

CRUZAS DIALÉLICAS ENTRE LÍNEAS AUTOFECUNDADAS DE MAÍZ DERIVADAS DE LA RAZA TUXPEÑO

DIALLEL CROSSES AMONG MAIZE INBRED LINES DERIVED FROM THE TUXPEÑO RACE

Delfino Reyes López¹, José D. Molina Galán^{1*}, Marco Antonio Oropeza Rosas¹ y Esaú del Carmen Moreno Pérez²

¹Programa de Genética, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Km.36.5 Carr. México- Texcoco. C.P. 56230 Montecillo, Edo. de México Tel y Fax: 01(595) 95-2-0262. Correo electrónico: jmolina@colpos.mx ²Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5. Carr. México- Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, Edo. de México

* Autor responsable

RESUMEN

En este trabajo se estimaron los parámetros genéticos de la raza de maíz (*Zea mays* L.) Tuxpeño, así como los efectos de aptitud combinatoria general (g_i) y específica (s_{ij}) de diez líneas S_1 derivadas de tres compuestos varietales pertenecientes a esta raza. Se hicieron las 45 cruzas dialélicas (método 4 de Griffing) entre las diez líneas cuyos progenitores fueron considerados inicialmente como una muestra aleatoria de líneas S_1 , mediante las cuales se estimaron los parámetros genéticos de población: media genotípica y las varianzas genéticas aditiva y de dominancia. En un segundo enfoque, al considerar las 10 líneas como un grupo selecto, se estimaron los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de sus cruzas. Las 45 cruzas se evaluaron por rendimiento de mazorca por planta en cinco ambientes del trópico húmedo de México. La varianza genética aditiva resultó cinco veces mayor que la varianza genética de dominancia. Las líneas 9 y 10 presentaron los efectos más altos de ACG (4.26 y 7.32, respectivamente) y las cruzas en que intervinieron fueron las de mayor rendimiento. Las líneas 3 y 5 que tuvieron los efectos más bajos de ACG (-9.60 y -3.19, respectivamente), produjeron las cruzas con los rendimientos más bajos.

Palabras clave: *Zea mays* L., raza Tuxpeño, líneas S_1 , cruzas dialélicas.

SUMMARY

The genetic parameters of the Tuxpeño maize (*Zea mays* L.) race, as well as the general (g_i) and specific (s_{ij}) combining ability effects of ten S_1 lines from three varietal composites of this race were estimated in this study. The 45 diallel crosses were carried out among the ten inbred lines according to Griffing's method 4. Initially, the ten parental lines were considered as a random sample of S_1 lines for estimating the populations parameters: genetic mean, the additive and the dominance genetic variances. Thereafter, the ten lines were considered as a select group where the general (g_i) and specific (s_{ij}) combining ability effects of their crosses were estimated. The evaluation was based on ear yield per plant, in five environments. The additive genetic variance was five times the value of the dominance variance. Lines 9 and 10 had the highest GCA (4.26 and 7.32, respectively), and their

crosses had the highest yield. Lines 3 and 5 had the smallest GCA effects (-9.60 and -3.19, respectively) and produced the lowest yielding crosses.

Index words: *Zea mays* L. Tuxpeño race, inbred lines, diallel crosses.

INTRODUCCIÓN

En México el desarrollo del mejoramiento genético del maíz (*Zea mays* L.) por hibridación fue iniciado por la hoy extinta Oficina de Estudios Especiales de la Secretaría de Agricultura y Ganadería, en 1943 (Wellhausen, 1950). El propósito fue obtener híbridos más rendidores que las variedades criollas regionales en las tres principales zonas agrícolas de México: Mesa Central, El Bajío y los Trópicos húmedo y seco. La hibridación tuvo éxito, ya que en la década de los 50 se liberaron los híbridos tropicales H-501, H-502 y H-503, que superaron a las variedades criollas en 30 % o más (Reyes *et al.*, 1955). En 1961 se liberó al híbrido tropical H-507 (INIFAP, 1996) que sólo superó en 10 % al H-503. Los híbridos tropicales modernos, como el H-512, no sobrepasan con mucho el rendimiento del H-507.

Lo anterior indica que desde 1961 ocurrió un estancamiento del mejoramiento genético por hibridación, fenómeno denominado barrera genética de la hibridación que se atribuye a la falta de explotación, mediante selección recurrente, de la varianza genética aditiva de las poblaciones que han servido de fuentes de líneas autofecundadas, como paso previo o simultáneo a la derivación de líneas autofecundadas (Molina, 1988). Comstock *et al.* (1949) señalaron que cuando en una población los efectos de aptitud combinatoria general son más importantes que los

efectos específicos, es recomendable mejorar a la población recurrente; por el contrario, si los efectos de aptitud combinatoria específica son los más importantes, la población deberá mejorarse por hibridación. Por la misma razón, Lonquist (1965) recomendó explotar primero la varianza genética aditiva por selección, y después la varianza no aditiva por hibridación.

La estrategia de mejorar por selección, hibridación, o por selección seguida de hibridación, dependerá de la proporción que representen las varianzas aditiva y de dominancia de la población, respecto a la variación genética total. Moll y Robinson (1967), de una recopilación de estudios en diversas poblaciones de maíz, señalaron que la varianza genética aditiva es cuando menos dos veces mayor que la varianza de dominancia.

Los conceptos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE), introducidos por Sprague y Tatum (1942), sirven 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. Ambos conceptos sirvieron de base para que Griffing (1956) estableciera sus cuatro métodos del diseño dialélico, los cuales constituyen las herramientas de uso más frecuente para estimar efectos y varianzas de ACG y ACE, así como para el estudio genético de poblaciones biológicas y el entendimiento de la acción génica en caracteres cuantitativos de importancia agrícola (Gardner, 1963); además, proporciona las herramientas necesarias al fitomejorador para tomar la decisión sobre los esquemas de mejoramiento a usar en la obtención de genotipos superiores (Gardner y Eberhart, 1966).

Varios investigadores en México han usado alguno de los diseños dialélicos de Griffing, como Antuna *et al.*

(2003), De la Cruz *et al.* (2003), Caballero y Cervantes (1990), Martín del Campo y Molina (1982), y Gómez *et al.* (1988). Ellos encontraron que las cruzas de mayor rendimiento estuvieron formadas por líneas de diferente origen, y que en aquéllas que mostraron altos efectos de ACE, al menos uno de los progenitores fue de alta ACG. Es posible también encontrar líneas sobresalientes de una misma población que permitan formar cruzas sobresalientes (Vasal *et al.*, 1995). En maíces tropicales del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Beck *et al.* (1990), Crossa *et al.* (1990) y Vasal *et al.* (1992), encontraron que los efectos aditivos fueron más importantes que los no aditivos, para rendimiento de grano, altura de planta y días a floración.

En el presente trabajo se estimaron los parámetros genéticos de la raza Tuxpeño, así como los efectos de aptitud combinatoria general (g_i) y específica (S_{ij}), de un grupo selecto de diez líneas de una autofecundación (líneas S_i) derivadas de tres compuestos varietales pertenecientes a la raza Tuxpeño, bajo las siguientes hipótesis: a) En la raza Tuxpeño la varianza genética aditiva es mayor que la de dominancia; b) Las líneas de alta ACG producen cruzas de mayor rendimiento que las líneas de baja ACG; y c) El alto rendimiento de las cruzas se debe a altos efectos de ACE.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético estuvo constituido por las 45 cruzas simples posibles entre diez líneas S_i , cuyas genealogías y características de planta se anotan en el Cuadro 1. Las líneas fueron seleccionadas con base en la evaluación de un grupo de mestizos (línea x variedad) hecha en Tepetates

Cuadro 1. Genealogía y características de planta de diez líneas S_i de maíz de alta aptitud combinatoria general para rendimiento de mazorca.

Línea	Origen de las líneas	FF (d)	FM (d)	AP (cm)	AMZ (cm)
1	Población 1 (Tuxpeño Planta Baja)C5 - 12A	59	59	220	119
2	Población 1 (Tuxpeño Planta Baja)C5 - 6B	58	58	220	120
3	Población 2 (Mezcla Tropical Blanca)C8 - 23A	57	57	212	115
4	Población 2 (Mezcla Tropical Blanca)C5 - 5A	59	59	227	126
5	Población 2 (Mezcla Tropical Blanca)C5 - 20A	58	58	214	116
6	Población 2 (Mezcla Tropical Blanca)C5 - 11A	58	58	226	125
7	Población 3 (La Posta)C8 - 3A	58	59	220	121
8	Población 3 (La Posta)C5 - 4A	58	58	229	126
9	Población 3 (La Posta)C8 - 1A	58	58	228	127
10	Población 3 (La Posta)C8 - 3B	59	59	229	129

C5, C8: Ciclo 5 y 8 de selección; 12, 6, 23..... = Número de planta autofecundada; A, B = Ciclo agrícola invierno -primavera y verano-otoño, respectivamente; FF, FM = Días a floración femenina y masculina, respectivamente; AP, AMZ = Altura de planta y de mazorca (cm), respectivamente.

Veracruz (sede del Campus Veracruz del Colegio de Postgraduados) en el ciclo de invierno primavera (Ciclo A). Las diez líneas de más alta ACG fueron aquéllas cuyos mestizos fueron los de mayor rendimiento de grano.

Las cruzas fueron evaluadas en el ciclo agrícola de verano otoño (Ciclo B) y ciclo A, para rendimiento de mazorca por planta, en cinco sitios de Tepetates, Veracruz, 1997B (2 sitios), 1998 A, 1998B y 1999A, con un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, y parcela experimental de dos surcos de 4.40 m que contenían cada uno 12 matas de dos plantas, con separación de 80 cm entre surcos y 40 cm entre matas, para una parcela útil de 48 plantas.

El análisis estadístico del rendimiento se hizo mediante un análisis de varianza combinado de los cinco ambientes. La suma de cuadrados de cruzas se partió en ACG y ACE; en igual forma, la interacción cruza x ambientes se partió en ACG x Ambientes y ACE x Ambientes.

Las diez líneas, originalmente clasificadas como de alta aptitud combinatoria general, fueron consideradas, en un primer enfoque, como una muestra aleatoria de una población de líneas derivadas de la raza Tuxpeño, con base en los siguientes dos argumentos: 1) La evaluación de sus mestizos se hizo en un ambiente, de modo que su clasificación original pudo haber diferido de su clasificación basada en el promedio de cinco ambientes; 2) De las diez líneas, dos proceden de la Población 1, cuatro de la Población 2, y cuatro de la Población 3. Las poblaciones 1 y 3 son compuestos de materiales de la raza Tuxpeño; la población 2 es un compuesto formado principalmente con variedades de la raza Tuxpeño (Parra y Hallauer, 1997). Según estos argumentos, la población sería reconstruible mediante el apareamiento aleatorio de las diez líneas. A esta población

de referencia se le estimaron las varianzas genéticas aditiva (σ^2_A), y de dominancia (σ^2_D).

En un segundo enfoque, las 10 líneas fueron consideradas como un grupo selecto de líneas, en cuyas cruza simples se estimó el efecto de aptitud combinatoria general (g_i) y el efecto de aptitud combinatoria específica (S_{ij}).

Con ambos enfoques, el modelo estadístico para el análisis combinado del rendimiento de las 45 cruza simples posibles entre las diez líneas S_i fue el método 4 del diseño dialélico de Griffing (1956).

Cuando las diez líneas se consideraron como una muestra aleatoria poblacional, se aplicó el modelo aleatorio (Griffing, 1956), en el cual los efectos de ACG y ACE y del error, fueron tomados como efectos aleatorios. Cuando las 10 líneas se consideraron un grupo selecto de líneas, se aplicó el modelo fijo (Griffing, 1956), en cuyo caso el error fue el único efecto aleatorio.

La forma del análisis de varianza combinado y de las esperanzas de los cuadrados medios es la que se indica en el Cuadro 2, cuyos cálculos se realizaron con las fórmulas propuestas por Singh (1973).

El cálculo de la varianza aditiva (σ^2_A) y de la varianza de dominancia (σ^2_D), se hizo con las fórmulas propuestas por Cockerham (1954).

Para los cálculos arriba mencionados se diseñó un programa de cómputo de SAS (V.8e) adaptado al método 4 de Griffing a través de ambientes. Para la prueba de significancia de los efectos g_i y S_{ij} se usó el programa de cómputo propuesto por Zhang y Kang (1997).

Cuadro 2. Análisis de varianza combinado para cruza dialélicas del método 4 de Griffing (1956).

Fuente de variación	gl	SC	CM	Componentes de varianza, que incluye repeticiones y ambientes
Ambientes (A)	a-1	S ₅	M ₅	
Repeticiones /A	a(r-1)	S ₄	M ₄	
Cruzas (C)	c-1	S ₃	M ₃	
ACG	p-1	S ₃₁	M ₃₁	$\sigma^2_c + r\sigma^2_{ACE \times A} + r(p-2)\sigma^2_{ACG \times A} + r\sigma^2_{ACE} + r\sigma^2_{ACG}$
ACE	p(p-3)/2	S ₃₂	M ₃₂	$\sigma^2_c + r\sigma^2_{ACE \times A} + r\sigma^2_{ACE}$
C X A	(a-1)(c-1)	S ₂	M ₂	$\sigma^2_c + \sigma^2_{ACE \times A} + r(p-2)\sigma^2_{ACG \times A}$
ACG X A	(a-1)(p-1)	S ₂₁	M ₂₁	$\sigma^2_c + \sigma^2_{ACE \times A}$
ACE X A	(a-1)p(p-3)/2	S ₂₂	M ₂₂	σ^2_c
Error	a(r-1)(c-1)	S ₁	M ₁	
Total	arc-1			

a = ambientes; r = repeticiones; c = número de cruza; F₁ = p (p-1)/2; p = número de líneas; gl = grados de libertad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con excepción de la interacción de ACG con ambientes (ACG x A), todos los factores de variación resultaron altamente significativos ($P \leq 0.01$) (Cuadro 3). En la suma de cuadrados de cruzas, 46 % de la variación correspondió a los efectos de ACG y 54 % a los de ACE, lo cual indica que tanto los efectos aditivos como los de dominancia son importantes en la expresión de la variación genética del rendimiento. La varianza aditiva ($\sigma^2_A=37.36$) resultó 5.5 veces mayor que la varianza de dominancia ($\sigma^2_D= 6.75$), de modo que se acepta la hipótesis de que en la raza Tuxpeño la varianza genética aditiva es mayor que la de dominancia. Este resultado coincide con Caballero y Cervantes (1990) quienes informan que en la variedad Rocamex V-520C de la raza Tuxpeño, la varianza aditiva resultó mayor que la varianza de dominancia. En otras razas mexicanas de maíz, Vargas *et al.* (1982) y Sahagún *et al.* (1991) también encontraron que en la variedad Zac-58 original (Cónico Norteño) la varianza aditiva fue mayor que la de dominancia. Similarmente, en un complejo de variedades de Estados Unidos de Norteamérica, Moll y Robinson (1967) encontraron que la varianza aditiva fue el doble o mayor que la varianza de dominancia.

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado del rendimiento de mazorca por planta de 45 cruzas dialélicas de maíz evaluadas en cinco ambientes. Tepetates, Ver. 1997-1999.

FV	gl	CM	Co.Var.
Ambientes (A)	4	14796**	
Repeticiones/A	15	1678**	
Cruzas (C)	44	1517**	54
AGC	9	3395**	14
ACE	35	1034**	31
C x A	176	421**	29
ACG x A	36	514	3
ACE x A	140	397**	23
Error	660	303	303
Total	899		

CV= 15.4 $\hat{\bar{u}} = 113.2$ $\hat{\sigma}^2_A=37.3$ $\hat{\sigma}^2_D= 6.7$

** = $P \leq 0.01$; Co.Var. = Componente de varianza, gl = Grados de libertad.

De acuerdo con los parámetros genéticos encontrados en la raza de maíz Tuxpeño, se infiere que la selección sería efectiva para la obtención de variedades mejoradas de polinización libre y para acumular genes favorables de alto rendimiento en la población, a partir de la cual podrían emprenderse programas de hibridación.

De las 45 cruzas un grupo de 27 fueron las mejores en rendimiento con 133 a 117 g/planta (Cuadro 4). En 9 de las 11 cruzas de mayor rendimiento está presente la línea 9 o la línea 10, que fueron cruzas de líneas provenientes de

diferente población, excepto las cruzas 9x10 y 7x9 cuyas líneas se derivaron de la población 3. Similarmente, Gómez *et al.* (1988) y Ordas (1991) observaron que sus mejores cruzas fueron formadas con líneas de diferente origen. En 10 de las 11 cruzas de mayor rendimiento intervino al menos una línea de la población 3, de lo cual se deduce que esta población tiene alto potencial para formar líneas de alta aptitud combinatoria.

En las 10 cruzas de menor rendimiento (de 87.3 a 106.7 g/planta), la mayoría de las líneas provinieron de la misma población. También Vasal *et al.* (1992) encontraron que en las cruzas entre líneas de una misma población, los rendimientos fueron los más bajos y con efectos de ACE negativos. Antes, Gómez *et al.* (1988) encontraron que las cruzas entre líneas hermanas dieron resultados con baja heterosis. Sin embargo, investigadores como Han *et al.* (1991) han reportado que las cruzas formadas con líneas de diferentes poblaciones no superaron de manera significativa el rendimiento de las cruzas formadas con líneas de la misma población.

Al comparar las 10 líneas por sus valores de ACG estimada con base en el rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de sus respectivos mestizos evaluados en un solo ambiente (TPT 93B), contra los del efecto g_i estimado en el análisis combinado de cinco ambientes (TPT-97B a TPT-99A), no se encontró coincidencia. En efecto, en el análisis de un sólo ambiente las líneas 3, 4 y 7 fueron las de mayor ACG, mientras que en promedio de cinco ambientes las líneas 10, 9 y 4 fueron las mejores; tampoco hubo coincidencia en las líneas de más baja ACG entre los dos procedimientos (Cuadro 5).

Las líneas 9 y 10 provenientes de la población 3 presentaron los mayores valores de g_i e intervinieron en las cruzas de mayor rendimiento. Similarmente, Gómez *et al.* (1988) y Pérez *et al.* (1991) mencionan que en las cruzas de mayor rendimiento intervino al menos una línea de alta aptitud combinatoria general. Podría inferirse entonces que la alta ACG de las líneas es un indicador de alto rendimiento de sus cruzas, aunque no necesariamente de alta heterosis. De igual modo, las líneas con los menores valores de g_i produjeron las cruzas de menor rendimiento, como fue el caso de las cruzas 3x5 y 2x5.

Cuadro 4. Rendimiento promedio y genealogía de 45 cruzas. Tepetates Ver. 1997-1999

Cruza	Genealogía	Rendimiento (g/planta)
4 x 10	Pob.2 C5-5A x Pob.3 C8-3B	133.4 a
5 x 10	Pob.2 C5-20B x Pob.3 C8-3B	127.2 ab
9 x 10	Pob.3 C8-1 A x Pob.3 C8-3B	123.8 abc
4 x 9	Pob. 2 C5-5A x Pob.3 C8-1 A	122.5 abcd
2 x 9	Pob.1C5- 12 A x Pob.3 C8-1 A	122.4 abcd
1 x 10	Pob.1C5-12 A x Pob.3 C8-3B	122.2 abcd
6 x 8	Pob.2C5-11B x Pob.3 C5 -4 A	121.9 abcd
2 x 10	Pob.1C5-12 A x Pob.3 C8-1 A	121.9 abcd
7 x 9	Pob.3C8-3 A x Pob.3 C8-1 A	121.2 abcd
6 x 10	Pob.2C5-11B x Pob.3 C8-3B	120.7 abcd
1 x 8	Pob.1C5-12 A x Pob.3 C5 -4 A	120.6 abcd
6 x 9	Pob.2C5-11B x Pob.3 C8-1 A	119.7 abcd
1 x 4	Pob.1C5-12 A x Pob. 2 C5-5A	119.5 abcdf
5 x 6	Pob.2 C5-20B x Pob.2C5-11B	118.1 abcdf
4 x 8	Pob. 2 C5-5A x Pob. 2 C5-5A	117.9 abcdf
6 x 7	Pob.2C5-11B x Pob.3C8-3 A	116.9 abcdf
7 x 10	Pob.3C8-3 A x Pob.3C8-3 A	116.0 abcdf
2 x 4	Pob.1C5-12 A x Pob. 2 C5-5A	115.7 abcdf
2 x 6	Pob.1C5-12 A x Pob.2C5-11B	115.6 abcdf
4 x 5	Pob. 2 C5-5A x Pob.2 C5-20B	115.5 abcdf
1 x 7	Pob.1C5-12 A x Pob.3C8-3 A	114.9 abcdf
5 x 7	Pob.2 C5-20B x Pob.3C8-3 A	114.4 abcdf
3 x 10	Pob.2C8-23 A x Pob.3 C8-3B	114.4 abcdef
1 x 9	Pob.1C5-12 A x Pob.3 C8-1 A	113.7 abcdef
2 x 8	Pob.1C5-12 A x Pob.3 C5 -4 A	113.6 abcdef
5 x 9	Pob.2 C5-20B x Pob.3 C8-1 A	112.9 abcdef
2 x 7	Pob.1C5-12 A x Pob.3C8-3 A	111.7 abcdef
5 x 8	Pob.2 C5-20B x Pob.3 C5 -4 A	111.3 bcdef
3 x 9	Pob.2C8-23 A x Pob.3 C8-1 A	110.6 bcdef
3 x 8	Pob.2C8-23 A x Pob.3 C5 -4 A	110.6 bcdef
1 x 5	Pob.1C5-12 A x Pob.2 C5-20B	108.9 bcdef
4 x 6	Pob. 2 C5-5 A x Pob.2C5-11B	108.9 bcdef
1 x 6	Pob.1C5-12 A x Pob.2C5-11B	108.2 bcdef
4 x 7	Pob. 2 C5-5 A x Pob.3C8-3 A	108.0 bcdef
3 x 7	Pob.2C8-23 A x Pob.3C8-3 A	107.5 bcdef
7 x 8	Pob.3C8-3 A x Pob.3 C5 -4 A	106.7 bcdef
8 x 9	Pob.3 C5 -4 A x Pob.3 C8-1 A	106.1 bcdef
1 x 2	Pob.1C5-12 A x Pob.1C5-12 A	104.9 cdef
3 x 6	Pob.2C8-23 A x Pob.2C5-11B	104.0 cdef
1 x 3	Pob.1C5-12 A x Pob.2C8-23 A	103.8 cdef
2 x 3	Pob.1C5-12 A x Pob.2C8-23 A	103.0 cdef
3 x 4	Pob.2C8-23 A x Pob. 2 C5-5A	101.0 def
8 x 10	Pob.3 C5 -4 A x Pob.3 C8-3B	97.9 ef
2 x 5	Pob.1C5-12 A x Pob.2 C5-20B	97.8 f
3 x 5	Pob.2C8-23 A x Pob.2 C5-20B	87.3

Cruzas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Las cruzas con los efectos más altos de ACE fueron: 4x10, 5x10, 1x8, 3x8 y 6x8 con valores significativos que fluctuaron de 8.36 a 9.91; no obstante, estas cruzas no siempre fueron las de mayor rendimiento (Cuadro 6), lo que contradice a la hipótesis de que el alto rendimiento de las cruzas se debe a altos efectos de ACE. Por ejemplo, la cruza 3x8 tuvo un efecto alto de ACE (8.50) pero no estuvo en el grupo de mayor rendimiento, y la cruza 9x10 de

alto rendimiento tuvo un bajo efecto de ACE (-1.00). Por tanto, una cruza de alto rendimiento deberá provenir dos líneas de alta ACG y que además el efecto s_{ij} de su cruza sea positivo. De las once cruzas de mayor rendimiento (Cuadro 4), nueve mostraron esta coincidencia; sólo las cruzas 6x8 y 1x8 no la mostraron, aunque en ambas los efectos g_i y s_{ij} también fueron positivos y estadísticamente significativos. Estos resultados apoyan la hipótesis de que

las líneas de alta ACG producen cruzas de mayor rendimiento que las líneas de baja ACG.

Cuadro 5. Orden de las 10 líneas de maíz con base en su ACG estimada para un ambiente (TPT 93B) y con base en sus efectos g_i estimados en el análisis combinado de 5 ambientes (TPT 97B a TPT 99A)

Línea	Valor ACG (t ha ⁻¹) (1 ambiente)	Orden ACG (1 ambiente)	Efecto (g_i) g/planta (5 ambientes)	Orden efecto (g_i) (5 ambientes)
1	11.1 b	7	-0.29	5
2	10.7 b	8	-1.55	6
3	14.4 a	1	-9.60**	8
4	13.0 b	2	2.92**	3
5	11.9 b	4	-3.19	7
6	11.7 b	6	1.88	4
7	12.0 b	3	-0.21	5
8	11.9 b	4	-1.54	6
9	11.8 b	5	4.26**	2
10	11.8 b	5	7.32**	1

** Diferente de cero a una probabilidad de 0.01

Líneas con la misma letra son estadísticamente iguales en valor de ACG (Tukey, 0.05)

Valor de ACG = $g_i + \mu$; μ = media de las cruzas

TPT 93B = Evaluación realizada en 1993 en Tepetates Ver., en el ciclo agrícola invierno - primavera.

TPT 97B a 99A = Evaluaciones realizadas de 1997 a 1999 en Tepetates Ver., en el ciclo agrícola invierno primavera y verano - otoño.

En cambio, las cruzas 8x10, 3x5, 2x5, 8x9, 4x6, 4x7 y 1x6 al tener los efectos más bajos de ACE (Cuadro 6), tuvieron rendimientos bajos (Cuadro 4). Además las líneas de las cruzas 3x5 y 2x5 tuvieron baja ACG.

La estructura del valor genotípico de una craza simple permite conocer los tipos de acción génica que en ella ope-

ran, según el modelo genotípico: $X_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij}$. En este modelo, ($g_i + g_j$) representa la suma de los efectos aditivos de los genes de la línea i y los de la línea j, y s_{ij} es el efecto de interacción o dominancia de los genes de la línea i con los de la línea j.

En las 45 cruzas evaluadas se detectaron las siguientes variaciones en sus componentes (Cuadro 7): 1) Los efectos aditivos son los más importantes; es decir, ($g_i + g_j$) > s_{ij} , como en la craza 9x10. 2) La dominancia es la más importante; es decir, $s_{ij} > (g_i + g_j)$, como en la craza 1x8. 3) Aditividad y dominancia son igualmente importantes; es decir, ($g_i + g_j$) = s_{ij} , como en la craza 4x10; ello implica que la craza 9x10 no sufrirá depresión endogámica y podrá manejarse como variedad mejorada en generaciones avanzadas de apareamiento aleatorio; que la craza 1x8 sufrirá alta depresión endogámica, por lo que sólo se podrá manejar como híbrido F₁, y que la craza 4x10 sufrirá depresión endogámica intermedia, en comparación con las otras dos.

El mejoramiento genético por hibridación tendrá éxito si las dos líneas de un híbrido son de alta ACG, condición que por sí misma asegura un alto rendimiento. Si adicionalmente el híbrido presenta un efecto positivo alto de ACE, su capacidad de rendimiento aumentará, como es el caso de la craza 4x10. Los componentes del valor genotípico de las cruzas de bajo rendimiento (Cuadro 7), indican que en ellas ocurren efectos negativos de ACE, y efectos bajos de ACG de una o de ambas líneas, como es el caso de las cruzas 3x5 y 2x5.

Cuadro 6. Efectos de ACE (S_{ij}) de 45 cruzas simples entre diez líneas de maíz. Tepetates Ver. 1997-1999

Cruza	Efecto ACE	Cruza	Efecto ACE	Cruza	Efecto ACE	Cruza	Efecto ACE	Cruza	Efecto ACE
1x2	-6.50*	2x4	1.13	3x7	4.07	5x6	6.20	7x9	3.96
1x3	0.43	2x5	-10.72**	3x8	8.50**	5x7	4.57	7x10	-4.33
1x4	3.61	2x6	2.04	3x9	2.77	5x8	2.84	8x9	-9.82**
1x5	-0.82	2x7	0.22	3x10	3.45	5x9	-1.37	8x10	-21.05**
1x6	-6.63*	2x8	3.45	4x5	2.60	5x10	9.84**	9x10	-1.00
1x7	2.20	2x9	6.50*	4x6	-9.13**	6x7	2.01		
1x8	9.22**	2x10	2.92	4x7	-7.93*	6x8	8.36**		
1x9	-3.44	3x4	-5.50	4x8	3.26	6x9	0.35		
1x10	1.93	3x5	-13.14**	4x9	2.06	6x10	-1.68		
2x3	0.95	3x6	-1.53	4x10	9.91**	7x8	-4.76		

*, ** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente

Cuadro 7. Estructura del valor genético de las 45 cruza simples. Tepetates Ver. 1997-1999.

Cruza	\bar{X}_{ij}	μ	g_i	g_j	S_{ij}
4X10	133.4	113.2	2.92**	7.32**	9.91**
5X10	127.2	113.2	-3.19**	7.32**	9.84**
9X10	123.8	113.2	4.26**	7.32**	-1.00
4X9	122.5	113.2	2.92**	4.26**	2.06
2X9	122.4	113.2	-1.55	4.26**	6.50*
1X10	122.2	113.2	-0.29	7.32**	1.93
6X8	121.9	113.2	1.88	-1.54	8.36**
2X10	121.9	113.2	-1.55	7.32**	2.92
7X9	121.2	113.2	-0.21	4.26**	3.96
6X10	120.7	113.2	1.88	7.32**	-1.68
1X8	120.6	113.2	-0.29	-1.54	9.22**
6X9	119.7	113.2	1.88	4.26**	0.35
1X4	119.5	113.2	-0.29	2.92**	3.61
5X6	118.1	113.2	-3.19**	1.88	6.20
4X8	117.9	113.2	2.92**	-1.54	3.26
6X7	116.9	113.2	1.88	-0.21	2.01
7X10	116.0	113.2	-0.21	7.32**	-4.33
2X4	115.7	113.2	-1.55	2.92**	1.13
2X6	115.6	113.2	-1.55	1.84	2.04
4X5	115.5	113.2	2.92**	-3.19	2.60
1X7	114.9	113.2	-0.29	-0.22	2.20
5X7	114.4	113.2	-3.19**	-0.21	4.57
3X10	114.4	113.2	-9.60	7.32**	3.45
1X9	113.7	113.2	-0.29	4.26**	-3.44
2X8	113.6	113.2	-1.55	-1.54	3.45
5X9	112.9	113.2	-3.19**	4.26**	-1.37
2X7	111.7	113.2	-1.55	-0.21	0.22
5X8	111.3	113.2	-3.19**	-1.54	2.84
3X9	110.6	113.2	-9.60**	4.26**	2.77
3X8	110.6	113.2	-9.60**	-1.54	8.50**
1X5	108.9	113.2	-0.29	-3.19**	-0.82
4X6	108.9	113.2	2.92**	1.88	-9.13**
1X6	108.2	113.2	-0.29	1.88	-6.63*
4X7	108.0	113.2	2.92**	-0.21	-7.93*
3X7	107.5	113.2	9.6**	-0.21	4.07
7X8	106.7	113.2	-0.21	-1.54	-4.76
8X9	106.1	113.2	-1.54	4.26**	-9.82**
1X2	104.9	113.2	-0.29	-1.55	-6.50*
3X6	104.0	113.2	-9.60**	1.88	-1.53
1X3	103.8	113.2	-0.29	-9.60**	0.43
2X3	103.0	113.2	-1.55	-9.60**	0.95
3X4	101.0	113.2	-9.60**	2.92**	-5.50
8X10	97.9	113.2	-1.54	7.32**	-21.05**
2X5	97.8	113.2	-1.55	-3.19**	-10.72**
3X5	87.3	113.2	-9.60**	-3.19**	-13.14**

*, ** Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente.

CONCLUSIONES

Estas conclusiones se fundamentan en dos enfoques; en uno se considera como una muestra a las 10 líneas autofecundadas, y en el otro como un grupo selecto de líneas.

En la muestra de 10 líneas derivadas de la raza Tuxpeño, la varianza de los efectos aditivos (varianza aditiva) fue mayor que la varianza de los efectos no aditivos (varianza de dominancia), en cuanto al rendimiento de mazorca. Tales líneas mostraron variación en sus efectos de aptitud combinatoria general (g_i) y en los efectos de aptitud combinatoria específica (S_{ij}) de sus cruza.

Una cruza simple será de alto rendimiento si sus dos líneas progenitoras son de alta ACG o si su efecto de ACE es alto y al menos una de sus líneas es de alta ACG. El máximo rendimiento de una cruza ocurre cuando sus dos líneas son de alta ACG y su efecto de ACE también es alto. En cambio, si las líneas son de baja ACG y su efecto de ACE es bajo, el rendimiento de la cruza será bajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Antuna G O, F R Sánchez, E G del Río, N A R Torres, L B García (2003)** Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. Rev. Fitotec. Mex. 26(1): 11-17.
- Beck D L, S K Vasal, J Crossa (1990)** Heterosis and combining ability of CIMMYT'S tropical early and intermediate maturity maize (*Zea mays* L.) germoplasm. Maydica 35:279-285.
- Caballero H F, T Cervantes S (1990)** Estudio genético y taxonómico de poblaciones de maíz de la raza Tuxpeño. Agrociencia serie Fitociencia 1 (2): 43- 64.
- Cockerham C C (1954)** An extension of partitioning hereditary variance for analysis of covariance among relatives when epistasis is present. Genetics 39:859-882.
- Comstock R E, H F Robinson, P H Harvey (1949)** A breeding procedure designed to make maximum of both general and specific combining ability. Agron. J. 41:360-367.
- Crossa J S, K Vasal, D L Beck (1990)** Combining ability estimates of CIMMYT'S tropical late yellow maize germoplasm. Maydica 35:273-278.
- De La Cruz L, J R Parra, J L R Díaz, J J S González, M M M Rivera, M C Bonaparte, S A H de la Peña, S M Mungía (2003).** Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. Rev. Fitotec. Mex. 26(1):1-10.
- Gardner C O (1963)** Estimates of genetic parameters in cross fertilizing plants and their implications in plant breeding. In: Statistical Genetics and Plant Breeding. W D Hanson, H F Robinson (eds). NAS-NRC Publication 982: 225-252.
- Gardner C O, S A Eberhart (1966)** Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. Biometrics 22: 439-452.
- Gómez M N, R B Valdivia, A H Mejía (1988)** Dialélico integrado con líneas de diferentes programas de maíz para la región cálida. Rev. Fitotec. Mex. 11:103-120.
- Griffing B J (1956)** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Aust. Biol. Sci. 9: 463-493.

- Han G C, S K Vasal, D L Beck, E Elias (1991)** Combining ability of inbred lines derived from CIMMYT maize (*Zea mays* L.) germoplasm. *Maydica* 36:57-67.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (1996)**. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Publicación especial No 16. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 102 p.
- Lonnquist J H (1965)** Métodos de selección útiles para el mejoramiento dentro de poblaciones. Trad. por M. Gutiérrez G. *Fitotecnia Latinoamericana* 1 y 2: 1-10.
- Martín del Campo V S, G J D Molina (1982)** Aptitud combinatoria, heterosis y estabilidad en tres grupos de poblaciones de maíz en el Norte-Centro de México. *Agrociencia* 47: 103-117.
- Molina G J D (1988)** Selección familiar combinada alternante. *Agrociencia* 74: 65-71.
- Moll R H, H F Robinson (1967)** Quantitative Genetics in investigations of Yield of Maize. *Sonderabdrucks aus, Der Zuckter*, 37. Band, Heft 4, Spring-Verlag. Berlin. 37:191-199.
- Pérez T A, A Q Carballo, F G Castillo, J P Covarrubias (1991)** Identificación de patrones heteróticos de un grupo de variedades precoces de maíz . *Agrociencia* 2(2): 69-79.
- Ordas A (1991)** Heterosis in crosses between American and Spanish populations of maize. *Crop Sci.* 31:504-507.
- Parra J R, A R Hallauer (1997)** Utilization of exotic maize germplasm. *Plant Breeding* 14: 165-187.
- Reyes C P, L S Wortman, E J Wellhausen (1955)** Maíz híbrido para tierra caliente. Folleto de divulgación No. 18. Programa Cooperativo de la Secretaría y Ganadería de México y la Fundación Rockefeller.
- SAS Institute Inc. (1999)** SAS Online Doc, Versión 8 CD-ROM. SAS Institute, Inc., Cary, N.C.
- Sahagún C L, J D Molina, G F Castillo, J C Sahagún (1991)** Efecto de la selección masal en las varianzas genéticas de la variedad de maíz Zac-58. *Agrociencia* 2(1):65-79.
- Sprague G F, L A Tatum (1942)** General vs specific combining ability in single- crosses of corn. *Amer. Soc. Agron.* 43:923-932.
- Singh D (1973)** Diallel analysis for combining ability over several environments-II. *Indian J. of genetics and plant breeding* (33) 3:469-481.
- Vargas S J E, J D Molina, T C Santana (1982)** Selección masal y parámetros genéticos en la variedad de maíz Zac-58. *Agrociencia* 48:93-105.
- Vasal K S, G Srinivasan, S Pandey, H S Cordova, G C Han, F C Gonzalez (1992)** Heterotic patterns of ninety-two white tropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 37:259-270.
- Vasal K S, G Srinivasan, N A Vergara, F C González (1995)** Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de valles altos. *Rev. Fitotec. Mex.* 18:123-139.
- Wellhausen E J (1950)** El programa de mejoramiento del maíz en México. *In: Primera Asamblea Latinoamericana de Fitogenetistas.* 26/09/1949. Méx. D.F. pp: 119-149.
- Zhang Y, M S Kang (1997)** Diallel SAS: A SAS program for Griffing's diallel analysis. *Agron. J.* 89: 176-182.