




Aptitud combinatoria y heterosis para el rendimiento, precocidad y altura en genotipos de maíz amarillo

Combining ability and heterosis for yield, precocity and height in yellow maize genotypes

Aptidão combinatória e heterose para produtividade, precocidade e altura em genótipos de milho amarelo

Victor Mario García Mora^{1*}, Julián Chura Chuquiña², Julio Torres³

¹Facultad de Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Código postal: 060106. Correo electrónico: victor.garcia@epoch.edu.ec;  ²Departamento de Fitotecnia. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria La Molina. Código postal: 15026. Correo electrónico: chura@lamolina.edu.ec;  ³Departamento de Química. Instituto de Ciencias Básicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. Código postal: 130125. Correo electrónico: jctorres@utm.edu.ec; 

Resumen

El objetivo del presente estudio fue determinar la aptitud combinatoria general (ACG), aptitud combinatoria específica (ACE) y la heterosis en líneas endogámicas de maíz amarillo y sus cruzas para el rendimiento de grano, altura de planta y mazorca y días a la floración masculina y femenina. Seis líneas endogámicas provenientes del CIMMYT, sus cruzamientos directos y cuatro testigos fueron evaluados en la UNALM durante 2016-2018, bajo un diseño de látice 5 x 5 con cuatro repeticiones. Los efectos de ACG y ACE se calcularon con el método II, modelo I de Griffing. La heterosis se midió con base en la media y el mejor parental. El análisis combinado de años mostró significancia ($p \leq 0,01$) para: genotipos por años para días a la floración masculina y femenina; ACG por años para días a la floración masculina y ACE por años para días a la floración femenina. Los efectos de ACG para el rendimiento de grano fueron significativos en las líneas CML 229 y CML 428, para altura de planta, mazorca y precocidad, destacó la línea CML 487. El efecto de ACE fue superior en la craza CML 453 x CML 486 para el carácter rendimiento de grano. Fue mayor la heterosis para el rendimiento de grano en los cruzamientos CML 229 x CML 453 y CML 453 x

Recibido el 23-05-2020 • Aceptado el 03-07-2020.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: victor.garcia@epoch.edu.ec

CML 487. La relación ACG/ACE evidenció efectos de genes aditivos en la altura de plantas, días a la floración masculina y femenina, por tanto, para rendimiento en grano y altura de mazorca gobernaron los efectos no aditivos.

Palabras clave: *Zea mays*, líneas endogámicas, Griffing, efectos genéticos.

Abstract

The objective of the present study was to determine the general combinatorial aptitude (GCA), specific combinatorial aptitude (SCA) and heterosis in inbred lines of yellow maize and its crosses for, the yield of grain, height of plant and ear and days to male and female flowering. Six inbred lines from CIMMYT, their direct crosses and four controls were evaluated at UNALM during 2016-2018, under a 5 x 5 lattice design with four repetitions. The effects of GCA and SCA were calculated using method II, model I of Griffing. Heterosis was measured based on the mean and best parent. Heterosis was measured based on the mean and best parent. The combined analysis of years showed significance ($p \leq 0.01$) in: genotypes by years for days to male and female flowering; GCA for years for days to male flowering and SCA for years for days to female flowering. The effects of ACG for grain yield were significant in lines CML 229 and CML 428, for plant height, precocity, ear and precocity CML 487 line highlighted. The effect of ACE was superior in the cross CML 453 x CML 486 for the grain yield character. Heterosis was higher for the grain yield in the CML 229 x CML 453 and CML 453 x CML 487 crosses. The GCA / SCA relationship evidenced effects of additive genes on plant height, days to male and female flowering, therefore, for grain yield and ear height, non-additive effects governed.

Keywords: *Zea mays*, inbred lines, Griffing, genetic effects.

Resumo

O objetivo do presente estudo foi determinar a aptidão combinatória geral (ACG), aptidão combinatória específica (ACE) e heterose em linhagens de milho amarelo e seus cruzamentos para o rendimento de grãos, altura de planta e espiga e dias para o florescimento masculino e feminino. Seis linhagens consanguíneas do CIMMYT, seus cruzamentos diretos e quatro controles foram avaliados na UNALM durante o período de 2016-2018, sob um design latice 5 x 5 com quatro repetições. Os efeitos de ACG e ACE foram calculados usando o método II, modelo I de Griffing. A heterose foi mensurada com base na média e no melhor progenitor. A análise combinada dos anos mostrou significância ($p \leq 0,01$) em: genótipos por ano, durante dias, para floração masculina e feminina; ACG por anos durante dias até a floração masculina e ACE por anos durante dias até a floração feminina. Os efeitos do ACG no rendimento de grãos foram significativos nas linhagens CML 229 e CML 428, destacando-se altura da planta, orelha e precocidade, destacando-se a linha CML 487. O efeito da ECA foi superior no cruzamento CML 453 x

CML 486 para o caráter de rendimento de grãos. A heterose foi maior para a produtividade de grãos nos cruzamentos CML 229 x CML 453 e CML 453 x CML 487. A relação ACG / ACE evidenciou efeitos de genes aditivos na altura das plantas, nos dias de floração masculina e feminina, portanto, para o rendimento de grãos e a altura da espiga, os efeitos não aditivos regiam.

Palavras-chave: *Zea mays*, linhas puras, Griffing, efeitos genéticos.

Introducción

Estados Unidos, China y Brasil son los principales productores de maíz, sin embargo, es cultivado en todo el mundo (Ranum *et al.*, 2014). Dichos países en el año 2017 tuvieron un rendimiento aproximado de 11,0; 6,1 y 5,6 t.ha⁻¹ y una producción de 398, 259 y 98 millones de toneladas respectivamente (FAO, 2017). Para el mismo año, Perú obtuvo un rendimiento aproximado de 4,7 t.ha⁻¹ y producción de 1,2 millones de toneladas, inferior a los países mencionados (MINAGRI, 2017). El maíz peruano es considerado de buena calidad según la industria avícola y ganadera, sin embargo, la demanda no es cubierta, lo que obliga a importar de países como Brasil (13 millones de toneladas), Argentina (2,1 millones de toneladas) y Estados Unidos (1,2 millones de toneladas) (MINAGRI, 2019), por ello, es importante optar por el mejoramiento genético como herramienta que permita aumentar la productividad usando germoplasma adecuado.

La producción de híbridos requiere la generación de plantas endogámicas y posteriormente la polinización cruzada de los individuos endogámicos superiores (Dezfouli *et al.*, 2019). En un apareamiento dialélico, si el número de parentales es grande o los

Introduction

The United States, China and Brazil are the main producers of corn, however, it is cultivated worldwide (Ranum *et al.*, 2014). These countries in 2017 had an approximate yield of 11.0; 6.1 and 5.6 t.ha⁻¹ and a production of 398, 259 and 98 million tons respectively (FAO, 2017). For the same year, Peru obtained a yield of approximately 4.7 t.ha⁻¹ and a production of 1.2 million tons, lower than the mentioned countries (MINAGRI, 2017). Peruvian corn is considered of good quality according to the poultry and livestock industry, however, demand is not covered, which forces imports from countries such as Brazil (13 million tons), Argentina (2.1 million tons) and the United States (1.2 million tons) (MINAGRI, 2019), therefore, it is important to opt for genetic improvement as a tool to increase productivity using adequate germplasm.

Hybrid production requires the generation of inbred plants and subsequently cross-pollination of higher inbred individuals (Dezfouli *et al.*, 2019). In a diallel mating, if the number of parents is large or the reciprocal crosses are analogous in their results, it is impractical to use all genotypes, therefore the experiment can be biased (Fasahat *et al.*, 2016).

cruzamientos recíprocos son análogos en sus resultados, resulta impráctico utilizar todos los genotipos, por tanto se puede parcializar el experimento (Fasahat *et al.*, 2016). El análisis dialélico es usado de forma habitual para apreciar la aptitud combinatoria general y específica de las líneas parentales y los híbridos que genera, además, es un instrumento útil para valorar el comportamiento del material genético y la herencia de caracteres cuantitativos (Mather y Jinks, 1982). Un sistema de cruzamiento dialélico comprende un conjunto de individuos parentales que genera un máximo de combinaciones posibles y que puede variar si se incluyen: 1) parentales, conjunto de las F_1 y los recíprocos de las F_1 ; 2) parentales y el conjunto de las F_1 , sin recíprocos de la F_1 ; 3) las F_1 y sus recíprocos, sin incluir a los parentales y 4) conjunto de las F_1 , sin parentales, ni recíprocos de las F_1 (Griffing, 1956).

La aptitud combinatoria general (ACG) se utiliza para distinguir en promedio la superioridad de una línea endogámica en relación a otra y en las combinaciones híbridas que genera (Sprague y Tatum, 1942). Además, proporciona información general de las líneas en los cruzamientos, para la elección de los mejores resultados (Ghosh y Das, 2003). La ACG se asocia a los efectos aditivos y la aptitud combinatoria específica (ACE) a los efectos no aditivos al relacionar el rendimiento promedio de las cruzas (Sprague y Tatum, 1942).

La heterosis es la presencia de mayor vigor de individuos híbridos frente a la respuesta de los progenitores

Diallelic analysis is routinely used to appreciate the general and specific combinatorial aptitude of parental lines and the hybrids it generates, and it is also a useful instrument to assess the behavior of genetic material and the inheritance of quantitative characters (Mather and Jinks, 1982). A diallel crossing system comprises a set of parental individuals that generates a maximum of possible combinations and that can vary if they include: 1) parents, set of F_1 and reciprocals of F_1 ; 2) parents and the set of F_1 , without reciprocals of F_1 ; 3) the F_1 and their reciprocals, not including the parents and 4) set of the F_1 , without parents, or reciprocals of the F_1 (Griffing, 1956).

General combinatorial aptitude (GCA) is used to distinguish on average the superiority of one inbred line in relation to another and in the hybrid combinations it generates (Sprague and Tatum, 1942). In addition, it provides general information about the lines in the crosses, for choosing the best results (Ghosh and Das, 2003). ACG is associated with additive effects and specific combinatorial aptitude (ACE) with non-additive effects by relating the average yield of crosses (Sprague and Tatum, 1942).

Heterosis is the presence of greater vigor of hybrid individuals against the response of the parents (Hochholdinger and Baldauf, 2018). The magnitude of heterosis is dependent on the genetic diversity existing in the plant material used (Ndhlela *et al.*, 2015) and the high effects of ACE influence its expression (Hallauer *et al.*, 2010; Miyaji and Fujimoto, 2018). Heterosis

(Hochholdinger y Baldauf, 2018). La magnitud de la heterosis es dependiente de la diversidad genética existente en el material vegetal que se utiliza (Ndhlela *et al.*, 2015) e influye sobre su expresión los altos efectos de ACE (Hallauer *et al.*, 2010; Miyaji y Fujimoto, 2018). La heterosis debe ser suficiente para justificar el uso potencial de híbridos comerciales (Hallauer *et al.*, 2010).

En la experimentación de los cultivos, la forma habitual para evaluar los efectos incontrolables del ambiente es repetir el ensayo en varios sitios (Ali *et al.*, 2017). El objetivo de esta investigación fue determinar la aptitud combinatoria general y específica y la heterosis en líneas endogámicas de maíz amarillo y sus cruza para el rendimiento de grano, altura de planta y mazorca y días a la floración masculina y femenina con la finalidad de identificar aquellos con mejores resultados para el desarrollo de híbridos e identificar líneas endogámicas prometedoras.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en dos campañas (septiembre 2016 - febrero 2017 y agosto 2017 - febrero 2018), en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en Lima, Perú (251 msnm, 12°05'06" S y 76°59'07" O). Durante la primera campaña del ensayo, la precipitación acumulada, temperatura y humedad relativa promedio fueron de 5,3 mm; 20,7 °C y 74,1 %, respectivamente y en la segunda campaña 9,2 mm; 18,4 °C y

must be sufficient to justify the potential use of commercial hybrids (Hallauer *et al.*, 2010).

In culture experimentation, the usual way to assess the uncontrollable effects of the environment is to repeat the test at several sites (Ali *et al.*, 2017). The objective of this research was to determine the general and specific combinatorial aptitude and heterosis in inbred lines of yellow corn and its crosses for the yield of grain, plant and cob height, and days to male and female flowering in order to identify those with better results for hybrid development and identifying promising inbred lines.

Materials and methods

Study area

This work was carried out in two campaigns (september 2016 - february 2017 and august 2017 - february 2018), at the Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), located in Lima, Peru (251 masl, 12°05'06" S and 76°59'07" O). During the first campaign of the trial, the accumulated precipitation, temperature and average relative humidity were 5,3 mm; 20,7 °C and 74,1 %, respectively and in the second campaign 9,2 mm; 18,4 °C and 77,3 %, respectively (SENAMHI, 2018).

Experimental material

Six inbred lines (LE), from the Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (table 1), their 15 direct crosses and three commercial controls (PM 213, EXP 05, DK 7088 and H 5070) were used. The lines used in this study have

77,3 %, respectivamente (SENAMHI, 2018).

Material experimental

Fueron usadas seis líneas endogámicas (LE), provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (cuadro 1), sus 15 cruzas directas y tres testigos comerciales (PM 213, EXP 05, DK 7088 y H 5070). Las líneas utilizadas en este estudio, poseen características de adaptación a condiciones de trópico y subtropico húmedo, resistencia a enfermedades y sequía.

characteristics of adaptation to humid tropics and subtropics, resistance to diseases and drought.

The sowing was manual at the rate of three seeds per site, one plant being eliminated at the time of verifying those in better conditions before hilling and fertilization. The experimental unit was 2 furrows spaced at 0,8 m and 6,4 m long, the distance between plants was 0,4 m, with ten plants being sampled for each effective area. Fertilization was localized, the nitrogen source being

Cuadro 1. Detalles de las líneas evaluadas.

Table 1. Details of the lines evaluated.

Líneas endogámicas	Genotipos CIMMYT	Pedigree
LE1	CML 226	((EV88SUWAN1/SR)/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1)-78-1-1-B
LE2	CML 229	((EV88SUWAN1/SR)/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1/EV88SUWAN1)-293-1-1-B
LE3	CML 428	SW91145-2-3-B-B-#-3-B
LE4	CML 453	P24STE-C1-FS21-3-1-1-B
LE5	CML 486	P45-C8-76-1-2-1-2-B
LE6	CML 487	(SPMAT-C4/P500SELY)-#-B-54-4-B

La siembra fue manual a razón de tres semillas por sitio, siendo eliminada una planta al momento de verificar aquellas de mejores condiciones antes del aporque y la fertilización. La unidad experimental fue de 2 surcos distanciados a 0,8 m y con 6,4 m de longitud, la distancia entre plantas fue de 0,4 m, siendo muestreadas diez plantas por cada área efectiva. La fertilización fue localizada, siendo fraccionada la fuente nitrogenada al 50 % en la primera etapa del cultivo y el resto a los veinte

fractionated to 50 % in the first stage of cultivation and the rest twenty days after sowing in the hilling, with a dose of 200 kg.ha⁻¹ (urea) in each application, the sources of phosphorus (diammonium phosphate 175 kg.ha⁻¹) and potassium (potassium chloride 100 kg.ha⁻¹) were completely provided at planting. Phytosanitary controls were directed especially at the control of the armyworm (*Spodoptera frugiperda*) and earthworms (*Elasmopalpus lignosellus*, *Pheltia* sp.), weed control was manual and chemical, irrigation

días después de la siembra en el aporcado, con una dosis de 200 kg.ha⁻¹ (urea) en cada aplicación, las fuentes de fósforo (fosfato diamónico 175 kg.ha⁻¹) y potasio (cloruro de potasio 100 kg.ha⁻¹) fueron proporcionados en su totalidad al momento de la siembra. Los controles fitosanitarios fueron dirigidos en especial al control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y gusanos de tierra (*Elasmopalpus lignosellus*, *Pheltia* sp.), el control de malezas fue manual y químico, el riego fue por gravedad, aplicado de acuerdo al requerimiento del cultivo. Las variables evaluadas fueron: altura de la planta (APt), medido desde la base hasta la unión de la hoja bandera con el tallo; altura de la mazorca (AMz), considerado desde la base hasta el nudo de inserción de la mazorca con el tallo; días a la floración masculina (DFm), tomado desde la siembra, hasta que el 50 % de las plantas se encuentren soltando polen; días a la floración femenina (DFf), evaluado desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas se encuentren con el estigma receptivo y rendimiento de grano (Rto), ajustado con base en la cantidad de plantas faltantes, porcentaje de desgrane y porcentaje de humedad (14 %), así: $Rto (kg.ha^{-1}) = [10.000 m^2/AP] \times 0,971 \times PF_{aj} \times FH_{aj} \times PC \times D$, donde, AP= área de la parcela en m²; el valor de 0,971 es un factor constante por el efecto de borde; factor de ajuste por plantas faltantes $PF_{aj} = [N^{\circ} \text{ totales de plantas} - 0,3 \times N^{\circ} \text{ de fallas}] / [N^{\circ} \text{ totales de plantas} - N^{\circ} \text{ de fallas}]$; factor de ajuste al 14 % de humedad del grano $FH_{aj} = [100 - \% \text{ de humedad de grano}$

was by gravity, applied according to the requirement of the crop. The variables evaluated were: plant height (APt), measured from the base to the union of the flag leaf with the stem; cob height (AMz), considered from the base to the insertion node of the cob with the stem; days to male flowering (DFm), taken from planting, until 50 % of the plants are releasing pollen; days to female flowering (DFf), evaluated from planting until 50 % of the plants meet the receptive stigma and grain yield (Rto), adjusted based on the number of missing plants, percentage of shelling and percentage humidity (14 %), thus: $Rto (kg.ha^{-1}) = [10,000 m^2/AP] \times 0,971 \times PF_{aj} \times FH_{aj} \times PC \times D$, where, AP=area of the plot in m²; the value of 0,971 is a constant factor for the edge effect; adjustment factor for missing plants $PF_{aj} = [Total \text{ number of plants} - 0,3 \times Number \text{ of failures}] / [Total \text{ number of plants} - Number \text{ of failures}]$; adjustment factor at 14 % grain moisture $FH_{aj} = [100 - \% \text{ grain moisture at harvest}] / 96$; PC= field weight; shelling percentage $D = [grain \text{ weight}/cob \text{ weight}] \times 100$. These variables were also studied in other similar investigations (Guzmán *et al.*, 2017; Chuquija and Huanuqueño, 2015).

Experimental design

For the analysis of the statistical design and the genetic design of the variables, the SAS System V8 software was used (SAS, 2014). The experimental design used was a 5 x 5 lattice, with four repetitions, which has the following additive linear model: $Y_{ijk} = \mu + \pi_k + \tau_1 + \beta I_{(i(k))} + \varepsilon_{(ijk)}$; where: Y_{ijk} = observation of the i-th genotype, of the

a la cosecha]/96; PC= peso en campo; porcentaje de desgrane $D = [\text{peso de grano}/\text{peso de mazorca}] \times 100$. Estas variables también fueron estudiadas en otras investigaciones similares (Guzmán *et al.*, 2017; Chuquiya y Huanuqueño, 2015).

Diseño experimental

Para el análisis del diseño estadístico y el diseño genético de las variables fue usado el software SAS System V8 (SAS, 2014). El diseño experimental utilizado fue látice 5 x 5, con cuatro repeticiones, el cual posee el siguiente modelo lineal aditivo: $Y_{ijk} = \mu + \pi_k + \tau_i + \beta I_{j(k)} + \varepsilon_{ijk}$; donde: Y_{ijk} = observación del genotipo i -ésimo, del j -ésimo bloque dentro de la k -ésima repetición; μ = media general; π_k = efecto de la repetición k -ésima; τ_i = efecto del i -ésimo genotipo; $\beta I_{j(k)}$ = Efecto del j -ésimo bloque dentro de la k -ésima repetición; ε_{ijk} = Efecto residual intra bloque incompleto que se considera que está normal e independientemente distribuido (media cero y varianza σ^2). El experimento fue realizado en dos años o campañas. El análisis combinado de años fue analizado después de realizada la prueba de homogenización de la varianza de los errores ($p \leq 0,05$), considerando fijos a los genotipos y aleatorias a las campañas (años). La comparación de medias fue realizada con la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$ y $p \leq 0,01$.

Para la evaluación de la ACG y ACE se utilizó el método II, modelo I de Griffing (1956), donde fueron incluidos solo los progenitores (LE) y todas las F1 sin sus recíprocos:

j -th block within the k -th repetition; μ = general mean; π_k = effect of the k -th repetition; τ_i = effect of the i -th genotype; $\beta I_{j(k)}$ = Effect of the j -th block within the k -th repetition; ε_{ijk} = Incomplete intra-block residual effect considered to be normal and independently distributed (zero mean and variance σ^2). The experiment was carried out in two years or campaigns. The combined analysis of years was analyzed after homogenization test of the variance of the errors ($p \leq 0,05$), considering the genotypes as fixed and the campaigns as random (years). The comparison of means was performed with the test of minimum significant difference (DMS) with a significance level of $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$.

For the evaluation of the ACG and ACE, method II, model I of Griffing (1956) was used, where only the parents (LE) and all the F1 without their reciprocals were included: $X_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + \beta_k + 1/bc \sum_k \sum_l e_{ijkl}$; the effects were estimated as follows: $g_i = (X_{(i)} + x_{ii}) / ((p+2)) - (2X_{(.)}) / p(p+2)$ y $s_{ij} = x_{ij} - (X_{(i)} + x_{ii} + X_{(j)} + x_{jj}) / ((p+2)) + (2X_{(.)}) / ((p+1)(p+2))$, where, X_{ijk} = effect of the ij genotype in the k -th block; μ = general mean; g_i = ACG effect of the i -th LE; g_j = ACG effect of the j -th LE; s_{ij} = effect of ACE for the cross between the i -th and j -th LE, β_k = effect of block k , $X_{(i)}$ = total of the i -th LE, $X_{(j)}$ = total of the j -th LE, x_{ii} = total of the crosses where the i -th LE intervenes, x_{jj} = total of the crosses where the j -th LE intervenes, $X_{(.)}$ = total of the LE and their direct crosses; p = total number of LE.

The relative importance of ACG and ACE was evaluated with the

$X_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + \beta_k + 1/bc \sum_k \sum_l e_{ijkl}$; los efectos fueron estimados de la siguiente manera: $g_i = (X_{(i)} + x_{ii}) / ((p+2) - (2X_{(i)}) / (p+2))$ y $s_{ij} = x_{ij} - (X_{(i)} + x_{ii} + X_{(j)} + x_{jj}) / ((p+2) + (2X_{(i)}) / ((p+1)(p+2)))$, donde, X_{ijk} = efecto del genotipo ij en el k-ésimo bloque; μ = media general; g_i = efecto de ACG de la i-ésima LE; g_j = efecto de ACG de la j-ésima LE; s_{ij} = efecto de ACE para el cruce entre la i-ésima y j-ésima LE, β_k = efecto del bloque k, X_i = total de la i-ésima LE, X_j = total de la j-ésima LE, x_{ii} = total de las cruzas donde interviene la i-ésima LE, x_{jj} = total de las cruzas donde interviene la j-ésima LE, $X_{..}$ = total de las LE y sus cruzas directas; p = número total de LE.

La importancia relativa de ACG y ACE fue evaluada con la fórmula expuesta por Baker, (1978): $[2 * CM_ACG] / [2 * CM_ACG + CM_ACE]$; donde: $CMACG$ = cuadrado medio de la aptitud combinatoria general y $CMACE$ = cuadrado medio de la aptitud combinatoria específica. La relación ACG/ACE cercana a uno, indica que existe mayor disposición de los genotipos a los efectos de ACG (Baker, 1978).

La heterosis fue evaluada de la siguiente manera: $h = [(F1 - Pm) / Pm] \times 100$ y la heterobeltiosis así: $H = [(F1 - Ps) / Ps] \times 100$, donde, $F1$ = promedio del híbrido; Pm = promedio de las LE que forman el híbrido; Ps = media de la mejor LE que interviene en la cruce.

formula presented by Baker, (1978): $[2 * CM_ACG] / [2 * CM_ACG + CM_ACE]$; where: $CMACG$ = mean square of the general combining ability and $CMACE$ = mean square of the specific combining ability. The ACG/ACE ratio close to one indicates that there is a greater disposition of the genotypes for the purposes of ACG (Baker, 1978).

Heterosis was evaluated as follows: $h = [(F1 - Pm) / Pm] \times 100$ and heterobeltiosis as follows: $H = [(F1 - Ps) / Ps] \times 100$, where, $F1$ = hybrid average; Pm = average of the LE that form the hybrid; Ps = average of the best LE involved in the cross.

Results and discussion

Analysis of variance

By means of the combined analysis of variance (table 2), statistical differences were determined in years (A), for all variables ($p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$), except in AMz, this feature denotes the difference between years or campaigns considering an effect of the environment on experimentation (Hallauer *et al.*, 2010; Maqbool *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2017). Genotypes had high significance ($p \leq 0.01$) in all variables, due to manifest genetic variability among them (Prasanna and Ratna, 2016). There were also differences ($p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$) in ACG and ACE, due to additive and non-additive genes, relevant to the inheritance of the characteristics of the LE (Aslam *et al.*, 2017; Larièpe *et al.*, 2017; Noëlle *et al.*, 2017). Evaluating LE in different years, localities or sites can guarantee stability in expression (Ertiro *et al.*, 2017).

Resultados y discusión

Análisis de varianza

Mediante el análisis de varianza combinado (cuadro 2), se determinó

diferencias estadísticas en años (A), para todas las variables ($p \leq 0,01$ y $p \leq 0,05$), excepto en AMz, esta particularidad denota la diferencia entre años o campañas considerando un efecto del ambiente en la experimentación (Hallauer *et al.*, 2010; Maqbool *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2017). Los genotipos tuvieron alta significancia ($p \leq 0,01$) en todas las variables, debido a una manifiesta variabilidad genética entre ellas (Prasanna y Ratna, 2016). También existió diferencias ($p \leq 0,01$ y $p \leq 0,05$) en ACG y ACE, debido a genes aditivos y no aditivos, relevantes para la herencia de los caracteres de las LE (Aslam *et al.*, 2017; Larièpe *et al.*, 2017; Noëlle *et al.*, 2017). Evaluar las LE en diferentes años, localidades o sitios puede garantizar estabilidad en la expresión (Ertiro *et al.*, 2017;).

En la interacción genotipos x años, existió diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), únicamente en DFm y DFf, por tanto, la expresión de estos caracteres fue diferente en las dos campañas y con suficiente variabilidad genética (Ali *et al.*, 2017). En la interacción ACG x A y ACE x A, únicamente DFm y DFf, mostraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$), en las dos campañas del cultivo. La relación ACG/ACE, fue inferior a la unidad en todos los caracteres, siendo más influenciados por los efectos de ACG, en APt, DFm y DFf y contrario a esto, AMz y Rto tuvieron mayor influencia de ACE, esta aseveración es corroborado por varios autores en investigaciones similares (Rovaris *et al.*, 2014; Hosana *et al.*, 2015) y con efectos de genes

In the genotype x year interaction, there were highly significant differences ($p \leq 0,01$), only in DFm and DFf, therefore, the expression of these characters was different in the two campaigns and with sufficient genetic variability (Ali *et al.*, 2017). In the ACG x A and ACE x A interaction, only DFm and DFf showed highly significant differences ($p \leq 0,01$), in the two cultivation campaigns. The ACG/ACE ratio was lower than unity in all the characters, being more influenced by the effects of ACG, in APt, DFm and DFf and contrary to this, AMz and Rto had a greater influence of ACE, this assertion is corroborated by several authors in similar investigations (Rovaris *et al.*, 2014; Hosana *et al.*, 2015) and with effects of additive genes on APt, DFm and DFf (Hoque *et al.*, 2016; Begum *et al.*, 2018) and non-genes additives on AMz (Hoque *et al.*, 2016; Begum *et al.*, 2018) and Rto (Abdel-Moneam *et al.*, 2009).

General combinatorial fitness

The effects of the ACG can be seen in figure 1. It is possible to accept LE with negative ACG effects for APt, AMz, DFm and DFf, since it is necessary to obtain small and early plants and opposite for Rto (Begum *et al.*, 2018). The LE6 genotype had the best effects for APt (-18.26 cm), AMz (-9.37 cm), DFm (-1.43 days) and DFf (-1.40 days) and a negative effect for Rto (-0.46 t.ha⁻¹). The positive values of the parents indicate a high degree of contribution of performance to the progeny, therefore, the effects of additive genes are of greater importance (Fasahat *et al.*, 2016), under this consideration it is important to mention that LE2 (-0.56

aditivos sobre APt, DFm y Dff (Hoque *et al.*, 2016; Begum *et al.*, 2018) y genes no aditivos sobre AMz (Hoque *et al.*, 2016; Begum *et al.*, 2018) y Rto (Abdel-Moneam *et al.*, 2009).

t.ha⁻¹) had the greatest negative effect and LE3 (0.52 t.ha⁻¹) had the greatest positive effect for Rto, but the variables DFm and Dff were 37 % lower in relation to the genotype of better

Cuadro 2. Cuadrados medios, coeficiente de variación y relación ACG/ACE.

Table 2. Average squares, coefficient of variation and ACG / ACE ratio.

Fuente de Variación	GL	APt	AMz	DFm	DFf	Rto
Años (A)	1	19.582,6 **	465,00 ns	7.480,01 **	7.899,43 **	7,14 *
Genotipos (G)	20	8.910,97 **	3.206,43 **	42,65 **	58,86 **	42,20 **
ACG	5	7.079,45 **	1.445,52 **	65,60 **	78,75 **	12,20 *
ACE	15	9.521,47 **	3.793,40 **	35,00 **	52,23 **	52,30 **
G x A	20	352,67 ns	108,97 ns	5,31 **	6,97 **	0,98 ns
ACG x A	5	394,64 ns	123,26 ns	7,12 **	6,61 ns	1,71 ns
ACE x A	15	338,69 ns	104,20 ns	4,70 ns	7,09 **	0,74 ns
Error conjunto	120	398,89	109,56	1,72	3,06	1,01
Media	-	169,04	84,15	91,07	93,77	5,38
CV	-	11,82	12,44	1,44	1,87	18,60
ACG/ACE		0,60	0,43	0,79	0,75	0,32

ns: no significativo, ACG: aptitud combinatoria general, ACE: aptitud combinatoria específica, CV: coeficiente de variación, * Significativo a un nivel de probabilidad de 0,05 %, ** Significativo a un nivel de probabilidad de 0,01 %.

ns: not significant, ACG: general combining ability, ACE: specific combining ability, CV: coefficient of variation, * Significant at a probability level of 0.05%, ** Significant at a probability level of 0.01%.

Aptitud combinatoria general

Los efectos de la ACG se pueden observar en la figura 1. Es posible aceptar LE con efectos de ACG negativos para APt, AMz DFm y DFf, pues es necesario obtener plantas pequeñas y precoces y lo contrario para Rto (Begum *et al.*, 2018). El genotipo LE6 tuvo los mejores efectos para APt (-18,26 cm), AMz (-9,37 cm), DFm (-1,43 días) y DFf (-1,40 días) y un efecto negativo para Rto (-0,46 t.ha⁻¹). Los valores positivos de los padres indican un alto grado de contribución del rendimiento a la progenie, por

effect. The LE5 genotype had an ACG effect of 40% less than LE3 and shows positive effects for the other variables. Parents with high ACG can show a good hybrid performance even though the ACE of the crosses is low (Zhang *et al.*, 2015), therefore the selection of parents should always be based on a high degree of ACG (Moradi, 2014).

Specific combinatorial aptitude

The effects of ACE (figure 2) showed that: in APt and AMz, there were no genotypes with negative effects, however, LE 1x3 has the lowest effects in these variables (1,97 cm and 4,88

tanto, son de mayor importancia los efectos de genes aditivos (Fasahat *et al.*, 2016), bajo esta consideración es importante mencionar que LE2 (-0,56 t.ha⁻¹) tuvo el mayor efecto negativo y LE3 (0,52 t.ha⁻¹) tuvo el mayor efecto positivo para Rto, pero las variables DFm y DFf fueron inferiores en un 37 % en relación al genotipo de mejor efecto. El genotipo LE5 tuvo un efecto de ACG de 40 % inferior a LE3 y muestra efectos positivos para el resto de variables. Los padres con ACG alto pueden mostrar un buen rendimiento híbrido a pesar de que la ACE de las cruzas sean bajas (Zhang *et al.*, 2015), por ello la selección de padres debe ser basado siempre en un grado alto de ACG (Moradi, 2014).

cm respectively), is It is important to note that LE whose high ACG effect did not contribute to the formation of high effect ACE genotypes for small plants. They had greater negative effects in DFm, crosses LE 2x6 (-2,00 days) and LE 5x6 (-1,98 days), for DFf the greatest negative effect was for LE 4x6 (-2,7 days), LE 4x5 and LE 2x6 , both with a value of -2,23 days, denoting the contribution of the high effect of ACG of LE6. According to Begum *et al.* (2018) and Tajwar and Chakraborty (2013) the effects of negative ACE have a predisposition to form early plants. For Rto all crosses show positive effects, being higher for LE 4x5 (2,24 t.ha⁻¹), LE 2x4 (1.70 t.ha⁻¹), and LE 4x6 (1.65 t.ha⁻¹), where

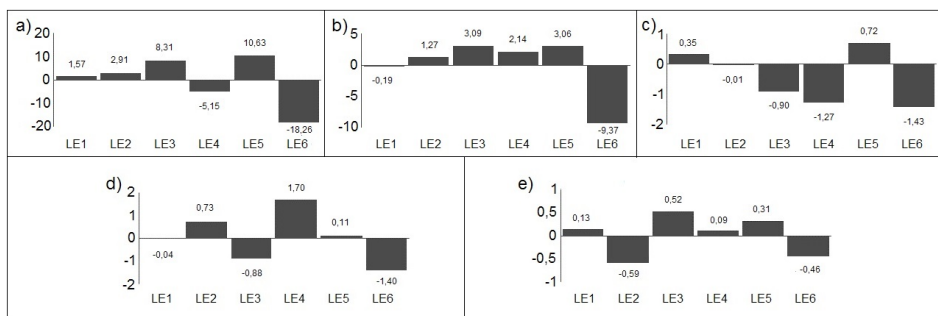


Figura 1. Efectos de la aptitud combinatoria general en a) APt (cm); b) AMz (cm); c) DFm; d) DFf y e) Rto (t.ha⁻¹).

Figure 1. Effects of general combining ability on a) APt (cm); b) AMz (cm); c) DFm; d) DFf and e) Rto (t.ha⁻¹).

Aptitud combinatoria específica

Los efectos de ACE (figura 2) arrojó que: en APt y AMz, no existieron genotipos con efectos negativos, sin embargo, LE 1x3 tiene los efectos más bajo en estas variables (1,97 cm y 4,88 cm respectivamente), es importante notar que la LE cuyo alto efecto de

the LE5 whose effect was high on ACG forms a cross with high ACE effect. The action of non-additive genes is inferred in high ACE effects (Moterle *et al.*, 2011). Therefore, the development of hybrids is suggested, whose overdominance and epistasis effect makes possible the prediction

ACG, no contribuyó a la formación de genotipos de alto efecto de ACE para plantas pequeñas. Tuvieron mayores efectos negativos en DFm, las cruzas LE2x6 (-2,00 días) y LE5x6 (-1,98 días), para DfF el mayor efecto negativo fue para LE 4x6 (-2.7 días), LE 4x5 y LE 2x6, ambas con un valor de -2,23 días, denotando la contribución del alto efecto de ACG de LE6. Según Begum *et al.* (2018) y Tajwar y Chakraborty (2013) los efectos de ACE negativo tienen predisposición a formar plantas precoces. Para Rto todas las cruzas muestran efectos positivos, siendo mayor para LE 4x5 (2,24 t.ha⁻¹), LE 2x4 (1,70 t.ha⁻¹), y LE 4x6 (1,65 t.ha⁻¹), donde la LE5 cuyo efecto fue alto en ACG forma una cruz con alto efecto de ACE. Se infiere la acción de genes no aditivos en efectos altos de ACE (Moterle *et al.*, 2011). Por tanto es sugerible el desarrollo de híbridos, cuyo efecto de sobredominancia y epistasis haga posible la predicción del potencial heterótico (Noëlle *et al.*, 2017).

of heterotic potential (Noëlle *et al.*, 2017).

Heterosis

The percentages of heterosis (h) and heterobeltiosis (H) can be seen in table 3. The variable Rto denotes positive values and over one hundred percent for h and H, in all crosses, whose mean values were 252.10 % and 183.13 % respectively. This result is consistent with related research where heterosis percentages are considerably high (Makumbi *et al.*, 2011; Owusu *et al.*, 2018). The genotypes with highest h were LE 2x4 (454.43 %), LE 4x6 (440.73 %) and LE 4x5 (337.97 %), with H being between 5 and 35 % lower in the same genotypes. The crosses mentioned were also those with the greatest effect for ACE, whose contribution from the LE6, LE5 and LE2 lines correspond to genotypes with high ACG effects. For Apt the crosses were of positive values and of higher h for LE 1x3 (34,84 %) and LE 2x5 (39,93 %) with the H having lower percentages between 21 to 32 %

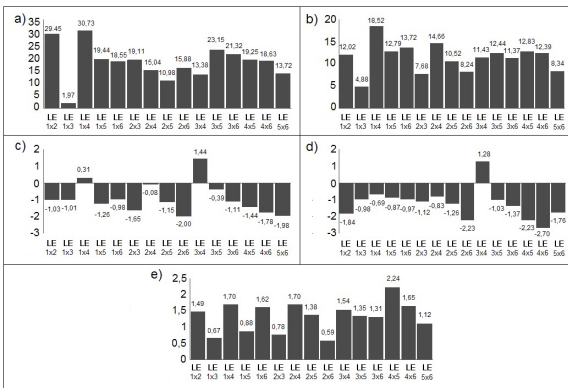


Figura 2. Efectos de la aptitud combinatoria específica en a) APT (cm); b) AMz (cm); c) DFm; d) DfF y e) Rto (t.ha⁻¹).

Figure 2. Effects of specific combining ability on a) APT (cm); b) AMz (cm); c) DFm; d) DfF and e) Rto (t.ha⁻¹).

Heterosis

Los porcentajes de heterosis (h) y heterobeltiosis (H) se pueden observar en el cuadro 3. La variable Rto denota valores positivos y sobre el cien por ciento para h y H, en todas las cruzas, cuyos valores promedios fueron de 252,10 % y 183,13 % respectivamente. Este resultado concuerda con investigaciones afines donde los porcentajes de heterosis son considerablemente altos (Makumbi *et al.*, 2011; Owusu *et al.*, 2018). Los genotipos de mayor h fueron LE 2x4 (454,43 %), LE 4x6 (440,73 %) y LE 4x5 (337,97 %), siendo H entre el 5 y 35 % inferiores en los mismos genotipos. Los cruzamientos mencionados también fueron los de mayor efecto para ACE, cuya contribución de las líneas LE6, LE5 y LE2 corresponden a genotipos con altos efectos de ACG. Para Apt las cruzas fueron de valores positivos y de mayor h para LE 1x3 (34,84 %) y LE 2x5 (39,93 %) siendo la H de porcentajes inferiores entre 21 al 32 % de diferencia, el genotipo LE 1x3 tiene mayor tendencia a formar plantas pequeñas, por su efecto bajo de ACE. Para AMz, La cruza de menor porcentaje de h y H fue LE 1x3 (54,19 % y 38,38 % respectivamente). Para DFm la h de las mejores cruzas fueron LE 2x6 (-5,84 %) y LE 5x6 (-5,86 %) con H entre 16 y 29 % superior, cuyo efecto de ACE es negativo es decir con tendencia a la precocidad y con altos efectos de ACG para LE5 y LE6. La h más baja para DFF fue para LE 4x6 (-2,70 %), LE 2x6 (-2,23) y LE 4x5 (-2,23) cuyo porcentaje de heterobeltiosis difiere positivamente entre las cruzas, de 23 a 31 %, con

difference, the LE 1x3 genotype has greater tendency to form small plants, due to its low ACE effect. For AMz, the cross with the lowest percentage of h and H was LE 1x3 (54.19 % and 38.38 % respectively). For DFm the h of the best crosses were LE 2x6 (-5.84 %) and LE 5x6 (-5.86 %) with H between 16 and 29 % higher, whose ACE effect is negative, that is, with a tendency to precocity and with high ACG effects for LE5 and LE6. The lowest h for DFF was for LE 4x6 (-2.70 %), LE 2x6 (-2.23) and LE 4x5 (-2.23) whose percentage of heterobeltiosis differs positively between crosses, from 23 to 31 %, with high effects of ACE, therefore, with a predisposition to earliness. Hybrid vigor is the product of non-additive genes resulting from high ACE values, as evidenced in this research as in other related studies (Bertoia and Aulicino, 2014; Aslam *et al.*, 2017).

It is important to note that the LE 4x6 genotype shows percentages of heterosis and ACE effects that are consistent with performance and earliness characteristics, however, in parent LE6 of this cross, the ACG effects are very considerable for all variables, not so for Rto, on the contrary, the parental LE4 did not stand out in any studied character, although its ACG value for performance was low and positive.

The LE 4x5 diallelic cross was the one with the highest Rto (8,12 t.ha⁻¹) higher than the controls PM 213, EXP 05 and H 5070 and third with the highest heterosis for h, but also with a high percentage in relation to H for the Rto. This genotype has an ACE effect, according to earliness

altos efectos de ACE, por tanto, con predisposición a la precocidad. El vigor híbrido es producto de genes no aditivos producto de altos valores de ACE, así fue evidenciado en esta investigación al igual que en otros estudios relacionados (Bertoia y Aulicino, 2014; Aslam *et al.*, 2017):

and performance. The parents of this crossing show a high effect of ACE for LE5 in Rto, APt and AMz, the parent LE4 did not distinguish in the effects of ACE, which implies that depending on the parental combination, greater or lesser hybrid vigor can be expressed, therefore, there is no direct

Cuadro 3. Porcentaje de heterosis y heterobeltiosis de las variables analizadas.

Table 3. Percentage of heterosis and heterobeltiosis of the variables analyzed.

Híbridos	APt		AMz		DFm		DFf		Rto	
	h	H	h	H	h	H	h	H	h	H
LE 1x2	61,26	56,58	72,22	61,75	-3,73	-3,86	-5,12	-6,32	247,59	160,94
LE 1x3	34,84	23,73	54,19	38,38	-2,92	-4,53	-3,29	-4,67	121,37	86,19
LE 1x4	68,89	60,68	96,78	95,47	-1,13	-1,46	-3,38	-5,01	305,97	197,08
LE 1x5	49,12	36,48	74,15	61,48	-4,03	-4,97	-4,13	-4,50	169,14	165,78
LE 1x6	62,32	39,96	93,67	67,22	-4,24	-5,07	-4,76	-5,19	252,92	171,70
LE 2x3	44,56	36,37	52,00	44,78	-4,13	-5,85	-3,90	-6,45	151,99	69,10
LE 2x4	51,63	40,28	79,89	70,02	-2,06	-2,25	-3,96	-4,39	454,43	433,51
LE 2x5	39,93	31,64	62,38	60,16	-4,42	-5,23	-4,97	-5,82	245,61	157,29
LE 2x6	55,50	30,81	71,12	40,19	-5,84	-6,78	-6,50	-8,09	284,83	271,18
LE 3x4	44,75	26,94	68,07	51,74	0,41	-1,59	-0,84	-3,88	217,37	108,87
LE 3x5	44,00	43,59	60,23	54,66	-2,82	-5,36	-3,80	-5,53	147,11	110,00
LE 3x6	53,76	23,40	70,28	34,34	-4,10	-4,88	-4,69	-5,63	174,09	87,51
LE 4x5	50,64	31,79	77,20	65,32	-3,55	-4,18	-5,40	-6,64	337,97	217,97
LE 4x6	65,34	49,01	94,34	66,86	-4,42	-5,56	-6,40	-8,40	440,73	402,59
LE 5x6	48,73	19,10	72,03	39,43	-5,86	-7,58	-6,04	-6,82	230,45	152,17

h: heterosis en relación al promedio de los parentales, H: heterobeltiosis en relación al mejor parental.

h: heterosis in relation to the average of the parents, H: heterobeltiosis in relation to the best parent.

Es importante notar que el genotipo LE 4x6 muestra porcentajes de heterosis y efectos de ACE que concuerdan con características de rendimiento y precocidad, sin embargo,

relationship between the parental combination of good or bad response, for the best expression of heterosis (Bhavana *et al.*, 2011; Mutlag *et al.*, 2018). There is evidence that a line

en el parental LE6 de este cruce, los efectos de ACG son muy considerables para todas las variables, no así para Rto, al contrario, el parental LE4 no destacó en ningún carácter estudiado no obstante su valor de ACG para rendimiento fue bajo y positivo.

El cruzamiento dialélico LE 4x5 fue el de mayor Rto (8,12 t.ha⁻¹) superior a los testigos PM 213, EXP 05 y H 5070 y tercero de mayor heterosis para h, pero también de un alto porcentaje en relación a H para el Rto. Este genotipo tiene un efecto de ACE, acorde a la precocidad y rendimiento. Los parentales de este cruce muestran un alto efecto de ACG para LE5 en Rto, APt y AMz, el parental LE4 no destacó en los efectos de ACG, lo que implica que según la combinación parental puede expresarse mayor o menor vigor híbrido, por tanto, no existe una relación directa entre la combinación parental de buena o mala respuesta, para la mejor expresión de la heterosis (Bhavana *et al.*, 2011; Mutlag *et al.*, 2018). Existen evidencias de que una línea con alto efecto de ACG al combinarse con otro de bajo efecto de ACG puede generar un híbrido con alto efecto de ACE (Aslam *et al.*, 2017), sin embargo dos líneas con efectos altos de ACG no precisa alta heterosis (Borghí *et al.*, 2012). Las aseveraciones mencionadas se refuerzan con el estudio realizado sobre el comportamiento de poblaciones de maíz, donde, la población 24 (pob24, fuente de germoplasma a la que pertenece LE4) del CIMMYT, mediante el cruzamiento Pob24 x ♂PM-12 mostró un comportamiento adecuado como progenitor, por los

with a high ACG effect when combined with another with a low ACG effect can generate a hybrid with a high ACE effect (Aslam *et al.*, 2017), however two lines with high ACG effects do not require high heterosis (Borghí *et al.*, 2012). The aforementioned assertions are reinforced by the study carried out on the behavior of maize populations, where population 24 (pop24, source of germplasm to which LE4 belongs) of the CIMMYT, through the crossing of Pob24 x ♂PM-12 showed adequate behavior as parent, due to good results obtained on grain yield, good ACE and heterosis (Chuquija and Huanuqueño, 2015).

Conclusions

Additive gene effects were more important for the variables plant height, days to male and female flowering, but not for cob height and grain yield, which were governed by non-additive gene effects. According to the effects of ACE, the inbred line CML 487 is suggested as a promising parent for height and earliness and CM 428 and CML 229 for performance. On the other hand, the significance in the specific combinatorial aptitude for grain yield and earliness of crosses CML 453 x CML 486 and CML 229 x CML 487, respectively, leads to the need to evaluate their performance in order to improve the selection process and promote the development of new hybrids. The evaluation of heterosis is of importance in the earliness and performance gain, but not for the decrease in height. The dialectic crosses with the best expression of

buenos resultados obtenidos sobre el rendimiento de grano, buena ACE y heterosis (Chuquiya y Huanuqueño, 2015)

Conclusiones

Fueron más importantes los efectos génicos aditivos para las variables altura de plantas, días a la floración masculina y femenina, no así para altura de la mazorca y rendimiento de grano que estuvieron gobernados por efectos génicos no aditivos. Según los efectos de ACE se sugiere a la línea endogámica CML 487 como parental promisorio para altura y precocidad y CM 428 y CML 229 para rendimiento. Por otro lado, la significancia en la aptitud combinatoria específica para rendimiento de grano y precocidad de los cruces CML 453 x CML 486 y CML 229 x CML 487, respectivamente, conlleva a la necesidad de evaluar su desempeño a fin de mejorar el proceso de selección y potenciar el desarrollo de nuevos híbridos. La evaluación de la heterosis resulta de importancia en la ganancia de precocidad y rendimiento, no así para la disminución en la altura. Las cruces dialélicas con mejor expresión de heterosis para rendimiento fueron CML 453 x CML 487, superado por CML 229 x CML 453 y CML 453 x CML 486, siendo esta última la de mejor performance en rendimiento. El parental CML 487 en determinadas cruces específicas proporcionaría ventajas en la precocidad respecto al resto de las líneas. A partir de las cruces evaluadas resulta de interés el estudio de los efectos recíprocos dado las incipientes diferencias del comportamiento en los roles maternos de las líneas parentales.

heterosis for performance were CML 453 x CML 487, surpassed by CML 229 x CML 453 and CML 453 x CML 486, the latter being the one with the best yield performance. The parental CML 487 in certain specific crosses would provide advantages in earliness compared to rest of the lines. From the crosses evaluated, the study of the reciprocal effects is interesting given the incipient behavioral differences in the maternal roles of the parental lines.

End of English Version

Literatura citada

- Abdel-Moneam, M.A., Attia, A.N., El-Emery, M.I., and Fayed, E.A. 2009. Combining ability and heterosis for some agronomic traits in crosses of maize. *Pak. J. Biol. Sci.* 12: 433-438. Disponible en: <https://scialert.net/abstract/?doi=pjbs.2009.433.438>.
- Ali, S., Khan, N.U., Khalil, I.H., Iqbal, M., Gul, S., Ahmed, S., Ali, N., Sajjad, M., Afridi, K., Ali, I., and Khan S.M. 2017. Environment effects for earliness and grain yield traits in F1 diallel populations of maize (*Zea mays* L.). *J. Sci. Food Agric.* 97: 4408-4418. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8420>.
- Aslam, M., Sohail, Q., Maqbool, M.A., Ahmad, S., and Shahzad, R. 2017. Combining ability analysis for yield traits in diallel crosses of maize. *J. Anim. Plant Sci.* 27(1): 136-143. Disponible en: <http://www.thejaps.org.pk/docs/v-27-1/18.pdf>.
- Baker, R.J. 1978. Issues in diallel analysis. *Crop Sci.* 18 (4):533-536. Disponible en: <https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800040001x>.

- Begum, S., Alam, S.S., Omy, S.H., Amiruzzaman, M., and Rohman, M.M. 2018. Inheritance and combining ability in maize using a 7x7 diallel cross. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 10 (9):239–248. Disponible en: <https://academicjournals.org/JPBACS>.
- Bertoia, L.M., and Alicino, M.B. 2014. Maize forage aptitude: Combining ability of inbred lines and stability of hybrids. *Crop J.* 2 (6): 407–418. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.07.002>.
- Bhavana, P., Singh, R.P., and Gadag, R.N. 2011. Gene action and heterosis for yield and yield components in maize (*Zea mays*). *Indian J. Agric. Sci.* 81 (2):163–166.
- Borghini, M.L., Ibañez, M.A., Bonamico, N.C., Kandus, M.V., Gomar, D.A., Guillin, E.A., Salerno, J.C., and Di Renzo, M.A. 2012. Combining ability of flint corn inbred lines: Mal de Río Cuarto disease tolerance and grain yield. *Phyton, Int. J. Exp. Bot.* 81:123–131. Disponible en: <http://www.revistaphyton.fundromuloraggio.org.ar/vol81.html>.
- Chuquija, J.C., y Huanuqueño, E.H. 2015. Comportamiento de ocho poblaciones de maíz amarillo (*Zea mays* L.) en cruces con un probador. *Anales Científicos.* 76(1): 78–86. Disponible en: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/767/735>.
- Dezfouli, P.M., Sedghi, M., Shariatpanahi, M.E., Niazian, M., and Alizadeh, B. 2019. Assessment of general and specific combining abilities in doubled haploid lines of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Ind. Crops Prod.* 141:111754. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111754>.
- Ertiro, B.T., Beyene, Y., Das, B., Mugo, S., Olsen, M., Oikeh, S., Juma, C., Labuschagne, M., and Prasanna, B.M. 2017. Combining ability and testcross performance of drought tolerant maize inbred lines under stress and non stress environments in Kenya. *Plant Breed.* 136 (2):197–205. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pbr.12464>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2017. Datos de cultivos. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Fecha de consulta: mayo 2019.
- Fasahat, P., Rajabi, A., Rad, J.M., and Derera, J. 2016. Review article: Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biom. Biostat. Int. J.* 4 (1): 1-22. Disponible en: <https://doi.org/10.15406/bbij.2016.04.00085>.
- Ghosh, H., and Das, A. 2003. Optimal diallel cross designs for estimation of heritability. *J. Stat. Plan. Inference* 116 (1):185–196. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0378-3758\(02\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3758(02)00180-5).
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9(4):463-493. Disponible en: <https://doi.org/10.1071/BI9560463>.
- Guzmán, M., Díaz, D., Ramis, C., Figueroa-Ruiz, R., and Jiménez, R. 2017. Estimación de la aptitud combinatoria y heterosis en híbridos no convencionales de maíz con alto contenido de proteína. *Bioagro*, 29(3), 175–184. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/857/85752807003.pdf>.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., and Filho, J.B.M. 2010. Quantitative genetics in maize breeding. *Handbook of Plant Breeding*, vol 6. Springer, New York, NY. 477 p. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0_1.
- Hochholdinger, F., and Baldauf, J. A. 2018. Heterosis in plants. *Curr. Biol.* 28 (18): R1089–R1092. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982218308327>.
- Hoque, M., Akhter, F., Kadir, M., Begum, H., and Ahmed, S. 2016. Study on combining ability and heterosis for earliness and short statured plant in maize. *Bangladesh J. Agric. Res.* 41 (2): 365–376. Disponible en: <https://doi.org/10.3329/bjar.v41i2.28238>.
- Hosana, G.C., Alamerew, S., Ertiro, B.T., and Menamo, T.M. 2015. Test cross performance and combining ability of maize (*Zea mays* L.) inbred lines at Bako, Western Ethiopia. *Glob. J. INC.(USA)* 15 (4): 1-25. Disponible

- en: https://globaljournals.org/GJSFR_Volume15/1-Test-Cross-Performance-and-Combining.pdf.
- Larièpe, A., Moreau, L., Laborde, J., Bauland, C., Mezouk, S., Décousset, L., Mary-Huard, T., Fiévet, J., Gallais, A., Dubreuil, P., and Charcosset, A. 2017. General and specific combining abilities in a maize (*Zea mays* L.) test-cross hybrid panel: relative importance of population structure and genetic divergence between parents. *Theor. Appl. Genet.* 130: 403–417. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2822-z>.
- Makumbi, D., Betrán, J.F., Bänziger, M., and Ribaut, J.M. 2011. Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and Ën-stress conditions. *Euphytica* 180: 143–162. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-010-0334-5>.
- Maqbool, M.A., Aslam, M., Ali, H., Shah, T.M., and Atta, B.M. 2015. GGE biplot analysis based selection of superior chickpea (*Cicer arietinum* L.) inbred lines under variable water environments. *Pak. J. Bot.* 47 (5): 1901–1908. Disponible en: [http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/47\(5\)/38.pdf](http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/47(5)/38.pdf).
- Mather, K., and Jinks, J.L. 1982. *Biometrical genetics: The study of continuous variation*. Springer, New York, NY. 263 p. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3406-2>.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). 2017. Serie de estadísticas de producción agrícola. Lima, Perú. Disponible en: <http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/>. Fecha de consulta: mayo 2019.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). 2019. Boletín de maíz amarillo duro. Lima, Perú. Disponible en: <https://www.minagri.gob.pe/portal/boletin-de-maiz-amarillo-duro/maiz-2019>. Fecha de consulta: junio 2020.
- Miyaji, N. and Fujimoto, R. 2018. Chapter Eight-Hybrid Vigor: Importance of Epigenetic Processes and Consequences for Breeding. *Adv. Bot. Res.* 88: 247–275. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2018.10.001>.
- Moradi, M. 2014. Combining ability for grain yield and some important agronomic traits in Maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Biosci* 5 (4): 177–185. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.12692/ijb/5.4.177-185>.
- Moterle, L.M., Braccini, A.L., Scapim, C.A., Pinto, R.J., Gonçalves, L.S., do Amaral Júnior, A.T., and Silva, T.R. 2011. Combining ability of tropical maize lines for seed quality and agronomic traits. *Genet. Mol. Res.* 10 (3): 2268–2278. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4238/vol10-3gmr1129>.
- Mutlag, N.A., Fayyad, S.A., AbdulHamed, Z.A., and Ibraheem, M.M. 2018. Estimation of hybrid vigour, combining ability and gene action using (line x tester) analysis in maize. *Iraqi J. Agric. Sci.* 49 (5): 740-747. Disponible en: <http://ufds.uofallujah.edu.iq/dspace/handle/123456789/821>.
- Ndhlela, T., Herselman, L., Semagn, K., Magorokosho, C., Mutimaamba, C., and Labuschagne, M. 2015. Relationships between heterosis, genetic distances and specific combining ability among CIMMYT and Zimbabwe developed maize inbred lines under stress and optimal conditions. *Euphytica* 204: 635–647. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1353-z>.
- Noëlle, M., Richard, K., Vernon, G., Martin, Y., Laouali, M., Liliane, T., and Godswill, N. 2017. Combining ability and gene action of tropical maize (*Zea mays* L.) inbred lines under low and high nitrogen conditions. *J. Agric. Sci.* 9 (4): 222–235. Disponible en: <https://doi.org/10.5539/jas.v9n4p222>.
- Owusu, G., Nyadanu, D., Owusu-Mensah, P., Adu Amoah, R., Amissah, S., and Danso, F. 2018. Determining the effect of genotype × environment interactions on grain yield and stability of hybrid maize cultivars under multiple environments in Ghana. *Ecol. Genet. Genomics* 9: 7–15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egg.2018.07.002>.

- Prasanna, K.S.V.V., and Ratna, B.D. 2016. Combining ability and heterosis in maize (*Zea mays* L.) for grain yield and yield components. *Int. J. Agric. Environ. Biotechnol.* 9 (5): 763-772. Disponible en: DOI: 10.5958/2230-732X.2016.00099.1.
- Ranum, P., Peña Rosas, J.P., and Garcia Casal, M.N. 2014. Global maize production, utilization, and consumption. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1312: 105–112. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24650320/>.
- Rovaris, S.R.S., Paterniani, M.Z., and Sawazaki, E. 2014. Combining ability of white corn genotypes with two commercial hybrids. *Maydica* 59: 96–103. Disponible en: <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/974/834>.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). 2018. Datos meteorológicos del distrito La Molina-Lima. Disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe>. Fecha de consulta: julio 2019.
- Sprague, G., and Tatum, L. 1942. General vs. specific combining ability in single crosses of corn 1. *Agron. J.* 34: 923–932. Disponible en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/pdfs/34/10/AJ0340100923>.
- Statistical Analysis System. SAS® 2014. User's Guide. Statistics.8.0 Version. SAS Institute Inc. Cary.SAS help and Documentation. North Carolina
- Tajwar, I., and Chakraborty, M. 2013. Combining ability and heterosis for grain yield and its components in maize inbreds over environments (*Zea mays* L.). *African J. Agric. Res.* 8 (25): 3276–3280. Disponible en: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/88A51F835899>.
- Zhang, X., Lv, L., Lv, C., Guo, B., and Xu, R. 2015. Combining Ability of Different Agronomic Traits and Yield Components in Hybrid Barley. *PLoS One* 10 (6): e0126828. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126828>