

Parámetros genéticos y heterosis en líneas derivadas de poblaciones nativas de maíz tropical de Tamaulipas*

Heterosis and genetic parameters in lines derived from native populations in tropical corn Tamaulipas

Javier González Martínez¹, José Alberto López Santillán¹, Benigno Estrada Drouaillet¹, Rafael Delgado Martínez¹, José Agapito Pecina Martínez², Edmundo Sostenes Varela Fuentes¹, Eduardo Osorio Hernández¹ y Mario Rocandio Rodríguez^{1§}

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas- Facultad de Ingeniería y Ciencias. Centro Universitario Adolfo López Mateos. Victoria, Tamaulipas. C. P. 87149, México. ²Colegio de Postgraduados-Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Carretera México-Texcoco, km 36.5. C. P. 56230, Montecillo, México. (a2123018007@alumnos.uat.edu.mx; jalopez@uat.edu.mx; benestrada@uat.edu.mx; rdelgado@uat.edu.mx; jpecina@colpos.mx; svarela@uat.edu.mx; eosorio@uat.edu.mx). §Autor para correspondencia: m.rocandio.r@hotmail.com.

Resumen

Se determinó los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) para rendimiento de grano y sus componentes, además de estimar el grado de dominancia, heterosis y heredabilidad, con el propósito de identificar y evaluar patrones heteróticos entre líneas endogámicas de maíz desarrolladas a partir de germoplasma nativo del centro y sur de Tamaulipas. Las 30 cruzas directas y recíprocas, así como sus progenitores se evaluaron en Güemez y Río Bravo, estado de Tamaulipas, durante el ciclo otoño-invierno de 2012-2013. La unidad experimental consistió de un surco de 5 m de longitud, con una distancia entre surcos de 0.8 m y de 0.25 m entre plantas. Las evaluaciones se establecieron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se midió rendimiento de grano (RGha), longitud de mazorca (LMZ), diámetro de mazorca (DMZ), número de granos por mazorca (NGM), altura de planta (AP), peso individual de grano (PIG) y días a floración masculina (DFM). Para estimar los efectos de ACG y ACE se empleó el método I de Griffing. Los resultados obtenidos del análisis combinado indicaron diferencias significativas para los genotipos. Los progenitores L1, L2, L4, L5 y L6 estuvieron involucrados en las mejores cruzas para rendimiento de grano, mientras que las cruzas L1 × L5, L2 × L4 y L5 × L6 mostraron efectos positivos de heterosis

Abstract

The effects of general combining ability (ACG) and specific (ACE) for grain yield and its components was determined, in addition to estimating the degree of dominance, heterosis and heritability, in order to identify and assess heterotic patterns among corn inbred lines developed from native germplasm of central and southern Tamaulipas. The 30 direct and reciprocal crosses and their parents were evaluated in Güemez and Río Bravo, Tamaulipas state, during the autumn-winter 2012-2013 cycle. The experimental unit consisted of a row of 5 m in length, with a row spacing of 0.8 m and 0.25 m between plants. Evaluations were established in a randomized complete design with three replications blocks. Grain yield (RGha), ear length (LMZ), ear diameter (DMZ), number of grains per ear (NGM), plant height (AP), single grain weight (PIG) and length were measured at flowering male (DFM). To estimate the effects of ACG and ACE, was used I Griffing method. The results of combined analysis showed significant differences for genotypes. The L1, L2, L4, L5 and L6 parents were involved in the best crosses for grain yield, while a cross L1 × L5, L2 × L4 and L5 × L6 showed positive effects of heterosis and ACE. The crosses L4 × L3, L4 × L5, L5 × L4, L5 × L6, L6 × L4,

y ACE. Las cruzas $L4 \times L3$, $L4 \times L5$, $L5 \times L4$, $L5 \times L6$, $L6 \times L4$, $L6 \times L5$ mostraron rendimientos de grano superiores a la media. Los efectos aditivos fueron el componente principal para la expresión de las variables evaluadas.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria, dialélico, germoplasma nativo.

Introducción

La formación de variedades sintéticas y de híbridos en maíz (*Zea mays* L.) es un proceso continuo que involucra el desarrollo de líneas y la identificación de las mejores combinaciones híbridas (De la Cruz *et al.*, 2010; Borghi *et al.*, 2012; Badu *et al.*, 2013). Gardner y Eberhart (1966) señalan que utilizar un análisis de cruas dialélicas permite estimar los componentes de la varianza genética, así, como parámetros genéticos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), los cuales son usados para identificar las combinaciones superiores y así, poder seleccionar los mejores progenitores para el diseño de estrategias de mejoramiento más eficientes (Gutiérrez *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2013). De acuerdo con Sprague y Tatum (1942), la ACG corresponde al comportamiento promedio de un progenitor en una serie de cruzamientos y la ACE como la desviación de cada cruzamiento con respecto al comportamiento medio de los progenitores que intervienen en la crua. La información de las cruas dialélicas también es útil para estudiar la heterosis del rendimiento y sus componentes.

En maíz, distintos trabajos han señalado la importancia de incrementar el rendimiento mediante la heterosis (Vasal *et al.*, 1992; Vasal *et al.*, 1995; Antuna *et al.*, 2003; Reyes *et al.*, 2004; De la Cruz *et al.*, 2010). La heterosis es el resultado de la adición e interacción de un gran número de factores genéticos, aportados por los progenitores y reunidos en el híbrido resultante, basándose en las hipótesis de dominancia y de sobredominancia (Allard, 1999), por lo que, en términos de acción génica, la heterosis se debe principalmente a efectos de interacción entre alelos y de dominancia (Crown, 1999). Así, para aprovechar los efectos positivos de la heterosis en la formación de híbridos de maíz, se busca identificar fuentes de germoplasma con potencial heterótico (Márquez, 1988; Gutiérrez *et al.*, 2004; Esquivel *et al.*, 2011).

El estado de Tamaulipas es considerado dentro de las áreas que son centro de origen y diversidad genética del maíz (*Zea mays* L.) en México (Ortega *et al.*, 1991; SAGARPA,

$L6 \times L5$ yields showed above average grain. Additive effects were the main component for the expression of the variables evaluated.

Keywords: *Zea mays* L., combining ability, diallel, native germplasm.

Introduction

The formation of synthetic varieties and hybrids of corn (*Zea mays* L.) is an ongoing process that involves the development of lines and identifying the best hybrid combinations (De la Cruz *et al.*, 2010; Borghi *et al.*, 2012; Badu *et al.*, 2013). Gardner and Eberhart (1966) report that use analysis diallel crosses to estimate the components of the genetic variance, as well as specified (ACE) genetic parameters of general combining ability (ACG) and which are used to identify superior combinations and thus able to select the best parents for the design of more efficient breeding strategies (Gutiérrez *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2013). According to Sprague and Tatum (1942), the average GCA corresponds to the behavior of a parent in a series of crosses and ACE as the deviation of each crossing over the average behavior of the parents involved in the crosses. The information in the diallel crosses is also useful to study the heterosis of yield and its components.

Corn, other studies have indicated the importance of increasing performance by heterosis (Vasal *et al.*, 1992; Vasal *et al.*, 1995; Antuna *et al.*, 2003; Reyes *et al.*, 2004; De la Cruz *et al.*, 2010). Heterosis is the result of adding and interaction of a large number of genetic factors, provided by parents and assembled in the resulting hybrid, based on the assumption of dominance and Overdominance (Allard, 1999), so that, in terms gene action, heterosis is mainly due to interaction effects between alleles and dominance (Crown, 1999). Thus, to achieve the positive effects of heterosis in the formation of hybrid corn is to identify sources of germplasm heterotic potential (Márquez, 1988; Gutiérrez *et al.*, 2004; Esquivel *et al.*, 2011).

Tamaulipas state is considered within the areas that are centers of origin and genetic diversity of corn (*Zea mays* L.) in Mexico (Ortega *et al.*, 1991; SAGARPA, 2012), which is established in most municipalities; in tropical regions of central and southern native germplasm it is still used, mainly because improved cultivars represent high investment and sometimes do not show adaptation

2012), el cual se establece en la mayoría de los municipios; en las regiones tropicales del centro y sur aún se utiliza germoplasma nativo, principalmente porque los cultivares mejorados representan alta inversión y en ocasiones no presentan adaptación a las condiciones específicas del clima y de los sistemas de producción (Reyes y Cantú, 2005; Castro *et al.*, 2011), Aun cuando está demostrado el potencial agronómico y heterótico que tienen algunas poblaciones nativas de Tamaulipas (Pecina *et al.*, 2011; Pecina *et al.*, 2013), su aprovechamiento ha sido mínimo, debido entre otras causas a la falta de continuidad en trabajos de investigación, y a la escasa información sobre su comportamiento y aprovechamiento de las poblaciones nativas de maíz en estas regiones.

En este contexto, se hace apremiante la necesidad de generar programas de mejoramiento específicos, con fines particulares y evitar una probable pérdida de este germoplasma (Castro *et al.*, 2013). Los objetivos de este estudio fueron, analizar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) en el rendimiento y sus componentes de seis líneas de maíz y sus combinaciones híbridas, además, de estimar el grado de dominancia, heterosis y heredabilidad para identificar y evaluar los patrones heteróticos entre las líneas endogámicas de maíz desarrolladas a partir del germoplasma nativo del centro y sur de Tamaulipas.

Material y métodos

Ubicación de los experimentos

Durante el ciclo agrícola otoño-invierno de 2012-2013, bajo condiciones de riego, fueron establecidos los trabajos en dos localidades de Tamaulipas: Güemez (23° 45' latitud norte y 98° 59' longitud oeste, altitud de 145 m, temperatura y precipitación promedio anual de 22 °C y 700 mm, respectivamente) y Rio Bravo (25° 57' latitud norte y 98° 01' longitud oeste, altitud de 25 m, temperatura y precipitación promedio anual de 22.6 °C y 653 mm, respectivamente).

Material genético

El material genético utilizado fue el resultado de un dialélico completo entre seis líneas endogámicas S₃ (Cuadro 1) considerando sus cruza directas y recíprocas (30 cruza) más las seis líneas endogámicas S₃ como progenitores y como testigos se incluyeron los híbridos comerciales H-440

to the specific weather conditions and production systems (Reyes and Cantú, 2005; Castro *et al.*, 2011), even if it is proven agronomic potential and heterotic they have some native populations of Tamaulipas (Pecina *et al.*, 2011; Pecina *et al.*, 2013), its use has been minimal, due inter alia to lack continuity in research, and little information on their behavior and use of native corn populations in these regions.

In this context, it is a pressing need to generate specific improvement programs, with particular purposes and avoid a likely loss of this germplasm (Castro *et al.*, 2013). The objectives of this study were to analyze the effects of general combining ability (ACG) and specific (ACE) on yield and its components six corn lines and their hybrid combinations also estimate the degree of dominance, heterosis and heritability to identify and evaluate the heterotic patterns among corn inbred lines developed from the native germplasm central and southern Tamaulipas.

Materials and methods

Location of the experiments

During the season autumn-winter 2012-2013, under irrigation, works were established at two locations in Tamaulipas: Güemez (23° 45' north latitude and 98° 59' west longitude, altitude 145 m, average temperature and rainfall annual of 22 °C and 700 mm, respectively) and Rio Bravo (25° 57' north latitude and 98° 01' west longitude, altitude of 25 m, annual average temperature 22.6 °C and 653 mm rainfall respectively).

Genetic material

The genetic material used was the result of a complete diallel six inbred lines S₃ (Table 1) considering their direct and reciprocal crosses (30 cross) over the six inbred lines S₃ as parents and as witnesses commercial hybrid H-440 were included and H-339 formed by the breeding program INIFAP corn in the Campo Experimental Rio Bravo, Tamaulipas. Which produced a total of 38 genotypes.

The parental lines were formed from native populations in tropical corn predominance of Tuxpeño race in all collections, but with influences from other races as Vandeño (influence on all collections), Mouse (influence

y H-339 formados por el programa de mejoramiento genético de maíz del INIFAP en el Campo Experimental de Rio Bravo, Tamaulipas. Lo que produjo un total de 38 genotipos.

Las líneas progenitoras, fueron formadas a partir de poblaciones nativas de maíz tropical con predominancia de la raza Tuxpeño en todas las colectas, pero con influencias de otras razas como Vandeño (influencia en todas las colectas), Ratón (influencia en las colectas de Padilla), Olotillo (influencia en las colectas de Llera) y Cónico Norteño (influencia en las colectas de Tula) en el estado de Tamaulipas, e identificadas como genotipos sobresalientes en rendimiento y con alta precocidad en estudios previos (Pecina *et al.*, 2009; Pecina *et al.*, 2011).

Conducción de experimentos

Las siembras se realizaron el 6 y 10 de febrero en el Campo Experimental de Rio Bravo y Güemez, respectivamente, los 38 genotipos se evaluaron en condiciones de riego en ambas localidades. La siembra se llevó a cabo en forma manual, depositando dos semillas cada 0.25 m entre matas y 0.80 m entre surcos. Se realizó un aclareo cuando las plantas presentaron la quinta y sexta hoja, dejando una planta por mata.

La fertilización se realizó con las dosis 135-50-00 y 80-60-00 en Rio Bravo y Güemez, respectivamente, de la cual se aplicó la mitad del nitrógeno y el total del fosforo en la siembra, y el resto del nitrógeno en la segunda escarda en ambas localidades. El control de la maleza e insectos se llevó a cabo de acuerdo a lo recomendado para la producción de maíz en la zona norte-centro de Tamaulipas (Reyes *et al.*, 1990). Las cosechas se efectuaron en junio-julio de 2013.

Diseño y unidad experimental

Para la evaluación de los 38 genotipos, se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió de un surco de 5 m de longitud y de 0.8 m de ancho, dando una área de parcela útil de 4 m² con 21 plantas por surco, que corresponden a una densidad de población de 50 mil plantas ha⁻¹.

Caracteres evaluados

Se determinaron los días a floración masculina (DFM), contando desde el día de la siembra hasta el momento en que el 50% de las plantas de cada parcela liberaron polen; altura de planta (AP), medida en cm desde el nivel del suelo

on collections Padilla), Olotillo (influence on collections Llera) and Northern Conical (influence on the collections of Tula) in the state of Tamaulipas, and identified as outstanding performance and precocity in previous studies genotypes (Pecina *et al.*, 2009; Pecina *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Líneas endogámicas S₃ de maíz utilizada en un diseño de apareamiento aleatorio derivadas de germoplasma nativo del centro y sur de Tamaulipas.

Table 1. S₃ corn inbred lines used in a random mating design derived from native germplasm of central and southern Tamaulipas.

Línea	Población	Localidad y municipio de origen
L1	3001	Ejido Concepción, Padilla, Tamaulipas
L2	3007	Colonia Agrícola las Cruces, Tula, Tamaulipas
L3	3012	Ejido Guadalupe Victoria, Tula, Tamaulipas
L4	3033	Ejido El Olivo, Llera, Tamaulipas
L5	3040	Ejido El Olivo, Llera, Tamaulipas
L6	3001	Ejido Concepción, Padilla, Tamaulipas

Conducting experiments

Sowing was performed on 6 and 10 February in the Experimental Rio Bravo and Güemez, respectively, the 38 genotypes were evaluated under irrigated conditions in both locations. Planting was carried out manually, placing two seeds every 0.25 m between plants and 0.80 m between rows. It is thinned when the plants presented the fifth and sixth leaf, leaving one plant per hill.

Fertilization was done with 80-60-00 and 135-50-00 dose Rio Bravo and Güemez, respectively, of which half of the nitrogen and total phosphorus in the seed was applied, and the rest of nitrogen the second weeding in both locations. Control weeds and insects are carried out in accordance with the recommendations for corn production in the north-central Tamaulipas (Reyes *et al.*, 1990). Harvests were held in June-July 2013.

Design and experimental unit

The experimental design was randomized complete block with three replications was used to evaluate 38 genotypes. The experimental unit consisted of a row of 5 m long and

hasta el ápice de la panícula. Al momento de la cosecha se seleccionaron cinco mazorcas a las cuales se les midió longitud (LMZ) y diámetro medio de la mazorca (DMZ) en cm; número de granos por mazorca (NGM); peso individual de grano (PIG) se obtuvo en g con el promedio del peso de una muestra con 100 granos tomados al azar de cada parcela experimental y rendimiento de grano (RGha) se determinado en kg ha⁻¹ ajustándolo al 15% de humedad.

Análisis estadístico

El análisis de varianza para calcular la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de las líneas progenitoras y sus cruzas (directas y recíprocas) se hizo de acuerdo al método 1 de Griffing (1956), usando el programa Diallel-SAS Method I propuesto por Zhan y Kang (2003), mediante el software SAS V.9.0. (SAS Institute, 2002). Los valores superiores de las variables en estudio, son las que superan el valor de la media más el error estándar ($\mu + \sigma$).

El efecto de heterosis porcentual se calculó en relación al progenitor medio de forma combinada, con la fórmula $H = (F_1 - PM) / PM \times 100$; donde H= heterosis (%); F_1 = media fenotípica de la población F_1 ; $PM = (P_i + P_j) / 2$, media fenotípica del progenitor medio; P_i y P_j = media fenotípica del padre i y j. El grado promedio de dominancia, se analizó de acuerdo a los criterios descritos por Molina (1992). La estimación de la σ_A^2 y σ_B^2 se realizó a partir de los componentes de varianza del análisis de varianza combinado. La heredabilidad en sentido amplio se estimó usando la fórmula $H^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_a^2 + \sigma_{ga}^2 + \sigma_g^2)$, donde cada componente se estimó de acuerdo a los procedimientos descritos por Molina (1992).

Resultados y discusión

El análisis de varianza mostró que el efecto de localidades fue significativo ($p \leq 0.01$) para todas las variables evaluadas, excepto para PIG (Cuadro 2), lo que demuestra considerable contraste entre las localidades de cultivo, en donde influyeron además de las características naturales de cada localidad, las diferentes fechas de siembra y el manejo del cultivo en cada una de ellas. El efecto de genotipos presentó diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) en todas las variables evaluadas, por lo que se infiere la existencia de diversidad genética del origen de los progenitores, haciendo posible la identificación de cruzas con rendimientos contrastantes, además de diferencias en el porte de la planta y de patrones varietales.

0.8 m wide, giving a useful plot area of 4 m² with 21 plants per row, corresponding to a population density of 50 000 plants ha⁻¹.

Characters evaluated

The day were determined to male flowering (DFM), counting from the day of planting until the time that 50% of the plants in each plot freed pollen; plant height (AP), measured in cm from ground level to the apex of the panicle. At the time of harvest to five pods which are measured length (LMZ) and average diameter of the cob (DMZ) in cm they were selected; number of grains per ear (NGM); Individual grain weight (PIG) g was obtained with the average weight of a sample of 100 grains taken at random from each experimental plot and grain yield (RGha) is determined in kg ha⁻¹ adjusted to the 15% moisture.

Statistic analysis

The variance analysis to calculate the general combining ability (ACG) and specific (ACE) of the parental lines and crosses (direct and reciprocal) was made according to Method 1 of Griffing (1956), using the program Diallel-SAS Method I proposed by Zhan and Kang (2003), using SAS software V.9.0. (SAS Institute, 2002). Higher values of the variables under study are those that exceed the value of the mean plus the standard error ($\mu + \sigma$).

The effect of heterosis percentage was calculated relative average parent in combination with the formula $H = (F_1 - PM) / PM \times 100$; where H= heterosis (%); F_1 = mean phenotypic population; F_1 ; $PM = (P_i + P_j) / 2$, half the average phenotypic parent; P_i and P_j = mean phenotypic parent i and j. The average dominance degree was analyzed according to the criteria described by Molina (1992). Estimating σ_A^2 and σ_B^2 was performed from the variance components combined analysis of variance. The broad sense heritability was estimated using the formula $H^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_a^2 + \sigma_{ga}^2 + \sigma_g^2)$, where each component was estimated according to the procedures described by Molina (1992).

Results and discussion

Analysis of variance showed that the effect of localities was significant ($p \leq 0.01$) for all variables except for PIG (Table 2), demonstrating significant contrast between the

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado a través de dos localidades, Rio Bravo y Güemez, Tamaulipas, México, 2013.

Table 2. Mean squares analysis of variance combined across two locations, and Güemez Rio Bravo, Tamaulipas, Mexico, 2013.

FV	G1	RGha (kg ha ⁻¹)	LMZ (cm)	DMZ (cm)	NGM	AP (cm)	PIG (g)	DFM
Localidad (L)	1	280297882**	97.7**	14.26**	90765.8**	60223.5**	1060.5 ns	2242.7**
Bloques(L)	4	774743.5 ns	0.8 ns	0.07 ns	4311.6*	659.4**	1498.8 ns	3.9 ns
Genotipos (G)	35	2408593.5**	2.1**	0.17 **	4809.3**	422.8**	2246.2**	27.2**
ACG	5	10906018.3**	5.4**	0.61**	8146.3**	881.0**	7901.7**	64.8**
ACE	15	778441.5 ns	1.1 ns	0.08 ns	2583.5 ns	202.9**	470.8 ns	13.8**
ER	10	1206270.5*	2.1*	0.12**	5922.6**	489.9**	2136.5 *	28.1**
EM	5	413434.2 ns	3.2**	0.08 ns	8784.7**	234.1*	970.7 ns	58.4**
G × L	35	710959.5 ns	1.8*	0.05 ns	2282 ns	111.4 ns	1508.0**	6.4*
L × ACG	5	396613.8 ns	1.7 ns	0.09 ns	1475.5 ns	121.9 ns	1393.6 ns	6.0 ns
L × ACE	15	458824.6 ns	2.0*	0.05 ns	3135.6 *	173.0*	1410.9 ns	5.4 ns
L × EM	5	1334412.4 ns	0.6 ns	0.06 ns	676.2 ns	12.9 ns	3438.0**	9.9*
L × ER	10	1067876.4 ns	1.5 ns	0.05 ns	1697.3 ns	46.4 ns	1643.2 ns	7.5*
Error	140	656394.3	1.2	0.05	1751.1	95.3	1150.4	4.1
CV (%)		19.7	7.0	5.23	10.0	5.0	15.0	2.6

** $p \leq 0.01$; * $p \leq 0.05$; ns= no significativo; L= localidad; bloques (L)= repetición anidado en L; G = genotipos; L × G= interacción L × G; ACG= aptitud combinatoria general; ACE= aptitud combinatoria específica; L × ACG = interacción L × ACG; L × ACE= interacción L × ACE; ER= efectos recíprocos; L × ER= interacción L × ER; EM= efectos maternos; L × EM= interacción L × EM; CV= coeficiente de variación; gl= grados de libertad.

Respecto a los efectos de ACG y ACE, se encontró que la ACG tuvo efectos significativos ($p \leq 0.01$) para todas las variables evaluadas, mientras que para ACE sólo mostraron significancia las variables AP y DFM, el valor de los cuadrados medios de ACG fueron mayores para todos los caracteres estudiados, lo que indica que los efectos de la ACG contribuyen más a la variación genética del rendimiento y sus componentes que los efectos de ACE. Esto indica la importancia de la acción génica aditiva sobre los efectos no aditivos en los caracteres evaluados (Pswarayi y Vivek, 2008), estos resultados coinciden con los reportados por Antuna *et al.* (2003), De la Cruz *et al.* (2010), Vasal *et al.* (1992) y Pech *et al.* (2010) quienes encontraron que la acción genética aditiva constituye el componente genético más importante del rendimiento y altura de planta. Cuando los efectos de acción génica aditiva son mayores que los de acción génica no aditiva, se sugiere mejorar la población por selección recurrente, de este modo Reyes *et al.* (2004) y De la Cruz *et al.* (2010) mencionan que primero hay que explotar la varianza aditiva por selección y posteriormente la varianza no aditiva por hibridación.

La interacción L × ACG no afectó estadísticamente a las variables evaluadas, lo que indica que los efectos de ACG de los padres son específicos de acuerdo con cada

towns of culture, where in addition to the natural features influenced of each locality, different planting dates and crop management in each. The effect of genotypes presented statistical differences ($p \leq 0.01$) in all variables, so it is inferred the existence of genetic diversity of the origin of the parents, enabling the identification of crosses with contrasting performances, as well as differences in the porte plant varieties and patterns.

Regarding the effects of ACG and ACE found that the ACG had significant effects ($p \leq 0.01$) for all variables, whereas ACE showed only significant variables AP and DFM, the value of the mean squares of ACG were higher for all traits, indicating that the effects of ACG contribute more to the genetic variation of yield and its components to the effects of ACE. This indicates the importance of additive gene action on non-additive effects in the characters evaluated (Pswarayi and Vivek, 2008), these results are consistent with those reported by Antuna *et al.* (2003), De la Cruz *et al.* (2010), Vasal *et al.* (1992) Pech *et al.* (2010) who found that the additive genetic action is the most important yield and plant height genetic component. When the effects of additive gene action outweigh the non additive gene action, it is suggested to improve the recurrent selection population, this mode

localidad, y sugiere seleccionar los progenitores con los mejores efectos de ACG para cada localidad. En cuanto a la interacción $L \times ACE$ las significancias ($p \leq 0.05$) para LMZ, NGM y AP, indican que las cruzas no mantuvieron su ACE a través de localidades para estas variables, mientras que RGha, DMZ, PIG y DFM mantuvieron su ACE en cada localidad. Por otro lado, la interacción $L \times ER$ y $L \times EM$ solo afectó estadísticamente ($p \leq 0.05$) a los DFM y PIG (Cuadro 2).

Los valores estimados de los efectos de ACG y ACE para las seis líneas y sus 15 cruzas directas se muestran en los cuadros 3 y 4. Para ACG en RGha por hectárea, los progenitores L5, L6 y L4 presentaron los valores positivos más altos con 455.0, 239.3 y 154.2 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Los valores registrados de ACG son indicadores de variabilidad en los progenitores, la cual es transmitida a su progenie, además de que el conocimiento de dicha variabilidad contribuye a la predicción que tendrá cada uno de los progenitores con su respectiva progenie (Zewdie *et al.*, 2000), y así seleccionar plantas que combinen características superiores entre progenitores. En lo referente a los efectos de ACE para RGR, las mejores cruzas fueron $L1 \times L5$, $L5 \times L6$, $L2 \times L4$ y $L3 \times L5$, con valores de 293.0, 203.4, 101.5 y 23.0 kg ha⁻¹, respectivamente, mientras que el resto de las cruzas presentaron valores negativos (Cuadro 4).

Reyes *et al.* (2004) and De la Cruz *et al.* (2010) mention that first you have to exploit the additive variance for selection and then the non-additive variance by hybridization.

Interaction $L \times ACG$ not statistically affect the evaluated variables, indicating that the effects of ACG parents are specific according to each location, and suggests parents choose the best ACG effects for each locality. As for the interaction $L \times ACE$ significances ($p \leq 0.05$) for LMZ, NGM and AP indicate that the cross did not keep their ACE across locations for these variables, while RGha, DMZ, PIG and DFM maintained their ACE in each locality. On the other hand, the interaction $L \times L \times ER$ and EM only affected significantly ($p \leq 0.05$) to the DFM and PIG (Table 2).

Estimates of the effects of GCA and SCA for the six lines and 15 direct crosses values are shown in Tables 3 and 4. For ACG in RGha per hectare, L5, L6 and L4 parents had the highest positive values with 455.0, 239.3 and 154.2 kg ha⁻¹, respectively (Table 3). Registered GCA values are indicators of variability in parents, which is transmitted to their progeny, in addition to the knowledge of this variability contributes to the prediction that will each parent with their respective offspring (Zewdie *et al.*, 2000), and so selecting plants that combine superior characteristics between parents. Regarding the effects of ACE RGR, the best crosses were

Cuadro 3. Aptitud combinatoria general (ACG) en seis progenitores de líneas endogámicas S₃ de maíz en dos localidades de Tamaulipas.

Table 3. General combining ability (ACG) in six parents of S₃ corn inbred lines at two locations in Tamaulipas.

Progenitor	RGha (kg ha ⁻¹)	LMZ (cm)	DMZ (cm)	NGM	AP (cm)	PIG (g)	DFM
L1	-671	-0.44	-0.16	-9.86	-6.37	-19.24	0.25
L2	-129.9	-0.18	0.02	0.61	0.72	0.27	-1.71
L3	-47.5	0.02	-0.04	-13.28	0.72	3.26	0.04
L4	154.2	0.18	0.03	11.36	0.55	0.46	1.22
L5	455.0	0.33	0.11	12.66	-0.01	2.56	0.13
L6	239.3	0.09	0.04	-1.49	4.39	12.69	0.07
ES <i>gi-gj</i>	87.2	0.12	0.02	4.5	1.05	3.65	0.22

RGha= rendimiento de grano por hectárea; LMZ= longitud de mazorca; DMZ= diámetro de mazorca; NGM= número de granos por mazorca; AP= altura de planta; PIG= peso individual de grano; DFM días a floración masculina; ES *sjj*= error estándar de los efectos de ACG.

Cuadro 4. Aptitud combinatoria específica (ACE) y heterosis (%) en 15 cruzas directas de seis líneas de maíz en dos localidades de Tamaulipas.**Table 4. Specific combining ability (ACE) and heterosis (%) in 15 direct crosses six corn lines at two locations in Tamaulipas.**

Cruza	RGha (kg ha ⁻¹)		LMZ (cm)		DMZ (cm)		NGM		AP (cm)		PIG (g)		DFM	
	ACE	H (%)	ACE	H (%)	ACE	H (%)	ACE	H (%)	ACE	H (%)	ACE	H (%)	ACE	H (%)
L1 × L2	-47.1	-10.5	0	-4.41	-0.03	-1.7	-2.51	-1.8	-0.66	-1.8	4.55	-3.3	0.01	2.5
L1 × L3	-41.1	13.4	-0.33	-1.14	-0.01	-0.8	-3.72	4.5	-6.27	0.3	-5.24	-9	0.43	9
L1 × L4	-23.4	-7.2	0.11	-0.97	-0.04	-1	11.17	-0.8	-3.52	-12.1	-13.31	-15.2	1.25	9.9
L1 × L5	293	36.4	0.1	6.32	0.16	11.6	17.78	17.5	3.62	1.7	9.99	6.9	-0.99	0.8
L1 × L6	-53.1	-12	0.54	2.91	0.05	2.7	12.84	-0.2	-1.97	-1	4.21	13.3	1.57	2.8
L2 × L3	-52.5	12.8	0.51	6.37	-0.01	0	7.26	17.4	-2.8	9	-5.3	-4.5	0.14	2.7
L2 × L4	101.5	7.7	0.23	1.62	0.01	1.4	-1.91	2.4	1.89	3.3	1.51	-0.3	-0.46	0.4
L2 × L5	-263.2	10.1	-0.28	7.41	-0.1	-0.4	-13.78	13.8	-7.09	4.7	-0.98	-10	-1.28	5
L2 × L6	-219.5	7.4	-0.18	-2.06	-0.01	5	0.8	7.7	6.07	6.2	0.59	-2.2	-0.39	0.1
L3 × L4	-50.7	-4.9	-0.01	-3.14	0.11	-0.2	27.08	-7.1	4.28	3.8	2.27	5.9	-0.54	-0.4
L3 × L5	23	-9.7	-0.02	7.86	-0.02	3.1	-12.16	6.6	2.63	3.5	-4.98	-0.8	1.22	0.8
L3 × L6	-203.5	-7.3	-0.36	2.58	-0.02	-4.1	-12.53	-5.8	-0.42	1.4	3.82	-0.4	-1.22	2.3
L4 × L5	-188.6	-2.1	-0.33	1.93	0.05	3.7	-4.87	10.6	-1.59	9.8	6.38	-0.6	0.21	1.4
L4 × L6	-351.2	4.3	0.1	2.41	-0.07	-0.8	-15.91	-1	-1.9	-1.6	3.38	-2	-0.74	4
L5 × L6	203.4	7	0.17	8.11	0.04	0.2	14.75	6.9	1.61	1.5	-7.78	-4.5	1.19	-0.4
ES <i>sjj</i>-<i>sjj</i>	198.8		0.26		0.05		10.27		2.39		8.32		0.49	

RGha= rendimiento de grano por hectárea; LMZ= longitud de mazorca; DMZ= diámetro de mazorca; NGM= número de granos por mazorca; AP= altura de planta; PIG= peso individual de grano; DFM días a floración masculina; ES *sjj*-*sjj*= error estándar de los efectos de ACG.

Las fluctuaciones de los efectos de ACE en todos los caracteres estudiados, indican que éstos no pueden predecirse con base en los valores de los efectos de ACG de los progenitores, como lo indican Revilla *et al.* (1999); sin embargo, Reyes *et al.* (2004) señalan que la crusa simple será de alto valor de ACE si al menos una de sus líneas progenitoras es de alta ACG, lo cual coincide con lo encontrado en este estudio.

Los valores de heterosis encontrados oscilaron entre -12.0 y 36.4%, ocho de las 15 cruzas estudiadas presentaron heterosis positiva para rendimiento de grano por hectárea, y fueron las cruzas L1 × L5, L1 × L3, L2 × L3, L2 × L5, L2 × L4, L2 × L6, L5 × L6 y L4 × L6 con heterosis de 36.4, 13.4, 12.8, 10.1, 7.7, 7.4, 7.0 y 4.3, respectivamente (Cuadro 4). Estos valores son superiores a los reportados por Vasal *et al.* (1992); pero inferiores a los encontrados por De la Cruz *et al.* (2010). Los valores negativos de heterosis generalmente se atribuyen a insuficiente diversidad genética entre poblaciones (Han *et al.*, 1991), o posiblemente a la presencia de efectos interalélicos o intraalélicos que reducen la expresión del carácter medido. Al cruzar un progenitor de bajo valor de ACG con otro de efectos de ACG alto se obtuvo un híbrido de buena respuesta

L1 × L5, L5 × L6, L2 × L4 and L3 × L5, with values of 293.0, 203.4, 101.5 and 23.0 kg ha⁻¹, respectively, while the rest of the crosses had negative values (Table 4).

The fluctuations of the effects of ACE in all traits, indicating that they can not be predicted based on the values of ACG effects of the parents, as indicated by Revilla *et al.* (1999); however, Reyes *et al.* (2004) note that the single cross will be high value of ACE if at least one of its parental lines is high ACG, which coincides with the findings in this study.

Heterosis values found ranged between -12.0 and 36.4%, eight of the 15 crosses studied showed positive heterosis for grain yield per hectare and were cross L1 × L5, L1 × L3, L2 × L3, L2 × L5, L2 × L4, L2 × L6, L5 × L6 and L4 × L6 with heterosis of 36.4, 13.4, 12.8, 10.1, 7.7, 7.4, 7.0 and 4.3, respectively (Table 4). These values are higher than those reported by Vasal *et al.* (1992); but lower than those reported by De la Cruz *et al.* (2010). Negative heterosis generally insufficient genetic diversity among populations (Han *et al.*, 1991), or possibly to the presence of interalélicos intraalélicos effects or reducing the expression of the