tanto con respecto a la media de progenitores como con el progenitor superior.

Palabras clave: *Zea mays* L., líneas autofecundadas, cruzas dialélicas, aptitud combinatoria, heterosis, híbridos.

SUMMARY

This work was carried out at the locations San Pedro and Torreón, Coah., México. The objective was to estimate the general combining ability (GCA) an specific combining ability (SCA) for grain yield (GY), flowering days (FD), plant height (PH) and harvest index (HI), of six inbred lines of the Universidad Antonio Narro – Unidad Laguna corn breeding program. The inbred lines were: L-AN-123R (P₁), L-AN-447 (P₂), L-AN-360PV (P₃), L-AN-130 (P₄), L-AN-123 (P₅) and L-AN-388R (P₆). The Griffing method 2 design was utilized to estimate the GCA and SCA effects, on a complete randomized block design with two replications, at each location. The combined analysis showed significant differences among locations and genotypes. The diallel analysis indicated significant effects for SCA for each of the evaluated variables. The GCA was not significant for any of the evaluated variables. The crosses P₂xP₅, P₂xP₃, P₃xP₄ and

P₃xP₆ showed the highest SCA. Both mid and high parent positive heterosis were observed.

Index words: *Zea mays* L., inbred lines, diallel crosses, combining ability, heterosis, hybrids.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético del maíz (*Zea mays* L.) es un proceso continuo a través de la formación de híbridos y variedades para uso comercial. El conocimiento de la acción génica que controla los caracteres de interés económico, es básico para la planeación de un programa de mejoramiento genético. Los diseños dialélicos permiten conocer la acción génica de caracteres cuantitativos y seleccionar los mejores progenitores y las combinaciones superiores.

Según Márquez (1988), el término aptitud combinatoria significa la capacidad que tiene un individuo o una población, de combinarse con otros, medida por medio de su progenie. Sin embargo, la aptitud combinatoria debe determinarse no sólo en un individuo de la población sino en varios, a fin de poder seleccionar aquéllos que exhiban la más alta aptitud combinatoria. Existen varios diseños de análisis dialélico para estimar la aptitud combinatoria general (ACG) y la aptitud combinatoria específica (ACE), pero el más utilizado es el de Griffing (1956) en sus cuatro métodos: 1) Progenitores y sus cruzas F₁ directas y recíprocas; 2) Progenitores y cruzas F₁ directas; 3) Cruzas F₁ directas y recíprocas; y 4) Cruzas F₁ directas. Singh y Stoskopf (1971) describieron la técnica estadística para el análisis combinado del diseño dialélico de Griffing. Sprague y Tatum (1942) establecieron los conceptos de ACG y ACE; el primero designa el comportamiento

promedio de una línea a través de sus cruzamientos con un conjunto de líneas diferentes, y el segundo, designa la desviación que presenta la progenie de una cruce con respecto al promedio de la ACG de sus progenitores.

Jugenheimer (1990) señala que la heterosis se manifiesta principalmente en las plantas de la generación F_1 provenientes de semilla. El vigor, el rendimiento y la mayoría de los caracteres de importancia económica del maíz son de naturaleza cuantitativa y están controlados por un alto número de genes cuyos efectos pueden diferir ampliamente. La acción génica puede ser aditiva, no aditiva o ambas. El grado de dominancia, la epistasis y las interacciones genético-ambientales se suman a la complejidad del fenómeno de la heterosis. Gómez y Valdivia (1988) consideran que para obtener mejor respuesta heterótica, sería conveniente combinar germoplasma proveniente de diferentes áreas de adaptación para dar oportunidad de explotar al máximo la heterosis. Puertas (1992) señala que el cruzamiento entre líneas endogámicas produce híbridos con caracteres superiores a los de las líneas progenitoras y a las poblaciones iniciales de donde se obtuvieron tales líneas. El objetivo del presente trabajo fue estimar los efectos de aptitud combinatoria general de seis líneas endogámicas y la aptitud combinatoria específica de sus 15 cruces simples.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se efectuó en 1999, en la región de la Comarca Lagunera, que comprende parte de los estados de Coahuila y Durango, localizada geográficamente entre los paralelos $24^{\circ} 30'$ y 27° de LN y los $102^{\circ} 40'$ LW, a una altitud de 1200 m, con temperatura media anual de 21°C y precipitación media anual de 220 mm.

El material genético utilizado estuvo constituido por seis líneas sobresalientes del programa de mejoramiento genético de maíz de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro"-Unidad Laguna (UAAAN-UL), las cuales fueron: L-AN-123R (P_1), con alto nivel de endogamia, derivada de una variedad criolla de la región de los Altos, Jalisco, precoz, temporalera y tolerante a sequía; L-AN-447 (P_2), derivada de generaciones avanzadas del híbrido 447, con características de amplia adaptabilidad; L-AN-360PV (P_3), obtenida por selección de la población enana Pancho Villa, con alto vigor y hojas anchas; L-AN-130(P_4), derivada de la cruce de la población H-507 F_4 del trópico húmedo con la población Celaya-2 del Bajío, cuyo tallo es delgado y lignificado y es resistente al acame; L-AN-123(P_5) es una línea derivada de la misma población donde se originó la L-AN-123R, con hojas onduladas, cortas y pálidas; L-AN-388R(P_6), generada a partir de la generación F_3 del híbrido AN-388, cuyas hojas son anchas y

suculentas. Las líneas P_1 y P_5 son de ocho autofecundaciones y comparten germoplasma del mismo origen; de la misma manera, P_2 y P_6 se derivaron de compuestos heterogéneos que contenían en su composición una línea enana en común, y tienen siete autofecundaciones; las líneas P_3 y P_4 tienen ocho autofecundaciones pero no presentan relación alguna de parentesco.

En la formación de las cruces dialélicas se utilizaron en los progenitores femeninos cuando menos cinco plantas por cada una de las cruces realizadas. Las 15 cruces dialélicas, más las seis líneas progenitoras se evaluaron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en dos localidades: Torreón, Coah. (UAAAN-UL) con clima semiárido, precipitación pluvial por debajo de 300 mm, suelo salino y duro con menos de 2 % de materia orgánica, y San Pedro, Coah. (Rancho El Retiro), que es caluroso, semiárido, con precipitación anual de 250 mm, suelo profundo no muy salino y con 3 % de materia orgánica. La siembra se realizó los días 18 y 21 de agosto, respectivamente. En ambas localidades se fertilizó con la fórmula 120N-60P-00K. El control de malezas se realizó manualmente. Se aplicó un riego de presiembra, más tres de auxilio a los 30, 60 y 90 d después de la siembra.

La parcela experimental total constó de cuatro surcos de 3 m de largo y 75 cm de ancho, con una distancia de 25 cm entre matas de una sola planta, para obtener una densidad de 53 500 plantas/ha. La parcela útil constó de los dos surcos centrales de 2.75 m de longitud, con 12 plantas cada uno. La cosecha de la parcela útil se hizo a los 125 días después de la siembra, cuando la semilla tenía aproximadamente 16.5 % de humedad; el peso de la semilla se ajustó a 15.5 % de humedad. Posteriormente, el rendimiento por parcela se transformó a kg ha^{-1} .

En las dos localidades se evaluaron las siguientes variables:

Días a floración (DF). Número de días transcurridos desde la siembra, cuando 50 % de las plantas de cada parcela estaban en antesis.

Altura de planta (AP). Distancia en metros de la superficie del suelo al punto superior de la espiga.

Rendimiento (REND). Se cosechó a los 125 días después de la siembra, cuando la semilla tenía aproximadamente 16.5 % de humedad, en los dos surcos centrales, sin incluir las cuatro plantas orilleras. Las mazorcas se desgranaron, se pesó la semilla (kg/parcela) y se ajustó a 15.5 % de humedad. Para corregir por el número de fallas se utilizó la fórmula de Iowa (Mejía y Molina, 1999):

$$P_{cf} = P_c \times \frac{H - 0.3M}{H - M}$$

donde:

P_{cf} = Peso corregido por fallas; *P_c* = Peso de campo; *H* = Número de plantas por parcela útil; *M* = Número de fallas por parcela; *0.3* = Coeficiente de corrección de la sobreproducción registrada en las plantas debida a la menor competencia causada por fallas.

$$\text{Índice de cosecha (IC)} = \frac{\text{peso de las mazorcas de 5 plantas}}{\text{peso de las 5 plantas con mazorcas}} * 100$$

El análisis estadístico se efectuó con el paquete SAS (SAS Institute, Inc; SAS.b, 1988). Las cuatro variables de las 15 cruzas y las seis líneas, se sometieron a un análisis combinado, y posteriormente a la comparación de medias de genotipos en combinación de localidades mediante la prueba de Tukey con 5 % de probabilidad.

El análisis de la aptitud combinatoria del material genético se hizo a partir de los promedios de genotipos a través de localidades y repeticiones, de acuerdo con el método 2

de efectos fijos del dialélico de Griffing (1956), cuyo modelo es:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + (\sum\sum e_{ijkl})/4$$

donde: *Y_{ijk}* = valor fenotípico promedio observado de la craza de las líneas *i* y *j*, en el bloque *k*; *μ* = media general; *g_i*, *g_j* = efecto de la aptitud combinatoria general (ACG) del *i*-ésimo o *j*-ésimo progenitor; *s_{ij}* = efecto de la aptitud combinatoria específica (ACE) de la craza de los progenitores *i* y *j*; y *e_{ijkl}* = efecto ambiental aleatorio correspondiente a la *i*, *j*, *k*, *i*-ésima observación.

La forma del análisis de varianza del diseño dialélico de Griffing método 2 con efectos fijos se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Análisis de varianza del diseño dialélico de Griffing (1956) método 2 de efectos fijos.

FV	gl	SC	CM	E(CM)
Rep	r-1			
Cruzas	$\frac{n(n+1)}{2} - 1$			
ACG	n-1	$(1/n+2)[\sum(y_i + y_{ii})^2 - 4/nY^2 ..]$	Mg	$\sigma_e^2 + \sigma_s^2 + (n+2)\sigma_g^2$
ACE	n(n-1)/2	$\sum\sum y_{ij}^2 - (1/n+2)[\sum(y_i + y_{ii})^2 + 2/(n+1)(n+2)Y^2]$	Ms	$\sigma_e^2 + \sigma_s^2$
Error	n(r-1)[n(n+1)/2]		Me	σ_e^2

El porcentaje de heterosis de las cruzas se estimó con respecto al progenitor medio (h) y con respecto al progenitor superior (h'), donde:

$$h = ((F_i - P_m)/P_m)100\%, h' = ((F_i - P_s)/P_s) 100 \%$$

donde: *F_i* = primera generación filial de la craza; *P_m* = progenitor medio = (*P_i* + *P_j*) / 2; y *P_s* = progenitor superior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de varianza combinado de dos localidades se detectaron diferencias significativas entre genotipos, en las cuatro variables evaluadas (Cuadro 2). Este resultado era de esperarse dada la diversidad de los orígenes de las líneas incluidas en el presente trabajo, como sugieren Vergara *et al.* (2001) y Gutiérrez *et al.* (2002). La interacción Gen x Loc no fue significativa, lo cual indica que los genotipos respondieron en el mismo sentido a los cambios ambientales. Al respecto, Fehr (1991) menciona que cuando suceden estas condiciones, es posible realizar el mejoramiento en una sola localidad, pues se espera que las respuestas de la selección sean expresadas en el resto de las localidades, lo que se refleja en una mayor eficiencia en el uso de los recursos en el proceso de evaluación.

Un coeficiente de variación (CV) de 15 % para rendimiento es típico de experimentos en maíz en un diseño de bloques completos al azar, e indica que el experimento en campo estuvo bien conducido. Lo mismo se puede decir del CV para índice de cosecha (IC), no obstante ser una variable compleja. Las variables altura de planta y días a floración, por ser genéticamente menos complejas que el rendimiento, presentan los menores valores de CV, tal como lo encontraron también Velásquez *et al.* (1992) y Tosquy *et al.* (1998).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y prueba de F para cuatro variables.

F V	G L	Caracteres			
		REND	DF	AP	IC
Loc	1	9960448*	7.5	0.14*	140.8**
R(Loc)	2	5634304	3.7	0.04	67.5
Gen	20	211109914**	101.7**	0.69 **	262.7 **
GenxLoc	20	1240217	3.8	0.02	7.8
Error	40	1034854	1.7	0.03	14.7
CV		14.4	1.8	5.9	14.0

*, ** Significativo y altamente significativo a los niveles de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente. REND = Rendimiento; DF = Días a floración; AP = Altura de planta; IC = Índice de cosecha; GL = Grados de libertad.

Entre genotipos hubo grandes diferencias (Cuadro 3), donde destacan en rendimiento la cruz P4xP6, seguido de P3xP5, P3xP4 y P5xP6. Las líneas tuvieron rendimientos menores, pero cuatro de ellas rindieron más de 2300 kg ha⁻¹, rendimiento que según Espinosa *et al.* (1998) es el mínimo económico de una línea endogámica, desde el punto de vista de producción de semilla de híbridos de cruz simple. Los genotipos más tardíos fueron las líneas y los más precoces las cruza; las cruza de mayor precocidad fueron P2xP6 y P1xP2, lo que concuerda con los resultados de Gámez *et al.* (1992), quienes señalan que las líneas son más tardías a medida que avanza su endogamia, mientras que las cruza son más precoces. Las cruza de mayor altura de planta fueron P4xP6 y P4xP5, y las de menor altura las líneas.

El factor genotipos tuvo un efecto significativo en el índice de cosecha, con una amplitud de 0.1 a 0.4 (Cuadro

3), donde los mayores índices corresponden a las cruza P1xP5, P3xP4, P5xP6 y P4xP6, y los valores más bajos a las líneas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Graybill *et al.* (1991), quienes encontraron diferencias significativas para índice de cosecha por efecto del genotipo. Al respecto, Pons *et al.* (1991) señalan que los valores típicos para los maíces mexicanos se sitúan entre 0.30 y 0.37; Pandey y Gardner (1992) también registraron índices de cosecha menores de 0.40 para maíces tropicales. En este trabajo se obtuvo una mayor amplitud en el índice de cosecha.

Los resultados del análisis de varianza efectuado con el método 2 de efectos fijos del dialélico de Griffing, para las cuatro variables evaluadas, indican que el efecto localidad afectó significativamente al rendimiento y al índice de cosecha, en tanto que los genotipos difirieron significativamente en las cuatro variables evaluadas, por lo que los genotipos fueron diferentes entre sí (Cuadro 4). Con respecto a la ACG no se tuvo significancia para ninguna variable; en cambio, para la ACE se tuvo significancia para todas las variables; es decir, la varianza genética de tipo no aditivo fue mayor que la de tipo aditivo, de lo que se infiere que el fenotipo observado de las cruza se debe en mayor parte a la dominancia o efecto no aditivo. Al respecto, Crossa *et al.* (1990) mencionan que los efectos no aditivos son más importantes a medida que avanza la endogamia de los padres involucrados, debido a que existe un mayor número de loci en estado homocigótico.

Cuadro 3. Comparación de medias de cruza y sus progenitores para cuatro variables.

REND		DF		AP		IC	
Genotipos	Media (kg ha ⁻¹)	Genotipos	Media (días)	Genotipos	Media (m)	Genotipos	Media
P4xP6	10352 a*	P1	84 a	P4xP6	2.5 a	P1xP5	0.4 a
P3xP5	9461 ab	P3	84 ab	P4xP5	2.4 a	P3xP4	0.4 ab
P3xP4	9298 ab	P5	83 ab	P1xP6	2.4 ab	P5xP6	0.3 abc
P5xP6	9261 ab	P2	83 ab	P5xP6	2.4 ab	P4xP6	0.3 abcd
P2xP4	8761 abc	P6	81 b	P3xP4	2.3 abc	P2xP6	0.3 bcde
P1xP2	8676 abc	P4	81 b	P1xp2	2.3 abc	P1xP3	0.3 bcde
P2xP5	8514 abcd	P3xP5	74 c	P2xP6	2.2 bc	P3xP5	0.3 bcde
P1xP5	8425 abcd	P3xP6	74 c	P3xP6	2.2 bc	P1xP2	0.3 bcde
P2xP6	8029 bcd	P4xP5	74 c	P2xP5	2.2 bc	P4xP5	0.3 bcde
P4xP5	7958 bcd	P2xP5	73 de	P1xP3	2.1 cd	P1xP4	0.3 bcde
P1xP6	7572 bcd	P2xP3	73 de	P2xP4	2.1 cd	P2xP5	0.3 bcde
P3xP6	7463 bcde	P1xP4	73 de	P2xP3	2.1 cd	P3xP6	0.3 cdef
P1xP3	6996 cdef	P4xP6	73 de	P3xP5	1.9 de	P2XP3	0.3 def
P1xP4	6958 cdef	P1xP6	72 efg	P1xP5	1.9 de	P1xP6	0.3 def
P2xP3	6502 def	P1xP5	72 efg	P3	1.9 de	P2xP4	0.3 efg
P1	5448 efg	P2xP4	71 fg	P1xP4	1.8 ef	P6	0.2 fg
P4	5037 fg	P3xP4	71 fg	P6	1.6 f	P1	0.2 fg
P5	5035 fg	P5xP6	71 fg	P5	1.6 fg	P5	0.2 gh
P6	3612 gh	P1xP3	71 fg	P2	1.4 gh	P4	0.2 gh
P2	2797 h	P1xP2	70 g	P1	1.3 h	P2	0.1 hi
P3	1936 h	P2xP6	70 g	P4	0.9 i	P3	0.1 i

*Valores con la misma letra son estadísticamente iguales entre sí (Tukey, 0.05). REND = Rendimiento; DF = Días a floración; AP = Altura de planta; IC = Índice de cosecha.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis varianza dialélico de 15 cruzas y sus líneas para cuatro variables.

F V	GL	Características			
		REND	D F	AP	I C
Loc	1	4980310**	7.01	0.01	70.41**
Genotipos	20	10554922**	3.55**	0.84 **	131.34**
ACG	5	1572846	5.68	0.04	12.28
ACE	15	13548947**	2.37**	1.11 **	171.0 **
ERROR	42	620115	2.28	0.06	3.88
CV		11	1.77	4.50	7.2

*, ** Significativo y altamente significativo a los niveles de probabilidad de 0.05 y 0.001, respectivamente.

REND = Rendimiento; DF = Días a floración; AP = Altura de planta; IC = Índice de cosecha.

Para rendimiento, los progenitores con mayores valores de ACG fueron P₅, P₄ y P₁, y con menor, P₃, P₂ y P₆. Las cruzas, de mayor ACE fueron P₂xP₅ y P₂xP₃, y las cruzas P₄xP₅ y P₁xP₆ fueron las de menor ACE. Se esperaba que las cruzas de mayor rendimiento hubieran sido aquellas resultantes de cruzar dos líneas de alta ACG con el efecto positivo de un alto valor de ACE; esto no resultó así debido, tal vez, al bajo número de repeticiones por localidad (dos), y principalmente al bajo número de localidades (dos). El alto rendimiento de una craza puede deberse a la suma de altos efectos aditivos de los genes de las líneas progenitoras, o a un efecto alto positivo de ACE, pero no cabría esperar interacción alguna entre los alelos recesivos de ambos progenitores (Falconer, 1985).

En días a floración, tres progenitores presentaron efectos de ACG positivos y tres negativos; las cruzas mostraron efectos negativos de ACE, lo cual indica que la precocidad está controlada por efectos génicos no aditivos y de tipo negativo, ya que las cruzas fueron más precoces que sus progenitores. En altura de planta se obtuvieron valores positivos de ACG para tres progenitores y valores negativos para los otros tres, en tanto que para las cruzas sólo una de ellas presentó valores negativos de ACE. Para índice de cosecha dos progenitores presentaron efectos negativos de ACG y cuatro efectos positivos, en tanto que 13 de las 15 cruzas mostraron efectos positivos de ACE.

Los porcentajes de heterosis en relación con el progenitor medio (h), y con el progenitor superior (h') se presentan en el Cuadro 6. En ambos tipos de heterosis, tres de las cuatro variables presentaron valores de heterosis positivos, y sólo una de ellas (días a floración) presentó valores negativos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Crossa *et al.* (1990) quienes indicaron que la heterosis negativa para días a floración es un indicio de que la actividad metabólica y el crecimiento de los híbridos es más rápido que sus progenitores.

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de seis líneas y específica (ACE) de sus 15 cruzas, para cuatro variables.

Genotipo	REND		D F		AP		I C	
	Media	ACG	Media	ACG	Media	ACG	Media	ACG
Línea								
P ₁	5448	103.3	84	-0.6	1.3	0.08	20.0	-0.45
P ₂	2797	-145.3	83	0.6	1.4	0.22	11.7	-1.60
P ₃	1936	-440.2	84	-0.4	1.9	-0.07	9.4	0.59
P ₄	5037	299.1	81	-0.4	0.9	0.08	18.5	0.36
P ₅	5035	373.4	83	0.7	1.6	-0.10	19.0	0.61
P ₆	3612	-191.1	81	0.2	1.6	-0.21	21.0	0.48
Cruza	Media	ACE	Media	ACE	Media	ACE	Media	ACE
P ₁ xP ₂	8676	562.2	70	-2.6	2.3	0.1	30.8	1.8
P ₁ xP ₃	6996	1314.0	71	-4.1	2.1	0.2	31.8	4.7
P ₁ xP ₄	6958	1220.7	73	-3.9	1.8	0.2	30.5	3.6
P ₁ xP ₅	8425	985.8	72	-2.2	1.9	0.2	41.2	3.0
P ₁ xP ₆	7572	-462.5	72	-1.8	2.4	0.3	27.1	-0.2
P ₂ xP ₃	6502	2794.3	73	-4.1	2.1	0.2	27.1	9.0
P ₂ xP ₄	8761	752.4	71	-1.6	2.1	0.2	25.9	4.5
P ₂ xP ₅	8514	3072.4	73	-4.2	2.2	0.4	30.4	7.9
P ₂ xP ₆	8029	747.1	70	-2.3	2.2	0.2	32.1	1.5
P ₃ xP ₄	9298	2386.0	71	-3.1	2.3	0.3	37.6	9.4
P ₃ xP ₅	9461	-27.4	74	-2.7	2.0	-0.1	31.0	2.0
P ₃ xP ₆	7463	2004.3	74	-2.9	2.2	0.2	27.6	12.8
P ₄ xP ₅	7959	-729.2	74	-4.7	2.4	0.2	30.6	3.6
P ₄ xP ₆	10352	1600.6	73	-3.5	2.5	0.3	34.2	-2.2
P ₅ xP ₆	9261	2226.8	71	-1.6	2.4	0.3	35.3	2.6

REND = Rendimiento (kg ha⁻¹); DF = Días a floración; AP = Altura de planta (m); IC = Índice de cosecha.

Cuadro 6. Porcentaje de heterosis de 15 cruzas respecto al progenitor medio (h) y al progenitor superior (h') para cuatro variables.

Cruza	REND		DF		AP		IC	
	h	h'	h	h'	h	h'	h	h'
P ₁ xP ₂	110	59	-16	-17	76	71	94	54
P ₁ xP ₃	89	28	-15	-15	34	12	116	59
P ₁ xP ₄	33	28	-12	-13	61	40	58	53
P ₁ xP ₅	61	55	-14	-14	32	20	111	116
P ₁ xP ₆	67	39	-13	-14	63	45	32	29
P ₂ xP ₃	175	132	-13	-13	29	11	157	132
P ₂ xP ₄	124	74	-13	-14	83	55	72	40
P ₂ xP ₅	117	69	-12	-12	49	39	98	60
P ₂ xP ₆	151	122	-15	-14	46	34	96	53
P ₃ xP ₄	167	85	-14	-15	65	23	170	103
P ₃ xP ₅	171	88	-11	-12	12	3	118	63
P ₃ xP ₆	169	107	-10	-12	25	16	82	31
P ₄ xP ₅	58	58	-10	-11	95	56	63	61
P ₄ xP ₆	139	106	-10	-10	91	51	73	63
P ₅ xP ₆	114	84	-13	-12	48	45	77	68

REND = Rendimiento; DF = Días a floración; AP = Altura de planta; IC = Índice de cosecha.

De los dos tipos de heterosis la que más interesa desde el punto de vista comercial es la referida al progenitor superior. Las cruzas con mayor heterosis para rendimiento fueron P₂xP₃ y P₃xP₆, y las que mostraron menor heterosis fueron P₁xP₄ y P₄xP₅. En el primer caso los progenitores que intervinieron en las cruzas fueron los de menor ACG; en cambio, de las cruzas que mostraron la menor heterosis, la primera y la segunda provienen de progenitores de ACG positiva y negativa, y la tercera P₄xP₅ proviene de progenitores de ACG positiva. En términos relativos este

tipo de heterosis varió desde 55 a 175 % para rendimiento; de -10 a -17 % para días a floración; de 3 a 95 % para altura de planta, y de 31 a 170 % para índice de cosecha. En el presente trabajo, la heterosis mostrada por las otras cuatro características se situó por arriba del nivel mínimo recomendado. Según Ordás (1991), la magnitud de la heterosis mostrada por un híbrido depende en gran parte de la divergencia genética de las variedades progenitoras de las cuales se derivaron las líneas involucradas.

CONCLUSIONES

Se detectaron diferencias significativas entre genotipos. Los mayores efectos de ACE para rendimiento fueron observados en las cruzas L-AN-447 (P₂) x L-AN-123 (P₅), L-AN-447 (P₂) x L-AN-360PV (P₃), L-AN-360PV (P₃) x L-AN-130 (P₄), y L-AN-360PV (P₃) x L-AN-388R (P₆), con las cuales se pueden implementar métodos de mejoramiento para la formación de híbridos de tres o cuatro líneas.

Tanto en la heterosis debida al progenitor medio y al progenitor superior, tres de las cuatro variables evaluadas tuvieron efectos positivos; sólo la variable días a floración presentó valores negativos, lo cual indica que el desarrollo fenológico de los híbridos es más rápido que el de sus progenitores.

BIBLIOGRAFÍA

- Crossa J, S K Vasal, D L Beck (1990) Combining ability estimates of CIMMYT'S tropical late yellow maize germoplasm. *Maydica* 35(3):273-278.
- Espinoza C A, J Ortiz C, A Ramírez F, N O Gómez M, A Martínez G (1998) Estabilidad y comportamiento de líneas *per se* y cruzas de maíz en la producción de semilla. *Agric. Téc. Méx.* 24(1): 27-36.
- Falconer D S (1985) Introducción a la Genética Cuantitativa. 13^a. CECSA. México. 135 p.
- Ferh W R (1991) Principles of Cultivar Development. Iowa State University Press. Ames, Iowa. pp: 81-85.
- Gómez V A J, J L Rodríguez O, F Castillo G, J L Arellano V (1992) Heterosis en caracteres morfológicos y fisiológicos de maíz en dos condiciones de humedad. *Agrociencia S. Fitociencia* 3(1): 23 - 37.
- Gómez N M, B R Valdivia (1988) Dialélico integrado con líneas de diferentes programas de maíz para la región cálida. *Rev. Fitotec. Mex.* 11: 103-120.
- Graybill J S, W J Cox, D J Otis (1991) Yield and quality of forage maize as influenced by hybrid, planting date and plant density. *Agron. J.* 83: 559 - 564.
- Griffing B (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9: 463-493.
- Gutiérrez del R E, A Palomo G, A Espinoza B, E de la Cruz L (2002) Aptitud combinatoria y heterosis para rendimiento de líneas de maíz en la Comarca Lagunera, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(3):271-277.
- Jugenheimer W R (1990) Maíz: Variedades Mejoradas Métodos de Cultivo y Producción de Semilla. Trad. R Piña G Ed. Limusa. Cuarta reimpresión. México. 841 p.
- Márquez S F (1988) Genotecnica Vegetal, Tomo II. AGTESA. México. 563 p.
- Mejía C A, J D Molina G (1999) Comparación de procedimientos para la conversión a rendimiento por hectárea en la evaluación de variedades tropicales de maíz. *Agrociencia* 33:159-163.
- Ordás A (1991) Heterosis in crosses between American and Spanish populations of maize. *Crop Sci.* 31:931-935.
- Pandey S, C O Gardner (1992) Recurrent selection for population, variety and hybrid improvement in tropical maize. *Adv. Agron.* 48:1-87.
- Pons H J L, A Carballo Q, V González H, H Ángeles A (1991) Modificaciones al índice de cosecha. *Agrociencia* 2:35-49.
- Puertas G M (1992) Genética, Fundamentos y Perspectivas. McGraw-Hill. España. 741 p.
- SAS Institute Inc (1988) Introductory Guide for Personal Computers, Release 6.03 Edition. Cary, NC: SAS. 111 p.
- Singh I D, N C Stoskopf. (1971) Harvest index in cereals. *Agron. J.* 63:224-226.
- Sprague G F, L A Tatum (1942) General vs specific combining ability in single crosses of corn. *J. Amer. Soc. Agron.* 34: 923-932.
- Tosquy V O S, G Castañón N, M Sierra M, F A Rodríguez M (1998) Aptitud combinatoria general y específica de líneas de maíz usando como probadores cruza simples en el estado de Veracruz. *Agric. Téc. Méx.* 24(1): 3-10.
- Velásquez C G, F Castillo G, J D Molina G, J L Arellano (1992) Aptitud combinatoria y efectos recíprocos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) con diferente nivel de endogamia. *Agrociencia S. Fitociencia* 3 (1):111-123.
- Vergara A N, S Rodríguez H, H de León C S McLean, S K Vasal (2001) Aptitud combinatoria de líneas de maíz tropical con diferente tipo de mazorca. *Rev. Fitotec. Mex.* 24(2): 203-212.