

LÍNEAS HOMOCIGÓTICAS DE MAÍZ DE ALTO RENDIMIENTO COMO PROGENITORAS DE HÍBRIDOS DE CRUZA SIMPLE

HIGH YIELDING INBRED LINES OF MAIZE AS PROGENITORS OF SINGLE CROSS HYBRIDS

Francisco J. Pérez-López¹, Ricardo Lobato-Ortiz^{1*}, José de J. García-Zavala¹, José D. Molina-Galán¹,
José de J. López-Reynoso², Tarcicio Cervantes-Santana^(†)

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México. ²Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carr. México-Texcoco. 56230. Chapingo, Estado de México. (rlobato@colpos.mx).

RESUMEN

En México, la producción de semilla de maíz (*Zea mays* L.) de híbridos de cruza simple no es rentable debido a que las líneas usadas en ellos como progenitor femenino son de bajo rendimiento. El objetivo de este estudio fue evaluar la aptitud combinatoria general y específica de 10 líneas de maíz de alto rendimiento derivadas de poblaciones de maíces exóticos adaptados para emplearlas como progenitores de híbridos de cruza simple. Las 45 cruza dialélicas entre las 10 líneas, más los progenitores (Método II de Griffing) y cuatro híbridos comerciales usados como testigos, se evaluaron por tres años en Montecillo, Estado de México. Las líneas se derivaron de un sistema de siembra en altas densidades e irradiación gamma durante ocho ciclos de selección. Las variables evaluadas fueron el rendimiento de mazorca por planta, sus componentes y los días a floración femenina. Las líneas con mayor y menor rendimiento *per se* rindieron 7.34 y 5.45 t ha⁻¹, respectivamente. La Línea 3 presentó los efectos más altos de ACG, buen comportamiento *per se* y participó en tres de las cinco cruza simple de mayor rendimiento. En cambio, la Línea 5 que estuvo presente en tres de las cinco cruza de menor rendimiento, presentó menor rendimiento *per se*, baja ACG y baja ACE en combinaciones específicas. Las cruza L3×L4 y L4×L5 igualaron el rendimiento de los mejores híbridos testigos, y fueron más precoces. Las líneas más productivas podrían representar una ventaja en la producción de semilla híbrida de cruza simple con alto potencial productivo y de menor costo.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria, cruza dialélicas, híbridos de cruza simple.

ABSTRACT

In Mexico, maize (*Zea mays* L.) seed production of single cross hybrids is not profitable because the inbred lines used in these as the female parent are of low yield. The objective of this study was to assess the general and specific combining ability of 10 high yielding inbred lines of maize derived from adapted exotic maize populations to be used as parents for single cross hybrids. The 45 diallelic crosses between the 10 lines, the progenitors (Griffing's Method II), and four commercial hybrids used as controls, were assessed for three years in Montecillo, Estado de México. The lines were derived from a high-density cultivation system and gamma irradiation during eight cycles of selection. The traits evaluated were ear yield per plant, yield components, and days to female flowering. The lines with the greatest and lowest *per se* yield produced 7.34 and 5.45 t ha⁻¹, respectively. Line 3 showed the highest GCA effects along with a good behavior *per se* and also participated in three of the five single crosses with the highest yield. In contrast, Line 5, which was present in three of the five crosses with the lowest yield, showed a low yield *per se*, low GCA and low SCA in specific combinations. The crosses L3×L4 and L4×L5 matched the yield of the best check hybrids and were more precocious. The most productive lines could represent an advantage for the production of seed from single cross hybrids of high productive potential and at lower costs.

Key words: *Zea mays* L., combining ability, diallelic crosses, single cross hybrids.

INTRODUCTION

The commercial production of maize (*Zea mays* L.) hybrids from single crosses began in the USA in 1960, since there were already high

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2014. Aprobado: mayo, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 425-437. 2014.

INTRODUCCIÓN

La producción comercial de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruza simples se inició en EE.UU. en 1960 porque ya existían líneas de alto rendimiento factibles de usarse como progenitores hembra (Crow, 1998). En México todavía no existen líneas altamente productivas, por lo cual se usan híbridos dobles o trilineales; además, el costo elevado de la semilla de híbridos de cruza simple ha limitado su producción comercial (Luna *et al.*, 2012). Espinosa *et al.* (2002) afirman que la producción comercial de semilla de híbridos de maíz de cruza simples es rentable cuando las líneas progenitoras hembra tienen un rendimiento mínimo de 3000 kg ha⁻¹. Otros factores que limitan la producción de semilla de estos híbridos son: la condición homogénea de las líneas que ocasiona poco amortiguamiento ante los cambios en los ambientes de producción, la falta de mejoramiento en las poblaciones usadas como fuente de líneas y el riesgo de perder el control de los progenitores (Preciado y Terrón, 1996).

Para obtener líneas de maíz con alto potencial de rendimiento es necesario disponer de poblaciones base de tamaño grande, variables, y de alto rendimiento, y usar sistemas de endogamia moderado (Márquez, 1988) y, según Hallauer *et al.* (2010), su rendimiento puede aumentar mediante selección y mejoramiento de las líneas existentes. Cervantes *et al.* (2001) obtuvieron líneas con baja endogamia y alto rendimiento mediante irradiación gamma y selección en altas densidades. Las líneas con bajos niveles de endogamia son vigorosas (Astete y Branco, 2002), por lo cual son más rendidoras y su uso como progenitoras de híbridos de cruza simple aumentaría la producción de semilla del progenitor hembra; los híbridos obtenidos tendrían un rendimiento igual o superior y una mayor homogeneidad genética, respecto a los híbridos trilineales y dobles.

La introducción de material exótico de maíz a los programas de mejoramiento permite aumentar la diversidad genética. Al identificar germoplasma exótico con alelos favorables carentes en las poblaciones locales, es posible transferir y aprovechar estos nuevos alelos en líneas de maíz y en los híbridos generados (Dudley, 1984). Las cruza dialélicas permiten estimar los componentes de la variación genética,

yielding lines that could be used as female parents (Crow, 1998). In Mexico, there are still no highly productive inbred lines, so three-way or double cross hybrids are used; also, the high cost of single cross hybrid seed has limited its commercial production (Luna *et al.*, 2012). Espinosa *et al.* (2002) affirm that commercial production of single cross hybrid seed of maize is profitable when the female parental lines have a minimum yield of 3000 kg⁻¹. Other factors that limit the seed production in these hybrids are: the homogeneous condition of the lines which causes small cushioning to face changes in the production environments, the lack of genetic improvement of the populations used as sources of the lines, and the risk of losing control of the progenitors (Preciado and Terrón, 1996).

In order to obtain inbred lines of maize with a high yielding potential, it is necessary to have base populations of large size, variable and high yielding, and to use systems of moderate inbreeding (Márquez, 1988), and according to Hallauer *et al.* (2010), the yield of the inbreds can be increased through selection and improvement of the existing lines. Cervantes *et al.* (2001) obtained inbred lines with a low inbreeding level and high yield through gamma irradiation and selection in high plant densities. The lines with low levels of inbreeding are vigorous (Astete and Branco, 2002), and that is why they are more highly productive, and their use as parents for single cross hybrids would increase the production of seed of the female parent; the hybrids obtained would have an equal or higher yield and greater genetic homogeneity, in comparison to the three-way and double cross hybrids.

The introduction of exotic maize germplasm to the maize breeding programs may allow increasing the genetic diversity. When identifying exotic germplasm with favorable alleles absent in the local populations, it is possible to transfer and take advantage of those new alleles in the maize lines and the hybrids generated (Dudley, 1984). The diallelic crosses allow us to estimate the components of genetic variation, to identify the superior combinations and to select the best parents for the design of efficient breeding methods (Kempthorne and Curnow, 1961; Gutiérrez *et al.*, 2002).

Sprague and Tatum (1942) defined the general combining ability (GCA) as the average behavior of a line in its hybrid combinations, and the specific

identificar las combinaciones superiores y seleccionar los mejores progenitores para el diseño de métodos de mejoramiento eficientes (Kempthorne y Curnow, 1961; Gutiérrez *et al.*, 2002).

Sprague y Tatum (1942) definieron la aptitud combinatoria general (ACG) como el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, y la aptitud combinatoria específica (ACE) como los casos en los cuales ciertas combinaciones híbridas específicas se expresan favorablemente o no con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores. Griffing (1956) desarrolló cuatro métodos para evaluar ACG y ACE considerando: 1) los progenitores y sus cruza F_1 directas y recíprocas, 2) los progenitores y sus cruza directas F_1 , 3) las cruza F_1 directas y recíprocas, 4) la evaluación de las cruza F_1 directas únicamente.

Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004) y Escorcia *et al.* (2010) señalan que una crusa simple es de alto rendimiento cuando las dos líneas progenitoras son de alta ACG, o bien, al menos una línea es de alta ACG, pero presenta efectos positivos de ACE. Las líneas con efectos altos de ACG pueden emplearse para desarrollar variedades sintéticas, mientras que combinaciones específicas de alto rendimiento se pueden usar en la hibridación (Sprague y Eberhart, 1977). Los efectos de ACG se relacionan con efectos aditivos que se pueden usar por selección y luego por hibridación, mientras que los efectos de ACE se deben a efectos de dominancia y epistasis (Inram *et al.*, 2004) y son utilizados por la hibridación.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar las aptitudes combinatorias general y específica de 10 líneas altamente homocigóticas y de alta capacidad de rendimiento, derivadas de poblaciones de maíces exóticos adaptados a clima templado, para emplearlas como progenitoras de híbridos de crusa simple. La hipótesis fue que los híbridos de crusa simple formados tendrán alta capacidad de rendimiento y características agronómicas similares o superiores a los híbridos comerciales de la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se evaluaron las 45 cruza posibles entre 10 líneas de maíz altamente homocigóticas de alto potencial de rendimiento, derivadas de germoplasma exótico, las 10 líneas progenitoras y cuatro híbridos comerciales como testigos; es decir,

combining ability (SCA) as the cases where certain specific hybrid combinations are expressed favorably or not with regard to the average behavior of their parents. Griffing (1956) developed four methods to estimate both the ACG and ACE, taking into consideration: 1) the parents and their direct and reciprocal F_1 crosses, 2) the parents and their direct F_1 crosses, 3) the direct and reciprocal F_1 crosses, and 4) the evaluation of only the direct F_1 crosses.

Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004) and Escorcia *et al.* (2010) say that a single cross has a high yield when its two parental lines have high GCA effects, or else, when at least one line is of high GCA but has positive SCA effects. The lines with high GCA effects can be used to form synthetic varieties, while specific high yielding combinations can be utilized by hybridization (Sprague and Eberhart, 1977). The GCA effects are related to additive effects that can be used by selection and then by hybridization, while the SCA effects are due to effects of dominance and epistasis (Inram *et al.*, 2004) and are utilized by hybridization.

Based on the previous statements, the objective of this study was to assess the general and specific combining abilities of 10 highly homozygous inbred lines of high yielding ability, derived from exotic maize populations adapted to temperate climate, to be used as parents in single cross hybrids. The hypothesis was that the single cross hybrids formed will have a high yielding ability and similar or superior agronomic characteristics than the commercial hybrids in the zone.

MATERIALS AND METHODS

In this study, the 45 possible crosses between 10 highly homozygous inbred lines of maize of high yield, derived from exotic germplasm, the 10 parental lines, and four commercial hybrids as checks were assessed; that is, 59 genotypes were evaluated. The lines were generated through cultivation of tropical maize populations adapted to high valleys in plant densities of 200 000 plants ha^{-1} . These populations were previously formed through intervarietal crosses and by forming composites of tropical maize races. Before flowering, the most vigorous and precocious plants were selected and selfed, under the assumption that they had a high frequency of favorable dominant alleles, and the plant density was 80 000 plants ha^{-1} at the end of the crop cycle. At harvesting, a balanced composite was formed with equal number of seeds per ear from the selected plants. In order

se evaluaron 59 genotipos. Las líneas fueron generadas mediante la siembra de poblaciones de maíces tropicales adaptadas a valles altos en densidades de 200 000 plantas ha^{-1} y estas poblaciones se formaron previamente mediante cruza intervarietales y por compuestos de razas tropicales de maíz. Antes de la floración, se seleccionaron y autofecundaron las plantas más vigorosas y precoces, bajo el supuesto de que éstas tenían una alta frecuencia de alelos favorables dominantes, hasta terminar el ciclo de cultivo con densidades de 80 000 plantas ha^{-1} . A la cosecha se formaba un compuesto balanceado con igual número de semillas por mazorca de las plantas seleccionadas. Para obtener líneas altamente homocigóticas y con un alto coeficiente de endogamia (0.996), esta metodología se repitió por ocho ciclos; además se aplicó irradiación gama de Cobalto 60 entre cada ciclo de selección (Cruz *et al.*, 2010). La genealogía de las líneas se encuentra en el Cuadro 1. Los testigos fueron los híbridos comerciales: HS-2, AMCCG01, AMCCG02 y PROMESA.

Los 59 genotipos se sembraron en los ciclos P-V 2009, 2010 y 2011 en Montecillo, Estado de México, de clima tipo Cw (i) B/2 (a') templado con lluvias en verano; precipitación media anual de 655.6 mm; temperatura media anual de 16.3 °C. Cada ciclo de cultivo se sembró en mayo y se aplicaron riegos de auxilio suficientes hasta el establecimiento de las lluvias. La fertilización fue 120 kg N y 80 kg P_2O_5 ha^{-1} ; todo el P_2O_5 y la mitad del N se aplicó a la siembra y el resto en la escarda (30 d después de la siembra, dds). La maleza se controló con el herbicida Gesaprim Calibre 90 GDA®, 3 L ha^{-1} aplicado, 15 dds.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar y los tratamientos tuvieron cuatro repeticiones. La parcela experimental fue dos surcos, 6 m de largo, con 80 cm entre surcos y 40 cm entre plantas, y dos plantas por mata (62 500 plantas ha^{-1}).

Catorce caracteres cuantitativos se midieron y con los datos de los tres años de evaluación se aplicó un análisis de correlación para identificar las cinco variables con mayor correlación positiva con el rendimiento de mazorca por planta. Estas variables fueron: número de mazorcas por planta (NMZ, número total de mazorcas por parcela experimental entre número de plantas); peso de mazorca (PMZ, g, peso seco por mazorca, promedio de cinco mazorcas seleccionadas al azar por parcela); peso seco de grano por mazorca (PGMZ, g, peso promedio de las cinco mazorcas); porcentaje de desgrane [(PDD=(PMZ/PGMZ×100)]; y rendimiento de mazorca por planta (RMZP, g, peso de las mazorcas secas por parcela entre el número de plantas por parcela).

El análisis de varianza fue combinado para los tres años de evaluación para cada variable. La suma de cuadrados de cruza se dividió en suma de cuadrados de ACG y suma de cuadrados de ACE. Además se estimaron los efectos de ACG ($\hat{g}_i$) de las 10 líneas y los efectos de ACE ($\hat{s}_{ij}$) de las 45 cruza posibles.

to obtain highly inbred lines with a high inbreeding coefficient (0.996), this methodology was repeated during eight cycles; in addition, gamma irradiation with Cobalt 60 was applied between each selection cycle (Cruz *et al.*, 2010). The genealogy of the lines is shown in Table 1. The checks were the following commercial hybrids: HS-2, AMCCG01, AMCCG02 and PROMESA.

The 59 genotypes were sown during the spring-summer cycles in 2009, 2010 and 2011, in Montecillo, Estado de México, with temperate climate with summer rains, type Cw (i) B/2 (a'); mean annual precipitation of 655.6 mm; mean annual temperature of 16.3 °C. Each cultivation cycle was sown in May and sufficient auxiliary irrigation was applied until the rains were set. Fertilization was 120 kg N and 80 kg P_2O_5 ha^{-1} ; all the P_2O_5 and half of the N was applied at the time of sowing and the rest during weeding (30 d after sowing, dds). The weeds were controlled with herbicide Gesaprim Calibre 90 GDA®, 3 L ha^{-1} applied 15 dds.

The experimental design was a randomized complete block design with four replications. The experimental unit consisted of two-row plots, 6 m long, with 80 cm between rows and 40 cm between plants, and two plants per hill (62 500 plants ha^{-1}).

Fourteen quantitative traits were measured and a correlation analysis was applied with the three-year evaluation data to identify the five traits that had the greatest positive correlation with the ear yield per plant. These traits were: number of ears per plant (NMZ, total number of ears per experimental unit divided by the number of plants); ear weight (PMZ, g, dry weight per ear, average of five ears selected randomly per plot); dry weight of grain per ear (PGMZ, g, average weight of the five ears); shelling

Cuadro 1. Genealogía de 10 líneas de maíz altamente homocigóticas de alto rendimiento.

Table 1. Genealogy of 10 highly inbred maize lines of high yield.

Línea	Genealogía
1	[[Reventador (Sin. 60)×Olotón (Chis. 284)]] F18
2	[[Chapalote (Sin.2)×Tuxpeño (Oax. 9)]]F25
3	[†] RTM – Comp. 1B (0.5-1.0)-5-2-3-16#
4	[‡] CRT 15R1M1-20R4M1-15R1M1-11R1M11 14R1M2-18R1M1-25R1M11-2744-61-24#
5	[[Reventador (Sin. 60)×Vandeno (Chis. 80)]]F18
6	RTM – Comp. 1B (0.5-1.0)-1-1-3-17#
7	[[Tuxpeño (Oax. 9)×Olotillo (Chis. 114)]]F25
8	[[Blandito (Sin. 61)×Pepitilla (Mor. 102)]]F25
9	RTM – Comp. 1B (0.5-1.0)-5-3-3-24#
10	RTM – Comp. 1A (0.5-1.0)-7-2-3-19#

[†]RTM: razas tropicales de maíz; [‡]CRT: compuesto de razas tropicales. [‡]RTM: tropical maize races; [‡]CRT: composite of tropical races.

En el análisis genético se usó el método II del modelo del diseño dialélico de Griffing (1956):

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_l + b_{kl} + v_{ij} + (\alpha v)_{ijl} + e_{ijkl}$$

se consideró que: $v_{ij} = g_i + g_j + s_{ij}$, y $(\alpha v)_{ijl} = (\alpha g)_{il} + (\alpha g)_{jl} + (\alpha s)_{ijl}$.

donde Y_{ijkl} es el valor observado; μ es la media general; b_{kl} es el efecto de bloque o repetición dentro de ambientes; α_l es el efecto ambiental; v_{ij} es el efecto de craza; $(\alpha v)_{ijl}$ es la interacción entre ambientes y cruzas; e_{ijkl} es el efecto residual o error; g_i es el efecto de ACG para el progenitor i ; g_j es el efecto de ACG para el progenitor j ; s_{ij} es el efecto de ACE de la craza ij ; $(\alpha g)_{il}$ es el efecto de interacción entre el efecto g_i y el ambiente l ; $(\alpha g)_{jl}$ es el efecto de interacción entre el efecto g_j y el ambiente l ; $(\alpha s)_{ijl}$ es el efecto de la interacción entre el efecto s_{ij} y el ambiente l .

La estructura genética para el rendimiento (RMZP) de las 45 cruzas se construyó mediante el modelo del diseño dialélico de Griffing (1956):

$$Y_{ij} = \hat{\mu} + \hat{g}_i + \hat{g}_j + \hat{s}_{ij}$$

donde Y_{ij} es el rendimiento observado de la craza ij en promedio de repeticiones y ambientes; $\hat{\mu}$ es la media general estimada; $\hat{g}_i$, $\hat{g}_j$ y $\hat{s}_{ij}$, estimadores de los efectos g_i , g_j y s_{ij} , respectivamente.

Las medias en cada carácter se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Además se hizo una comparación especial del RMZP de los 10 mejores híbridos incluyendo a los testigos, en los que se agregó la variable días a floración femenina (DFF), en promedio de los tres ambientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza general

Los cuadrados medios del análisis de varianza combinado fueron significativos ($p \leq 0.01$) entre ambientes para todos los caracteres (Cuadro 2), lo cual significa que las condiciones y efectos ambientales fueron diferentes en los tres años de evaluación. Los efectos de ACG y ACE fueron significativos ($p \leq 0.01$) para todas las variables. En la suma de cuadrados (datos no presentados) de las cruzas, la variación correspondiente a efectos de ACG para las cinco variables fue: 24 % (RMZP), 30 % (NMZ), 31 % (PMZ), 31 % (PGMZ), y 15 % (PDD); en

percentage [(PDD=(PMZ/PMZ×100)]; and ear yield per plant (RMZP; g, weight of the dry ears per plot divided by the number of plants per plot).

A combined analysis of variance was performed for the three-year evaluation data for each trait. The sum of squares of the crosses was divided into the sum of squares of GCA and the sum of squares of SCA. In addition, the GCA effects ($\hat{g}_i$) of the 10 lines and the SCA effects ($\hat{s}_{ij}$) of the 45 possible crosses were estimated.

For the genetic analysis, Griffing's method II for the diallelic design (1956) was used:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_l + b_{kl} + v_{ij} + (\alpha v)_{ijl} + e_{ijkl}$$

It was considered that: $v_{ij} = g_i + g_j + s_{ij}$, and $(\alpha v)_{ijl} = (\alpha g)_{il} + (\alpha g)_{jl} + (\alpha s)_{ijl}$.

where Y_{ijkl} is the observed value; μ is the general mean; b_{kl} is the block effect within the environments; α_l is the environmental effect; v_{ij} is the cross effect; $(\alpha v)_{ijl}$ is the crosses×environment interaction; e_{ijkl} is the residual effect or error; g_i is the parent i GCA effect; g_j is the parent j GCA effect; s_{ij} is the SCA effect of the ij cross; $(\alpha g)_{il}$ is the effect of the g_i effect×environment l interaction; $(\alpha g)_{jl}$ is the effect of the g_j effect×environment l interaction; $(\alpha s)_{ijl}$ is the effect of the s_{ij} effect×environment l interaction.

The genetic structure or genetic value for the yield (RMZP) of the 45 crosses was built through Griffing's diallelic design model (1956) as:

$$Y_{ij} = \hat{\mu} + \hat{g}_i + \hat{g}_j + \hat{s}_{ij}$$

where Y_{ij} is the observed yield of the ij cross through replications and environments; $\hat{\mu}$ is the estimated general mean; $\hat{g}_i$, $\hat{g}_j$ and $\hat{s}_{ij}$, are estimators of the g_i , g_j and s_{ij} effects, respectively.

All pair-wise mean comparisons for each trait were conducted using Tukey tests ($p \leq 0.05$). In addition, special emphasis was put on the comparison of the RMZP of the best 10 hybrids and checks, and data of the trait days to female flowering (DFF) was added as average from the three environments.

RESULTS AND DISCUSSION

General variance analysis

The mean squares of the combined analysis of variance were significant ($p \leq 0.01$) between

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado de cinco variables de 10 líneas de maíz en tres ambientes. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.**Table 2. Mean squares from the combined variance analysis of five traits in 10 maize lines for three environments. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.**

FV	GL	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
Amb	2	57596.59 [§]	964.04 [§]	46483.49 [§]	51115.86 [§]	705.94 [§]
Rep (Amb)	9	222.00	45.13 [†]	143.93	112.15	3.18
Cruzas	54	1617.85 [§]	173.30 [§]	676.47 [§]	598.40 [§]	20.58 [§]
ACG	9	2371.00 [§]	308.16 [§]	1247.48 [§]	1106.55 [§]	17.93 [§]
ACE	45	1467.22 [§]	146.33 [§]	562.28 [§]	496.78 [§]	21.11 [§]
Cruzas*Amb	108	642.29 [†]	76.61 [§]	314.63 [§]	252.32 [†]	9.48 [§]
ACG*Amb	18	708.65 [†]	96.76 [§]	250.78 [§]	184.27 [†]	12.23 [†]
ACE*Amb	90	629.03 [§]	72.59 [§]	327.41 [§]	265.94 [§]	8.92 [§]
Error	486	310.83	21.75	85.81	78.83	4.61
CV (%)		15	8	6	7	2

[†] $p \leq 0.05$ y [§] $p \leq 0.01$. ACG y ACE: aptitud combinatoria general y específica, respectivamente; FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; RMZP: rendimiento de mazorca por planta; NMZ: número de mazorcas por parcela; PMZ: peso de mazorca; PGMZ: peso seco de grano por mazorca; PDD: porcentaje de desgrane; CV: coeficiente de variación. [†] $p \leq 0.05$ and [§] $p \leq 0.01$. ACG and ACE: general and specific combining ability, respectively; FV: sources of variation; GL: degrees of freedom; RMZP: ear yield per plant; NMZ: number of ears per plot; PMZ: ear weight; PGMZ: dry weight of grain per ear; PDD: shelling percentage; CV: coefficient of variation.

cambio en los efectos de ACE los resultados fueron: 76 % (RMZP), 70 % (NMZ), 69 % (PMZ), 69 % (PGMZ) y 85 % (PDD). Esto implica que las cinco variables evaluadas están controladas principalmente por efectos no aditivos. González *et al.* (1997) y de la Rosa *et al.* (2006) también encontraron mayor contribución de los efectos no aditivos en el rendimiento y sus componentes al evaluar cruzas dialélicas de maíz, mientras que Vasal *et al.* (1992) señalan que los efectos de ACE son mayores en cruzas de maíz cuyas líneas progenitoras son derivadas de distintas poblaciones y razas.

La interacción cruzas por ambiente fue altamente significativa para todas las variables (Cuadro 2). Las cruzas fueron evaluadas en la misma localidad durante distintos años, pero el comportamiento de algunas cruzas simples cambió drásticamente de un año a otro. Al respecto, Rowe y Andrew (1964) y Hallauer *et al.* (2010) mencionan que las cruzas simples presentan mayor interacción con el ambiente al ser poblaciones de condición más homogénea en comparación a los híbridos trilineales y dobles. La suma de cuadrados de la interacción cruzas por ambiente se dividió en ACG y ACE por ambientes, donde todas las variables mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$), excepto PGMZ y PDD que presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la interacción ACG por ambientes. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 2 y 15 %.

environments for all traits (Table 2), which means that the environmental conditions and their effects were different in the three years of evaluation. The GCA and SCA effects were significant ($p \leq 0.01$) for all traits. In the sum of squares (data not presented) of the crosses, the variation corresponding to the GCA effects for the five traits was: 24 % (RMZP), 30 % (NMZ), 31 % (PMZ), 31 % (PGMZ), and 15 % (PDD); in contrast, for the SCA effects the results were: 76 % (RMZP), 70 % (NMZ), 69 % (PMZ), 69 % (PGMZ), and 85 % (PDD). This implies that the five traits evaluated are controlled primarily by non-additive effects. González *et al.* (1997) and de la Rosa *et al.* (2006) also found greater contribution from the non-additive effects on the yield and its components when evaluating diallelic maize crosses, while Vasal *et al.* (1992) point out that the SCA effects are greater in maize crosses whose parental lines are derived from different populations and races.

The crosses $\times$ environment interaction was highly significant for all traits (Table 2). The crosses were evaluated in the same location during different years, but the behavior of some single crosses changed drastically from one year to another. In this regard, Rowe and Andrew (1964) and Hallauer *et al.* (2010) mention that single crosses have a greater interaction with the environment because they are populations with a more genetic homogeneous condition in comparison to three-way and double cross hybrids.

Comportamiento *per se* de las líneas

La Línea 2 mostró el promedio más alto para rendimiento de mazorca por planta respecto sólo a las líneas 10 y 7, donde la 7 tuvo el menor RMZP (Cuadro 3). La diferencia entre el promedio de RMZP de la línea 2 (117.6 g) con respecto a la 7 (87.2 g) es 25.8 %. Destaca que en la Línea 2 los promedios de PMZ, PGMZ y PDD no fueron diferentes ($p > 0.05$) a los de la línea 7, y hubo diferencia significativa sólo en el número de mazorcas por parcela (línea 2 con 51; línea 7 con 46 mazorcas).

El rendimiento potencial de las líneas con base en una densidad de siembra de 62 500 plantas ha^{-1} , indicó que las 10 líneas son altamente productivas, con 7.34 y 5.45 t ha^{-1} para la línea con mayor y menor rendimiento, respectivamente. Los rendimientos son superiores a 3000 kg ha^{-1} , y esto es el mínimo que una línea de maíz debe producir para ser utilizable como progenitor femenino en híbridos de cruza simple (Espinosa *et al.*, 2002).

Aptitud combinatoria general

Los mayores efectos positivos de ACG para rendimiento de mazorca por planta se observaron en las líneas 3 y 2, mientras que las líneas 7 y 5 presentaron los efectos negativos más bajos (Cuadro 4). Los efectos de aptitud combinatoria para NMZ, PMZ y

The sum of squares of the crosses $\times$ environment interaction was divided into GCA and SCA per environments, where all the traits showed significant differences ($p \leq 0.01$), except for PGMZ and PDD, which had significant differences ($p \leq 0.05$) in the GCA $\times$ environment interaction. The coefficients of variation fluctuated between 2 and 15 %.

Per se performance of the lines

Line 2 showed the highest average for ear yield per plant with regard only to Lines 10 and 7, where Line 7 had the lowest RMZP (Table 3). The difference between the RMZP average of Line 2 (117.6 g) compared to Line 7 (87.2 g) was 25.8 %. It stands out that in Line 2, the PMZ, PGMZ and PDD averages were not different ($p > 0.05$) than those of Line 7, and there was a significant difference only in the number of ears per plot (Line 2 with 51; Line 7 with 46 ears).

The potential yield of the lines based on a sowing density of 62 500 plants ha^{-1} indicated that the 10 lines are highly productive, with 7.34 and 5.45 t ha^{-1} for the line with highest and lowest yield, respectively. The yields of the lines were higher than 3000 kg ha^{-1} , which is the minimum that an inbred line of maize should produce to be usable as a female parent in profitable single cross hybrids (Espinosa *et al.*, 2002).

Cuadro 3. Promedios de 10 líneas de maíz autofecundadas de cinco variables evaluadas en tres ambientes. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Table 3. Averages of 10 inbred lines of maize for five traits assessed in three environments. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.

Línea	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
2	117.6a	51bcd	153.2ab	133.1ab	86a
1	116.9a	58a	145.8abcd	127.7abcd	87a
3	116.7a	56ab	149.9abc	131.5abc	87a
6	110.8ab	50bcd	154.5a	135.4a	87a
9	110.3ab	54abc	139.3dc	118.8dc	85a
8	102.6abc	48cd	144.3abcd	124.8abcd	86a
5	101.8abc	52abcd	139.2dc	122.0bcd	87a
4	99.5abc	57a	134.3d	116.6d	86a
10	97.8bc	53abc	140.7bcd	120.5bcd	85a
7	87.2c	46d	144.3abcd	123.5abcd	85a

Medias con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). RMZP: rendimiento de mazorca por planta; NMZ: número de mazorcas por parcela; PMZ: peso de mazorca; PGMZ: peso seco de grano por mazorca; PDD: porcentaje de desgrane. Means with different letters in a column are statistically different ($p \leq 0.05$). RMZP: ear yield per plant; NMZ: number of ears per plot; PMZ: ear weight; PGMZ: dry weight of grain per ear; PDD: shelling percentage.

Cuadro 4. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de 10 líneas altamente homocigóticas de maíz para cinco variables en tres ambientes. Resultado del análisis combinado. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Table 4. General combining ability (GCA) effects of 10 highly inbred lines of maize for five traits in three environments. Results from the combined analysis. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.

Línea	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
1	0.6	1.3 [‡]	-0.7	-0.7	-0.1
2	2.4	0.5	1.5	0.7	-0.4
3	5.5 [‡]	2.2 [‡]	2.4	2.2	0.1
4	1.8	1.5 [‡]	-5.0 [‡]	-3.8 [‡]	0.3
5	-3.9 [†]	-0.4	-2.4	-2.4	-0.1
6	1.1	-1.3 [‡]	4.0 [‡]	4.4 [‡]	0.6 [‡]
7	-8.0 [‡]	-2.6 [‡]	-0.6	-0.9 [†]	-0.2
8	-0.9	-0.9	3.9 [‡]	3.9 [‡]	0.4
9	1.0	0.3	-2.5	-2.4	-0.2
10	0.006	-0.6	-0.5 [‡]	-1.0	-0.4 [†]

[†]p≤0.05 y [‡]p≤0.01. RMZP: rendimiento de mazorca por planta; NMZ: número de mazorcas por parcela; PMZ: peso de mazorca; PGMZ: peso seco de grano por mazorca; PDD: porcentaje de desgrane. [‡]p≤0.05 and [‡]p≤0.01. RMZP: ear yield per plant; NMZ: number of ears per plot; PMZ: ear weight; PGMZ: dry weight of grain per ear; PDD: shelling percentage.

PGMZ fueron positivos para las líneas 3 y 2; en cambio, en todos los caracteres fueron negativos para las líneas 7 y 5.

En general, los efectos de ACG de las líneas no mostraron valores positivos altos, lo cual podría deberse a que las líneas fueron seleccionadas por su comportamiento *per se* en campo y no con base en una prueba temprana de ACG. De acuerdo con los resultados, las líneas 3 y 2 podrían ser buenos progenitores para híbridos de cruce simple porque presentaron efectos positivos para ACG y mostraron buen comportamiento *per se* para rendimiento y sus componentes.

Aptitud combinatoria específica (ACE)

De las 45 cruces simples posibles sólo se muestran dos grupos de 10 cruces (Cuadro 5): las cinco con los mayores y las cinco con los menores efectos de ACE para rendimiento de mazorca por planta. Para el primer grupo, los valores de ACE para los caracteres NMZ, PMZ y PGMZ fueron negativos (L3×L4) en los híbridos formados entre una línea de baja ACG con una línea de alta ACG, mientras que los valores de ACE para todos los caracteres fueron positivos (L8×L9) en los híbridos donde ambas líneas fueron de baja ACG. En el segundo grupo de cruces con efectos de ACE negativos, se identificaron híbridos entre líneas de alta y baja ACE (L2×L6 y L3×L8), y

General combining ability

The greatest positive GCA effects for ear yield per plant were observed in Lines 3 and 2, while Lines 7 and 5 had the lowest negative effects (Table 4). The combining ability effects for NMZ, PMZ and PGMZ were positive for Lines 3 and 2; in contrast, they were negative for all the traits in Lines 7 and 5.

In general, the GCA effects of the lines were of low magnitude, which could be due to the fact that the lines were selected based on their *per se* performance in the field and not based on an early GCA test. According to the results, Lines 3 and 2 could be good parents for single cross hybrids because they had positive effects for GCA and showed good *per se* performance for yield and its components.

Specific combining ability (ACE)

Of the 45 possible single crosses, only two groups of 10 crosses are shown (Table 5): the five with the highest and the five with the lowest SCA effects for ear yield per plant. For the first group, the SCA values for NMZ, PMZ and PGMZ were negative (L3×L4) in the hybrids formed between a line of low GCA and a line of high GCA, while the SCA values for all traits were positive (L8×L9) in the hybrids where both lines were of low GCA. In the

Cuadro 5. Aptitud combinatoria específica (ACE) de cinco cruzas con los mayores *vs.* menores efectos s_{ij} para rendimiento de mazorca por planta (RMZP), y su respectivo efecto s_{ij} para NMZ, PMZ, PGMZ y PDD. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Table 5. Specific combining ability (SCA) of five crosses with the highest *vs.* lowest s_{ij} effects for ear yield per plant (RMZP), and its corresponding s_{ij} effect for NMZ, PMZ, PGMZ and PDD. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.

Cruza	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
Cruzas simples con los mayores efectos ACE					
L4×L5	18.06 [‡]	-3.19 [†]	9.14 [†]	6.43	-0.80
L8×L10	15.40 [‡]	3.67 [†]	7.20	5.85	-0.15
L3×L4	15.06 [‡]	-2.9	-5.03	-4.42	0.05
L8×L9	12.66 [†]	1.66	12.88 [‡]	11.73 [‡]	0.22
L1×L7	12.35 [†]	2.16	-1.83	-0.28	0.90
Cruzas simples con los menores efectos de ACE					
L3×L8	-12.6 [†]	0.75	-0.17	-1.14	-0.68
L7×L10	-9.94	-2.20	-2.83	-3.79	-0.78
L2×L6	-8.5	-0.33	-2.41	-1.67	0.32
L5×L9	-6.7	1.50	-1.37	-1.81	-0.30
L1×L5	-6.7	-3.26 [†]	1.57	4.26	1.85 [†]

[†]p≤0.05 y [‡]p≤0.01. RMZP: rendimiento de mazorca por planta; NMZ: número de mazorcas por parcela; PMZ: peso de mazorca; PGMZ: peso seco de grano por mazorca; PDD: porcentaje de desgrane. [‡]p≤0.05 and [‡]p≤0.01. RMZP: ear yield per plant; NMZ: number of ears per plot; PMZ: ear weight; PGMZ: dry weight of grain per ear; PDD: shelling percentage.

también híbridos donde ambas líneas fueron de baja ACE (L7×L10, L5×L9, y L1×L5). Al respecto, De la Cruz *et al.* (2005) indican que en cruzas con altos y bajos efectos de ACE participan líneas con baja y alta ACG.

Estructura genética de las cruzas

Respecto a la estructura genética de las cinco cruzas simples con mayor y menor rendimiento de mazorca por planta, en las cruzas de mayor rendimiento participó al menos una línea con efectos positivos de alta ACG, además de que los efectos de ACE fueron positivos y altos, mientras que en las cruzas de menor rendimiento el efecto de ACG fue negativo en al menos una línea, y el efecto de ACE fue negativo en todos los casos (Cuadro 6). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004) y Escorcía *et al.* (2010).

Las cruzas simples serán de alto rendimiento si sus dos líneas progenitoras son de alta ACG o si su efecto de ACE es alto y al menos uno de los progenitores es de alta ACG (Reyes, 2004), pero se busca

second group of crosses with negative SCA effects, hybrids between lines of high and low SCA (L2×L6 and L3×L8) were identified, and there were also hybrids where both parental lines were of low SCA (L7×L10, L5×L9 and L1×L5). In this regard, de la Cruz *et al.* (2005) indicate that in crosses with high and low SCA effects, lines with low and high GCA do participate.

Genetic structure of the crosses

With regard to the genetic structure of the five single crosses with the highest and lowest ear yield per plant, at least one line with positive effects of high GCA participated in the crosses of highest yield; in addition, the SCA effects were positive and high, while in the crosses of lower yield the GCA effect was negative in at least one line, and the SCA effect was negative in every case (Table 6). These results coincide with those obtained by Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004) and Escorcía *et al.* (2010).

The single crosses will be high yielding if their two parental lines are of high GCA, or if their SCA

Cuadro 6. Estructura genética de las cinco cruzas simple de mayor y menor rendimiento de mazorca por planta. Combinado de tres ambientes. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Table 6. Genetic structure of the five single crosses of highest and lowest ear yield per plant. Combined from three environments. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.

Cruza	$X_{ij}(g)$	$\mu(g)$	$g_i(g)$	$g_j(g)$	$s_{ij}(g)$
Cruzas simples de mayor rendimiento					
L3×L4	141.96	119.59	5.49 [‡]	1.77	15.06 [‡]
L4×L5	135.58	119.59	1.77	-3.88 [‡]	18.06 [‡]
L3×L10	135.36	119.59	5.49 [‡]	0.006	10.28
L2×L3	134.37	119.59	2.39	5.49 [‡]	6.49
L8×L10	134.15	119.59	-0.88	0.006	15.40 [‡]
Cruzas simples de menor rendimiento					
L3×L8	111.63	119.59	5.49 [‡]	-0.88	-12.60
L5×L9	110.12	119.59	-3.88 [‡]	1.00	-6.70
L1×L5	109.57	119.59	0.60	-3.88 ^{††}	-6.70
L5×L7	105.34	119.59	-3.88 [‡]	-8.00 ^{††}	-2.40
L7×L10	101.70	119.59	-8.00 [‡]	-0.88	-9.94

[†] $p \leq 0.05$ y [‡] $p \leq 0.01$ ^{‡‡} $p \leq 0.05$ and ^{‡‡‡} $p \leq 0.01$.

que los efectos aditivos y no aditivos sean altos. En este estudio, en cuatro de las cinco cruzas simples de mayor rendimiento los efectos ACE fueron mayores a la suma de efectos de ACG de sus progenitores; así es posible que al combinar estas líneas de alto rendimiento con otro grupo de líneas de alta ACG el rendimiento de las cruzas simples pueda aumentar. La línea 3 estuvo presente en tres de las cinco cruzas simples con mayor rendimiento y presentó rendimiento alto *per se*, alta ACG y alta ACE en combinaciones específicas. En cambio, la línea 5 estuvo presente en tres de las cinco cruzas de menor rendimiento, pero tuvo rendimiento *per se* menor, ACG baja y ACE baja en combinaciones específicas.

Comparación de las cruzas simples con respecto a los testigos

En el Cuadro 7 se muestran los diez híbridos que tuvieron el mayor rendimiento de mazorca por planta, 2 testigos y 8 cruzas simples. Los híbridos comerciales HS-2 y AMCCG01 tuvieron los promedios más altos, pero dos cruzas simples (L3×L4 y L4×L5) fueron similares a los testigos ($p > 0.05$). Los días a floración femenina tuvieron un valor promedio

effect is high and at least one of the parents is of high GCA (Reyes, 2004), although the highest additive and non-additive effects should be sought for the crosses. In this study, in four of the five single crosses of highest yield, the SCA effects were greater than the sum of the GCA effects of the parents; thus, it is possible that when combining those four high yielding lines with another group of lines of high GCA, the yield of their single crosses could increase. Line 3 was present in three of the five single crosses with the highest yield and also had a high yield *per se*, high GCA and high SCA in specific combinations. In contrast, Line 5 was present in three of the five crosses with the lowest yield and had lower yield *per se*, low GCA and low SCA in specific combinations.

Comparison of single crosses with regard to the checks

Table 7 shows the ten hybrids that had the highest ear yield per plant: two checks and eight single crosses. The commercial hybrids HS-2 and AMCCG01 had the highest yield averages, but two single crosses (L3×L4 and L4×L5) were similar in yield to the checks ($p > 0.05$). The days to female flowering had

de 74 d para las ocho cruza simples de mayor RMZP y fueron más precoces, pues los híbridos comerciales de mayor rendimiento presentaron valores para DFF entre los 79 y 83 d.

En el presente estudio se identificaron dos cruza simples que estadísticamente fueron similares ($p > 0.05$) a los híbridos comerciales de mayor rendimiento, y por lo menos ocho cruza simples superaron a los híbridos testigos PROMESA (121.6 g) y AMCCG02 (127.1 g). En relación al número de días a floración femenina, las cruza simples de mayor rendimiento en general fueron más precoces que los cuatro híbridos comerciales (Cuadro 7). La precocidad de las cruza simples puede deberse a que para obtener las líneas se eliminaron las plantas más tardías y menos altas, las cuales no soportaron la competencia de las plantas precoces que crecieron más rápido y las sombrearon. Esto permitió que las plantas seleccionadas resultaran cuando menos de igual precocidad y altura que la variedad original, pero con mayor capacidad de rendimiento.

Las cruza simples L3×L4 y L4×L5 podrían usarse como híbridos comerciales porque las líneas progenitoras de ambas cruza mostraron buen rendimiento de semilla, y rendimientos similares al de los mejores híbridos testigos. Además, los híbridos HS-2 y AMCCG-01 son cruza trilineales que requieren más de un ciclo agrícola y más trabajo para obtener y mantener su semilla; ésta es la ventaja de las cruza simples de alto rendimiento identificadas en este estudio, porque podrían reducir el costo de la semilla híbrida para el productor.

CONCLUSIONES

El rendimiento de semilla de las 10 líneas en estudio fue superior a 3000 kg ha⁻¹, por lo cual son económicamente rentables para utilizarlas como progenitoras hembras en híbridos de cruza simple. En las cinco cruza simples de mayor rendimiento, al menos una línea progenitora mostró efectos positivos de ACG y efectos de ACE positivos y altos. La línea 3 se identificó como un progenitor potencial para híbridos de cruza simple, porque presentó efectos positivos de ACG, efectos altos de ACE en combinaciones específicas y rendimiento *per se* bueno; además, esta línea participó en tres de las cinco cruza simples con mayores rendimientos. Dos híbridos de cruza simple mostraron rendimientos

Cuadro 7. Comparación de medias para RMZP y DFF de ocho cruza simples y dos híbridos testigos. Montecillo, Estado de México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Table 7. Means comparison for RMZP and DFF of eight single crosses and two check hybrids. Montecillo, Estado de México. Spring-Summer season 2009, 2010 and 2011.

Genotipo	RMZP (g)	DFF
HS-2	164.0a	83a
AMCCG01	144.2ab	79b
L3×L4	141.96abc	76cdefg
L4×L5	135.58abcd	74ijklmnopq
L3×L10	135.36bcd	74hijkl
L2×L3	134.37bcde	75cdefgh
L8×L10	134.15bcdef	73mnopr
L8×L9	132.45bcdefg	73pqrs
L2×L9	131.82bcdefg	73opqrs
L6×L10	130.24bcdefg	74ijklmnopq

Medias con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). RMZP: rendimiento de mazorca por planta; DFF: días a floración femenina. Means with different letters in a column are statistically different ($p \leq 0.05$). RMZP: ear yield per plant; DFF: days to female flowering.

an average value of 74 d for the eight single crosses of highest RMZP and were more precocious, since the commercial hybrids of highest yield had values for DFF between 79 and 83 d.

In this study, two single crosses that were statistically similar ($p > 0.05$) in yield to the commercial hybrids were identified, and at least eight single crosses outperformed the check hybrids PROMESA (121.6 g) and AMCCG02 (127.1 g). With regard to the number of days to female flowering, the single crosses of highest yield in general were more precocious than the four commercial hybrids (Table 7). The earliness of the single crosses could be due to the selection of early plants. That is, during the obtainment of the lines the tardiest and least tall plants were eliminated because they did not bear the competition from early plants that grew faster and shaded them. This allowed for the selected plants to be at least of the same earliness and height than the original variety, although with greater yield ability.

The single crosses L3×L4 and L4×L5 could be used as commercial hybrids because their parental lines showed good seed yield and similar yields to the best check hybrids. Also, it can be said that HS-2 and AMCCG-01 are three-way hybrids which require

similares a los mejores híbridos testigo, pero fueron más precoces. Los resultados no permiten aceptar la hipótesis planteada para todos los caracteres agromónicos, pero las cruza simples más productivas tuvieron RMZP similar y menor número de días a floración femenina respecto a los testigos. Las líneas más productivas podrían tener una ventaja en la producción de semilla al generar híbridos de cruza simples con un costo menor.

LITERATURA CITADA

- Astete M., F., and J. Branco de M. 2002. Inbreeding depression in maize populations of reduced size. *Sci. Agric.* 59: 335-340.
- Cervantes S., T., M. Oropeza R., y D. Reyes L. 2001. Selección para rendimiento y heterosis de líneas endogámicas de maíz irradiado. *Agrociencia* 34: 421-431.
- Crow J., F. 1998. 90 years ago: the beginning of hybrid maize. *Genetics* 148: 923-928.
- Cruz I., S., A. Muratalla L., y A.T. Kato Y. 2010 (Comp). Cruzas Dialélicas de Líneas de Maíz Exóticas Adaptadas de Alto Rendimiento. La Investigación al Servicio del Campo Mexicano. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Estado de México. pp: 10-12.
- De la Cruz-Lázaro, E., S. Rodríguez-Herrera, M. Estrada-Botello, J. Mendoza-Palacio, y N. Brito-Manzano. 2005. Análisis dialélico de líneas de maíz QPM para características forrajeras. *Universidad y Ciencia* 21: 19-26.
- De la Rosa L., A., H. De León C., F. Rincón S., y G. Martínez Z. 2006. Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados al Bajío Mexicano. *Rev. Fitotec. Mex.* 29: 247-254.
- Dudley J., W. 1984. A method for identifying populations containing favorable alleles not present in elite germplasm. *Crop Sci.* 24: 1053-1054.
- Escorcia G., N., J. Molina G., F. Castillo G., y J. Mejía C. 2010. Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruza simples de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 271-279.
- Espinosa C., A., M. Sierra M., y N. Gómez M. 2002. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agron. Mesoam.* 14: 117-121.
- González S., H. Córdova, S. Rodríguez, H. De León, y V. Serrato. 1997. Determinación de un patrón heterótico a partir de la evaluación de un dialélico de diez líneas de maíz Subtropical. *Agron. Mesoam.* 8: 01-07.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Austr. J. Biol. Sci.* 9: 463-493.
- Gutiérrez D., E., A. Palomo G., A. Espinoza B., y 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: 271-277.
- Hallauer A., R., M. Carena, and J. B. Miranda F. 2010. *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Springer-Verlag New York Inc. 664 p.
- more than one agricultural cycle and more labor in order to obtain and maintain their seed; therefore, the advantage of the high yielding single crosses identified in this study is that they have a good ear yield and could also reduce the cost of the hybrid seed for maize growers.

CONCLUSIONS

The seed yield of the 10 inbred lines studied was higher than 3000 kg ha⁻¹, so they are economically profitable to be used as female parents in single cross hybrids. In the five single crosses of highest yield, at least one parental line showed positive GCA effects and positive and high SCA effects. Line 3 was identified as a potential female parent for single cross hybrids, because it had positive GCA effects, high SCA effects in specific combinations, and good yield *per se*; in addition, this line participated in three of the five single crosses with the highest yields. Two single cross hybrids showed similar yields to those of the best check hybrids, but the former were more precocious. The results do not allow us to accept the hypothesis set out for all the agronomic traits, but the most productive single crosses had similar RMZP and lower number of days to female flowering in comparison to the checks. The most productive lines could have an advantage in seed production, since it could be possible to generate single cross hybrids at a lower cost.

—End of the English version—



- Inram M., S., H. Nawaz M., H. Mahmood M., and M. Munir. 2004. General and specific combining ability studies in maize diallel crosses. *Int. J. Agric. Biol.* 6: 856-859.
- Kempthorne O., and R. Curnow N. 1961. The partial diallel cross. *Biometrics* 17: 229-250.
- Luna M., A. Hinojosa R., O. Ayala G., F. Castillo G., y J. Mejía C. 2012. Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 1-7.
- Márquez S., F. 1988. *Genotecnia Vegetal*. Tomo II (métodos, teoría y resultados). AGT EDITOR, S.A. México. pp: 472-473.
- Mendes A., A., L. Carlini-Garcia., A. Resende S., M. Figueiredo S., A. Franco G., and C. Lopes S. 2003. Combining ability of inbred lines of maize and stability of their respective single-crosses. *Sci. Agric.* 60: 83-89.
- Preciado O., R., y A. Terrón I. 1996. Efectos heteróticos entre y dentro de fuentes de germoplasma de maíz a través de cruza simples emparentadas. *Agric. Tec. Mex.* 22: 219-230.

- Reyes L., D., J. Molina G., M. Oropeza R., y E. Moreno P. 2004. Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza Tuxpeño. *Rev. Fitotec. Mex.* 27: 49-56.
- Rowe, P., R., and R. Andrew. 1964. Phenotypic stability for a systematic series of corn genotypes. *Crop Sci.* 4: 563-567.
- Sprague G., F., and S. Eberhart A. 1977. *Corn and Corn Improvement*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp: 305-363.
- Sprague G., F., and A. Tatum L. 1942. General *vs.* specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34: 923-32.
- Vasal S., R., G. Sirinivasan, and C. Han G. 1992. Heterotic patterns of eightyeight white subtropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 37: 319-327.