

# Aptitud combinatoria y potencial agronómico de líneas de maíz con diferente nivel de endogamia

Combining ability and agronomic potential of maize lines with different level of inbreeding

María de los Ángeles Acevedo-Cortés<sup>1</sup>, Antonio Castillo-Gutiérrez<sup>1\*</sup>, María Andrade-Rodríguez<sup>1</sup>,  
María Eugenia Nuñez-Valdez<sup>2</sup>, Francisco Perdomo-Roldan<sup>1</sup>, Ramón Suárez-Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural, Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM),  
Av. Universidad 1001, 62209, Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Dinámica Celular (UAEM).

<sup>3</sup>Centro de Investigación en Biotecnología (UAEM).

\*Autor para correspondencia: antonio.castillo@uaem.mx

## Fecha de recepción:

27 de abril de 2020

## Fecha de aceptación:

23 de agosto de 2020

## Disponible en línea:

18 de diciembre de 2020

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



## Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

## RESUMEN

Determinar la aptitud combinatoria de líneas endogámicas de maíz es de suma importancia para su desarrollo, por lo cual, en este estudio, se evaluaron 15 mestizos en tres localidades de Morelos, México (P-V 2017); 36 cruza dialélicas (O-I 2018/2019) en una sola localidad, así como 15 líneas endogámicas *per se* (P-V 2018). Los objetivos de dichas evaluaciones fueron estimar y seleccionar líneas con buena aptitud combinatoria a través de prueba de mestizos; determinar si las líneas de alta Aptitud Combinatoria General (ACG) positiva para rendimiento de grano forman cruza de alta Aptitud Combinatoria Específica (ACE) positiva con líneas de ACG negativa, y evaluar el potencial agronómico de líneas de diferente nivel de endogamia. Las variables analizadas fueron la floración masculina, altura de planta, peso de 100 semillas y rendimiento. Las líneas CML341, CML576 y CML549 resultaron con ACG positiva en mestizos y cruza dialélicas, y las CML340, CML342, CML341, LUM124 y LUM194 fueron las de mayor rendimiento de grano.

## PALABRAS CLAVE

Mestizos, cruza dialélicas, evaluación *per se*, *Zea mays* L.

## ABSTRACT

In the development of inbred maize lines, it is of great importance to determine their combinatory aptitude; therefore, in this study, 15 top-crosses were evaluated in three localities from Morelos, Mexico (P-V 2017); 36 diallelic crosses were evaluated in a single locality (O-I 2018/2018/2019), and 15 inbred lines were evaluated *per se* (P-V 2018). The objectives were to estimate and select lines with good General Combinatory Aptitude (GCA) through topcrosses testing, to determine if positive high GCA lines for grain yield form positive high Specific Combinatory Aptitude (SCA) crosses with negative GCA lines, and to evaluate the agronomic potential of lines of different level of inbreeding. The variables studied were male flowering, plant height, weight of 100 kernels, and grain yield. The CML341, CML576 and CML549 lines resulted in positive GCA in topcrosses and diallelic crosses, whereas CML340, CML342, CML341, LUM124 and LUM194 were the highest in grain yield.

## KEYWORDS

Top cross, diallelic crosses, evaluation *per se*, *Zea mays* L.

## INTRODUCCIÓN

En México, el maíz es uno de los cultivos de mayor importancia a nivel nacional, por lo que se producen anualmente alrededor de 7.5 millones de hectáreas, de las cuales, en el ciclo primavera-verano, se siembran aproximadamente 5.5 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de  $2.6 \text{ t ha}^{-1}$  (SIAP 2017); en el estado de Morelos, la superficie sembrada de maíz es de cerca de 33,412 ha, con un promedio de rendimiento de  $3.7 \text{ t ha}^{-1}$  (SAGARPA 2017). Debido a que los rendimientos de grano obtenidos en temporal son bajos, resulta necesario implementar estrategias que los incrementen, y una alternativa es el mejoramiento genético de este cereal.

En programas de mejoramiento genético de maíz, un objetivo importante es generar líneas endogámicas con alto potencial de rendimiento, buen comportamiento agronómico y buena aptitud combinatoria (Buenrostro-Robles et al. 2017). La aptitud combinatoria general (ACG) se asocia a la acción génica de tipo aditivo (Falconer y Mackay 2006), en tanto que la aptitud combinatoria específica (ACE) es el resultado de la acción génica no aditiva (dominancia y epistasia) (Poehlman y Sleper 2003). En el fitomejoramiento, se han desarrollado técnicas para estimar la magnitud de los efectos de la ACG y ACE, de las cuales destacan la prueba basada en la formación y evaluación de mestizos, que facilita la estimación del valor genético aditivo del germoplasma (Sánchez-Ramírez et al. 2020), y la basada en cruzas dialélicas, que permite determinar tanto el valor aditivo como el no aditivo (Ramírez-Díaz et al. 2019).

La prueba de mestizos es comúnmente utilizada debido a la facilidad para efectuarla, y al costo bajo de implementarla con un gran número de líneas endogámicas (Castañón et al. 1998); otra razón importante de su uso es el alto grado de efectividad para discriminar y seleccionar líneas con sobresaliente ACG (Ledezma-Miramontes et al. 2015), tanto en pruebas tempranas como en pruebas tardías (Ramírez et al. 1998; Ramírez et al. 2007). La principal ventaja de la prueba temprana es que permite eliminar al menos 50% de líneas con baja o nula ACG, lo que reduce costos de evaluación de un gran número de líneas en generaciones avanzadas (Sprague 1946). La prueba temprana se sustenta en que la aptitud combinatoria de las líneas se define en

las primeras etapas de endogamia (Bernardo 1992), en tanto que la evaluación tardía se fundamenta en la selección de líneas en etapas tempranas, con base en la expresión fenotípica de características de importancia agronómica, para posteriormente formar mestizos e identificar las de mayor ACG (Ramírez et al. 1998). Por otro lado, un elemento clave en la prueba de mestizos es la elección del probador, lo que ha sido ampliamente estudiado, y se sugiere que debe poseer una baja expresión fenotípica de la característica de interés, así como una nula aptitud combinatoria (Hallauer et al. 2010; Lobato-Ortiz et al. 2010).

La prueba de mestizos formados con líneas  $S_5$  y dos líneas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), como probadores, permitió seleccionar líneas de alta ACG en la variable rendimiento de grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), valor que fluctuó entre 483 y  $768 \text{ kg ha}^{-1}$  (Castañón et al. 1998). En otra evaluación de mestizos, se encontraron seis sobresalientes con rendimientos de grano de entre 7,215 y  $7,816 \text{ kg ha}^{-1}$ , estadísticamente igual a los testigos comerciales usados (Velázquez-Cardelas et al. 2018). Por otro lado, se han reportado rendimientos de grano que oscilan entre los 4,495 y los  $8,074 \text{ kg ha}^{-1}$ , y un rendimiento del probador de  $3,524 \text{ kg ha}^{-1}$  (Ledezma-Miramontes et al. 2015).

En cuanto a la formación y evaluación de cruzas dialélicas, se utiliza frecuentemente para evaluación del potencial genético de líneas endogámicas (Hallauer et al. 2010; Sánchez-Ramírez et al. 2017). Al respecto, se reporta que las cruzas con efectos altos de ACE en rendimiento son el resultado de líneas progenitoras con alta ACG (Escorcía-Gutiérrez et al. 2010). Pérez-López et al. (2014) dieron a conocer que, en cruzas de alto rendimiento, al menos una de las líneas progenitoras presentó alta ACG y mostró efectos altos en ACE, mientras que cruzas cuyas dos líneas fueron de baja ACG presentaron efectos bajos de ACE. Otro estudio indicó que altos valores de ACE se deben a altos rendimientos de las cruzas y a valores bajos o negativos de la ACG de las líneas que intervienen en las cruzas, o a la combinación de una línea con alta ACG con otra de valores bajos o negativos de ACG (Wong-Romero et al. 2006). En otras investigaciones, se menciona que, con base en los efectos genéticos de las cruzas, se encontraron efectos altos y positivos para rendimiento cuando intervienen líneas tanto con alta ACG, como con valores bajos y negativos

(Cervantes-Ortiz et al. 2018; Guillen-de la Cruz et al. 2009). También se han desarrollado análisis estadísticos para estimar la ACG y ACE en cruza dialélicas; uno de ellos es el método IV de Griffing (1956), que evalúa únicamente las cruza  $F_1$  directas.

Conocer el tipo de acción génica involucrada en la expresión de caracteres de interés es un factor que determina la utilidad futura y el potencial comercial de las líneas, ya sea para desarrollar híbridos (Akaogu et al. 2017; Hallauer et al. 2010; López et al. 2017; Rodríguez-Pérez et al. 2016) o sintéticos (Cervantes-Ortiz et al. 2018). En el programa de fitomejoramiento de maíz de la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc (EESuX), perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), se han desarrollado líneas tolerantes a sequía considerando el rendimiento *per se*, el corto intervalo anté-sis-emergencia de estigmas y el peso de semilla (Rebolloza et al. 2016); sin embargo, no se había realizado el estudio de la aptitud combinatoria, por lo que los principales objetivos de la presente investigación fueron: seleccionar líneas de maíz con buena aptitud combinatoria, a través de prueba de mestizos; determinar si las líneas de alta ACG positiva en rendimiento de grano pueden formar cruza de alta ACE positiva con líneas de ACG negativa, y evaluar el potencial agronómico de las líneas de diferente nivel de endogamia, mediante cuatro características cuantitativas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Germoplasma base

El germoplasma base del estudio está constituido por 15 líneas endogámicas de maíz tolerantes a sequía (Cuadro 1); de éstas, 10 pertenecen al programa de mejoramiento de la EESuX, dependiente de la UAEM, y 5 fueron proporcionadas por el Banco de Germoplasma del CIMMYT; adicionalmente, se utilizó la variedad experimental VUAT de baja ACG, desarrollada y facilitada por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Las 15 líneas se utilizaron para llevar a cabo un estudio sobre la ACG y ACE, así como para determinar el potencial agronómico de las líneas mediante evaluación *per se*, en tanto que la variedad VUAT se utilizó como probador genético del grupo de líneas.

### Formación y evaluación de mestizos

La formación de mestizos se realizó en el ciclo agrícola de otoño-invierno 2016/2017, en el campo experimental de la EESuX, con instalaciones ubicadas en Ayala, Morelos, México (18° 44' 29" N y 98° 54' 38" O, a una altitud de 1220 m), para lo cual, en condiciones de riego, se sembraron las 15 líneas y la variedad experimental VUAT (probador) en un lote con aislamiento genético. La siembra del germoplasma se hizo en tres surcos contiguos de líneas, flanqueados por dos surcos del probador. En la etapa de pre-floración, se eliminaron las espigas de la totalidad de las plantas de todas las líneas; la eliminación fue manual y antes de la liberación de polen. En la cosecha se obtuvieron al menos 17 mazorcas de cada mestizo (línea x probador).

La evaluación de mestizos se llevó a cabo en tres localidades del estado de Morelos (Cuadro 2), en el ciclo de primavera-verano 2017. Se incluyeron los 15 mestizos, el probador VUAT, y las variedades comerciales H-515 y VS-535, liberadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); las tres últimas variedades se utilizaron como testigos. Los experimentos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental se conformó por dos surcos de 5 m de largo a una distancia entre surcos de 0.8 m, y a una distancia entre plantas de 0.20 m. Las variables medidas fueron: floración masculina (FM-días), altura de planta (AP-centímetros), peso de 100 semillas (P100S-gramos) y rendimiento de grano (RG-t ha<sup>-1</sup>); la totalidad de los datos de las variables fue probada para normalidad. El manejo agronómico de los experimentos se empleó de acuerdo con las especificaciones de la guía técnica del INIFAP para Morelos (Trujillo 2009).

El análisis estadístico de datos de las variables registradas se efectuó mediante análisis de varianza combinado y comparación de medias con la prueba de DMS ( $P \leq 0.05$ ). La estimación de la ACG se obtuvo con la siguiente fórmula:  $g_i = \bar{X}_{mi} - \bar{x}$ ; donde:  $g_i$  es el efecto de la ACG;  $\bar{X}$  es la media de cada variable en el  $i$ -ésimo mestizo, y  $\bar{x}$  es la media general de mestizos, de acuerdo con lo descrito por Chávez (1995). Los datos fueron procesados con el programa estadístico SAS (versión 9.1).

Cuadro 1. Genealogía de líneas de maíz

Línea	Genealogía	Nivel de endogamia	Criterio de selección (tolerancia)
*LUM13	(T-43 x LPC15)-15-8	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM40	(Ac7643 x LPC15)-40-16	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM73	(Ac7643 x LPC15)-122-35	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM76	(Ac7643 x LPC15)-17-20	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM80	(Ac7643 x LPC15)-50-40	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM121	(T-43 x LPC15)-70-30	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM124	(Ac7643 x LPC15)-64-27	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM148	(T-43 x LPC15)-100-48	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM194	(T-43 x LPC15)-43-19	S <sub>2</sub>	Sequía
LUM209	(T-43 x LPC15)-125-29	S <sub>2</sub>	Sequía
CML340	LAPOSTASEQ-C3-FS20-4-1-1-2-3-B	S <sub>8</sub>	Sequía
CML341	LAPOSTASEQ-C3-FS1-2-2-2-1-1-B	S <sub>8</sub>	Sequía y bajo N
CML342	LAPOSTASEQ-C3-FS1-2-2-3-2-1-B	S <sub>8</sub>	Sequía y bajo N
CML549	(CML498/CLRCW36)-B-23-2-2-B*3-2-1	S <sub>9</sub>	Sequía y bajo N
CML576	(CLFAWW11/CML494)-B-24-2-2-B-B-1-B-8-B-B	S <sub>11</sub>	Sequía y bajo N

\*LUM: Línea Universidad Autónoma del Estado de Morelos; CML: Línea de Maíz del CIMMyT; N: nitrógeno.

Cuadro 2. Sitios de evaluación de mestizos. Primavera-verano 2017

Localidad	Ubicación	Altitud m	T °C	Pp mm	Suelo
Tepalcingo	18° 37' 46" N y 98° 51' 00" O	1,100	13-34	885	Leptosol
Temoac	18° 46' 37" N y 98° 47' 14" O	1,580	10-31	900	Vertisol
Ayala	18° 44' 29" N y 98° 54' 38" O	1,220	10-32	912	Vertisol

T: Temperatura mínima y máxima anual; Pp: Precipitación anual; Suelo predominante. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2017).

### Formación y evaluación de cruzas dialélicas

En cuanto a las cruzas dialélicas, se formaron en el ciclo agrícola de primavera-verano 2017, en las mismas instalaciones que los mestizos. El procedimiento de formación fue: siembra de nueve líneas seleccionadas de la prueba de mestizos, con elección de cuatro líneas de ACG positiva para rendimiento de grano (LUM73, CML341, CML549, CML576) y cinco líneas de ACG negativa (LUM148, LUM80, LUM209, LUM76 y LUM13), bajo el supuesto de que es posible identificar cruzas de buena ACE cuando interviene una línea de alta ACG con una de baja (Pérez-López et al. 2014; Cervantes-Ortiz et al. 2018). La siembra se hizo en un surco por línea de 5 m de largo, a una distancia entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 0.25 m, en

dos repeticiones. Las cruzas se efectuaron de manera manual, con el objetivo de generar sólo cruzas directas. En la cosecha se obtuvieron al menos cinco mazorcas de cada una de las 36 cruzas.

La evaluación de campo de las cruzas dialélicas se condujo en el ciclo otoño-invierno 2017/2018, en el campo experimental de la EESuX, e incluyó las 36 cruzas dialélicas y los testigos H-515 y VS-535. La unidad experimental se conformó por dos surcos de 5 m de largo, a una distancia entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 0.25 m. Las variables de respuesta registradas fueron las mismas que en la evaluación de mestizos.

Los análisis estadísticos de las variables medidas se hicieron mediante análisis de varianza y comparación de medias, a través de la prueba de DMS ( $P \leq 0.05$ ). Se estimaron los efectos de la ACG y la ACE, utilizando

el método IV de Griffing (1956), bajo el modelo 1 de efectos fijos; las fórmulas fueron las siguientes:

$$g_i = \frac{1}{P(P-2)} [P X_{i.} - X_{..}] \text{ y } S_{ij} = X_{ij} - \frac{1}{P-2} (X_{i.} + X_{.j}) + \frac{1}{(P-1)(P-2)} X_{..}$$

Donde:  $g_i$  es el efecto de la ACG en la  $i$ -ésima línea;  $P$  es el número de líneas;  $X_{i.}$  es el total de la  $i$ -ésima línea a través de cruza dialélicas;  $X_{..}$  es el gran total en el cuadro dialélico;  $S_{ij}$  es el efecto de la ACE de la cruza  $i \times j$ ;  $X_{ij}$  es el valor de la cruza  $i \times j$ , y  $X_{.j}$  es el total de la  $j$ -ésima línea a través de cruza dialélicas. Los datos fueron procesados con el software SAS (versión 9.1).

### Evaluación de líneas *per se*

La evaluación de campo con las líneas se estableció en el ciclo primavera-verano 2018; se incluyeron las 15 líneas endogámicas de maíz y los testigos H-515 y VS-535. El experimento se efectuó en el mismo campo experimental de la EESuX. El diseño experimental usado fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental se conformó por un surco de 5 m de largo a una distancia entre surcos de 0.8 m, y entre plantas de 0.25 m. Las variables estudiadas fueron las mismas que en la evaluación de mestizos y de cruza dialélicas. El análisis estadístico de los datos consistió en análisis de varianza y comparación de medias por medio de la prueba de DMS ( $P \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación de mestizos

El análisis de varianza combinado a través de localidades (Cuadro 3) detectó diferencias estadísticas altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ) para todas las variables en las fuentes de variación de localidades y genotipos. Al descomponer la fuente de variación de genotipos, en mestizos, testigos y la comparación mestizos vs. testigos, se encontraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) en todas las variables de respuesta en mestizos y testigos. En tanto que, en la comparación entre mestizos y testigos, sólo se identificaron diferencias estadísticas en las variables de peso de 100 semillas (P100S) y en rendimiento de grano (RG). Por otro lado, se reveló un comportamiento similar entre los mestizos provenientes de líneas de baja endogamia y entre los mestizos generados con líneas de alta endogamia, diferencias estadísticas encontradas únicamente en las variables de altura de planta (AP) y P100S; sin embargo, en la fuente de variación que compara mestizos formados con líneas de baja endogamia contra aquellos generados con líneas de alta, se identificaron diferencias estadísticas altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ) en todas las variables. En lo que se refiere a la

**Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza combinado a través de localidades en la evaluación de mestizos. Ciclo primavera-verano 2017**

FV	GL	FM d	AP cm	P100S g	RG t ha <sup>-1</sup>
Localidades (L)	2	861.90**	51,298.25**	112.79**	337.61**
Rep/L	9	2.12ns	1,388.45**	3.48ns	1.04*
Genotipos (G)	17	6.09**	1,926.66**	25.35**	2.04**
Mestizos	14	5.12**	1,576.69**	15.19**	1.18**
Baja endogamia	9	1.56ns	1,053.74**	10.38*	0.79ns
Alta endogamia	4	2.85ns	1,320.05**	14.47**	0.34ns
Baja vs. alta	1	46.22**	7,309.81**	61.38**	7.97**
Testigos	2	15.86**	4,803.78**	89.42**	6.46**
Mestizos vs. testigos	1	0.26ns	1,072.01ns	39.40*	5.24**
Interacción G x L	34	3.38**	210.74*	7.21*	0.83*
Error	153	1.34	129.92	4.60	0.48
CV (%)		1.74	4.40	7.65	14.41

FV: Fuente de variación; GL: Grados de libertad; FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas; RG: Rendimiento de grano; CV: Coeficiente de variación; ns: No significativo; \*: Significativo para  $P \leq 0.05$ ; \*\*: Significativo para  $P \leq 0.01$ .

interacción genotipo x ambiente (G x L), todas las variables mostraron diferencias estadísticas al 0.01 o al 0.05 de probabilidad.

Las diferencias detectadas entre localidades se explican fundamentalmente por la altitud entre sitios (1,100-1,550 m), la cual influye en la temperatura ambiental, modificando la duración del ciclo biológico de las plantas, así como el tipo de suelo distinto entre localidades, lo que, a su vez, incide en el comportamiento del germoplasma, debido a diferencias en fertilidad y retención de humedad; en cuanto al comportamiento de los mestizos, se atribuye particularmente a la variabilidad entre grupos de líneas que difieren no sólo en el nivel de endogamia, sino también en el origen genético y geográfico de las líneas. La variación en la comparación de endogamia (baja vs. alta) se debe a que los mestizos de baja endogamia fueron un día más precoces, 13.5 cm más bajos y con menor peso de 100 semillas; en RG, los mestizos de alta endogamia superaron con 0.44 t ha<sup>-1</sup> a los de baja endogamia. En cuanto a los testigos, el probador VUAT reflejó el menor rendimiento con 3.7 t ha<sup>-1</sup>, lo que confirma que es buen probador para evaluar la aptitud combinatoria de las líneas; esto coincide con la teoría que señala que

un buen probador debe poseer frecuencias alélicas bajas para el carácter de interés (Hallauer et al. 2010; Lobato-Ortiz et al. 2010). En la interacción genotipo x ambiente se encontró que el tipo de interacción en FM fue de cambio de rango, mientras que en el resto de variables fue de diferencia en magnitud, de acuerdo con los tipos de interacción descritos por Ferh (1991).

La estimación de la ACG de los mestizos (Cuadro 4) identificó a los mestizos formados con las líneas CML340, LUM73, CML341, CML342, CML549 y CML576 como los de mayor ACG para rendimiento de grano, con valores entre 0.579 y 0.114 t.ha<sup>-1</sup>; sólo la línea LUM73 es de baja endogamia. En cuanto al rendimiento de grano de dichos mestizos, éstos mostraron los mayores valores con una fluctuación entre 5.027 y 5.452 t ha<sup>-1</sup>; el promedio de RG de los mestizos con ACG positiva resultó igual al RG del testigo H-515, y superó 14.1% el rendimiento del testigo VS-535, y 28.3% el rendimiento del probador. Los valores de ACG en FM indicaron que los mestizos integrados con las líneas LUM121, LUM76, LUM124 y LUM13 resultaron con efectos negativos y con valores que fluctuaron entre -1.0 y -0.5 d, líneas de baja endogamia. Respecto al efecto de la ACG en AP, el mestizo formado con la

**Cuadro 4. Estimación de Aptitud Combinatoria General en cuatro variables, promedio de tres ambientes. Primavera-verano 2017**

Mestizo	ACG RG	RG t ha <sup>-1</sup>	ACG FM	FM d	ACG AP	AP cm	ACG P100S	P100S g
CML340 x VUAT	0.539	5.452	1.1	67.5	12.8	272.7	1.7	29.5
LUM73 x VUAT	0.472	5.385	-0.2	66.2	7.4	267.3	0.0	27.8
CML341 x VUAT	0.35	5.263	0.0	66.4	-2.8	257.1	2.3	30.1
CML342 x VUAT	0.324	5.237	0.8	67.2	10.5	270.4	0.6	28.4
CML549 x VUAT	0.162	5.074	1.3	67.7	23.6	283.5	-0.4	27.4
CML576 x VUAT	0.114	5.027	0.6	67.0	0.7	260.6	0.2	28.0
LUM194 x VUAT	-0.044	4.868	0.1	66.5	-4.7	255.2	1.1	28.9
LUM148 x VUAT	-0.067	4.846	0.1	66.5	-1.5	258.4	0.7	28.5
LUM121 x VUAT	-0.131	4.782	-1.0	65.4	-6.2	253.7	-0.7	27.1
LUM80 x VUAT	-0.157	4.756	-0.3	66.1	8.8	268.7	-0.1	27.7
LUM209 x VUAT	-0.208	4.705	-0.3	66.1	-10.6	249.3	-0.2	27.6
LUM76 x VUAT	-0.221	4.692	-0.6	65.8	-5.8	254.1	-0.7	27.1
LUM40 x VUAT	-0.247	4.666	0.1	66.5	1.3	261.2	-1.0	26.8
LUM13 x VUAT	-0.407	4.506	-0.5	65.9	-23.2	236.7	-2.2	25.6
LUM124 x VUAT	-0.479	4.434	-0.6	65.8	-10.9	249.0	-0.6	27.2

ACG: Aptitud combinatoria general; RG: Rendimiento de grano; FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas.

línea LUM13 presentó el valor más bajo de -23.2 cm. Por otro lado, la ACG en P100S reportó que mestizos conformados por CML341 y CML340 fueron los que presentaron valores altos de 2.3 y 1.7 g.

la Cruz et al. 2009; Guzmán et al. 2017), lo que se ha asociado al tipo y origen de germoplasma de maíz utilizado, a las variables medidas y los alelos que las determinan y a los diferentes ambientes de evaluación.

**Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza en la evaluación de cruzas dialélicas, ciclo otoño-invierno 2017-2018**

FV	GL	FM d	AP cm	P100S g	RG t ha <sup>-1</sup>
Bloques	3	28.24**	570.02**	1.16ns	4.14**
Cruzas	35	6.10**	698.27**	12.10**	3.95**
ACG	8	21.83**	2,028.38**	19.16**	9.13**
ACE	27	1.44	304.16**	10.01**	2.41**
Error	105	2.87	118.55	4.07	0.78
CV (%)		2.20	4.68	6.67	14.87

FV: Fuente de variación; GL: Grados de libertad; FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas; RG: Rendimiento de grano; ns: No significativo; \*: Significativo para  $P \leq 0.05$ ; \*\*: Significativo para  $P \leq 0.01$ .

Los mestizos con mayor ACG en el RG fueron los provenientes de las líneas CML340, LUM73, CML341, CML342, CML549 y CML576, con predominio de los mestizos de alta endogamia; estos resultados coinciden con lo encontrado en pruebas tardías, donde obtuvieron valores de 0.483 a 0.768 t.ha<sup>-1</sup> (Castañón et al. 1998). Al seleccionar líneas con alta ACG en rendimiento, éstas pueden usarse para generar cruzas con mayor potencial del que se usa comercialmente (Kamara et al. 2014), pero también existen reportes de que, al cruzar líneas de alta ACG con baja ACG o negativa, se ha encontrado buena ACE (Cervantes-Ortiz et al. 2018; Wong-Romero et al. 2006).

### Evaluación de cruzas dialélicas

Los análisis de varianza para las cruzas dialélicas (Cuadro 5) detectaron diferencias estadísticas altamente significativas entre cruzas para todas las variables medidas, así como en la fuente de variación que prueban los efectos de ACG en todas las variables de respuesta; en cambio, para los efectos de ACE se encontraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) sólo en las variables de AP, P100S y RG. Los resultados encontrados en la ACG y la ACE indicaron que las líneas estudiadas difieren tanto en sus efectos genéticos aditivos, como entre los no aditivos en AP, P100S y RG. Resultados similares se han reportado en diferentes estudios (Rodríguez-Pérez et al. 2016; Guillen-de

Las estimaciones de los efectos de ACG de las líneas (Cuadro 6) revelaron que CML549 tuvo un efecto positivo de 1.81\*\* días, en tanto que la línea que mostró el mayor valor negativo fue la LUM13 (-1.02\*\* d). En cuanto a la variable de altura de planta, la línea CML576 tuvo una ACG de 9.53\*\* cm, y la LUM13 resultó con una ACG de -15.36\*\* cm. En el comportamiento del P100S, la línea LUM148 presentó el mayor efecto positivo (1.09\*\* g) y LUM73 el mayor efecto negativo (-1.03\*\* g). En lo que respecta al RG, CML576 y CML341 mostraron la más alta y significativa ACG (1.14 y 0.45 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente); este último resultado señala que ambas líneas tienen una contribución positiva e importante en la expresión del rendimiento del grano, lo cual las hace potencialmente adecuadas para incluirse en un programa de mejoramiento de maíz para generar variedades sintéticas (Guillen- de la Cruz et al. 2009).

Respecto a las estimaciones de los efectos de la ACE de las cruzas dialélicas (Cuadro 7), se encontró que las cruzas CML341 x LUM73, CML576 x LUM209 y CML549 x LUM76 manifestaron los mayores efectos positivos y estadísticamente significativos en la ACE, con valores de 1.03, 0.82 y 0.79 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En la evaluación de mestizos, como en las cruzas dialélicas, las líneas CML341, CML576 y CML549 expresaron valores positivos en el efecto de la ACG, mientras que las líneas LUM73, LUM209 y LUM76 registraron valores negativos en la ACG, lo que

demuestra que líneas endogámicas de alta endogamia y ACG positiva pueden generar híbridos aceptables en rendimiento de grano cuando se cruzan con líneas de baja endogamia y efectos negativos de ACG, de acuerdo con lo reportado en diferentes estudios (Guillen-de la Cruz et al. 2009; Cervantes-Ortiz et al. 2018), así como en el hecho mencionado de que al menos una de las líneas progenitoras se precisa que sea de alta ACG, para desarrollar híbridos sobresalientes (Pérez-López et al. 2014), debido a la aportación de genes con efectos aditivos.

### Evaluación *per se*

Los resultados de la evaluación *per se* de líneas (Cuadro 8) revelaron que CML340 tuvo el mayor RG (5.04 t ha<sup>-1</sup>) y la mayor AP (263 cm); esta línea, particularmente,

provocó que las líneas de alta endogamia (CML) fueran superiores a las de baja endogamia (LUM). Otras sobresalientes de alta endogamia fueron CML342 y CML341, con RG de 2.64 y 2.18 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente; sin embargo, las LUM124 (2.43 t ha<sup>-1</sup>) y LUM194 (2.42 t ha<sup>-1</sup>) produjeron rendimientos similares a las últimas; esto indica que las líneas del Programa de Mejoramiento de Maíz de la UAEM son competitivas en rendimiento de grano y es germoplasma con potencial para la formación de variedades sintéticas o híbridas, al coincidir en que líneas con bajos niveles de endogamia son vigorosas, rendidoras y pueden usarse como progenitores hembra en cruza para aumentar la producción de semilla (Astate y Branco 2002). El método *per se* es considerado eficiente para conocer los aspectos agronómicos de las líneas (Rajaram et al. 1996; Ramírez et al. 1998).

**Cuadro 6. Valores estimados de la ACG de líneas de maíz. Diseño IV de Griffing. Ciclo otoño-invierno 2017-2018**

Progenitores	FM d	AP cm	P100S g	RG t ha <sup>-1</sup>
CML576	0.06	9.53**	-0.36	1.14**
CML341	0.56	5.06*	0.99**	0.45**
CML549	1.81**	8.65**	-1.35**	0.22
LUM13	-1.02**	-15.36**	0.54	0.07
LUM209	-0.69*	-1.58	-0.09	-0.08
LUM76	-0.94**	1.86	0.07	-0.20
LUM148	0.38	-11.36**	1.09**	-0.22
LUM80	0.16	4.09*	0.14	-0.57**
LUM73	-0.30	-0.89	-1.03**	-0.80**

FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas; RG: Rendimiento de grano; \*, Significativo para P≤0.05; \*\*, Significativo para P≤0.01.

**Cuadro 7. Efectos de la ACE de 33 cruza de maíz. Ciclo otoño-invierno 2017-2018**

Progenitores	FM d	AP cm	P100S g	RG t ha <sup>-1</sup>
CML341 x LUM73	0.36	8.62	-1.394	1.03**
CML576 x LUM209	0.00	5.69	0.960	0.82*
CML549 x LUM76	0.50	2.95	1.448	0.79*
LUM209 x LUM13	-1.43	-1.52	0.698	0.77
CML341 x LUM76	0.25	16.56**	-0.004	0.74
CML576 x LUM80	-0.36	-0.18	0.368	0.71
CML549 x LUM209	0.75	7.65	-1.033	0.62
CML549 x LUM13	-0.18	7.00	0.392	0.62

<b>Progenitores</b>	<b>FM d</b>	<b>AP cm</b>	<b>P100S g</b>	<b>RG t ha<sup>-1</sup></b>
LUM148 x LUM73	-0.21	3.59	-0.926	0.60
LUM80 x LUM76	-0.86	-8.32	0.990	0.46
LUM148 x LUM80	-0.18	6.41	0.709	0.42
LUM80 x LUM13	1.46*	-14.35**	-0.321	0.38
CML341 x LUM13	-0.18	11.34	-0.235	0.37
LUM148 x CML341	0.18	-13.56**	-0.160	0.36
CML549 x LUM80	0.14	0.48	-1.990*	0.33
LUM148 x CML576	0.43	0.52	-0.578	0.31
CML576 x LUM76	0.75	6.69	1.475	0.27
LUM148 x LUM209	0.18	2.96	1.181	0.23
LUM73 x LUM13	-0.07	-0.42	-0.174	0.13
CML576 x LUM73	0.11	-0.98	1.322	0.09
CML341 x LUM209	0.25	-7.08	3.976**	-0.06
LUM73 x LUM80	-0.50	0.56	1.720	-0.15
LUM148 x CML549	-0.32	7.40	0.722	-0.17
LUM76 x LUM209	-0.25	-12.39	-1.227	-0.28
CML341 x LUM80	0.14	9.51*	1.036	-0.29
LUM73 x LUM209	0.36	-1.19	-2.037*	-0.34
CML576 x LUM13	0.07	4.81	0.408	-0.45
CML576 x CML549	-0.75	-5.19	-0.977	-0.53
LUM148 x LUM76	-0.07	-1.02	-0.339	-0.59
LUM73 x LUM76	-0.64	-3.91	-0.190	-0.62
CML549 x LUM73	0.61	-6.27	1.680	-0.74
LUM76 x LUM13	0.32	-0.57	-1.159	-0.76*
CML341 x CML549	-0.75	-14.02**	-0.239	-0.91*
LUM148 x LUM13	0.00	-6.30	0.391	-1.16**
CML341 x CML576	-0.25	-11.37*	-2.978**	-1.23**
LUM80 x LUM209	0.14	5.88	-2.516**	-1.86**
CML576 x LUM76	0.75	6.69	1.475	0.27
LUM148 x LUM209	0.18	2.96	1.181	0.23
LUM73 x LUM13	-0.07	-0.42	-0.174	0.13
CML576 x LUM73	0.11	-0.98	1.322	0.09
CML341 x LUM209	0.25	-7.08	3.976**	-0.06

FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas; RG: Rendimiento de grano; \*, Significativo para  $P \leq 0.05$ ; \*\*, Significativo para  $P \leq 0.01$ .

**Cuadro 8. Características agronómicas y rendimiento de grano en líneas de maíz tolerantes a sequía. Primavera-verano 2018**

Línea	FM d	AP cm	P100S g	RG t ha <sup>-1</sup>
LUM13	64	168	27.7	1.38
LUM40	69	226	25.3	1.83
LUM73	69	215	26.4	1.67
LUM76	70	206	24.9	1.04
LUM80	68	225	30.2	1.76
LUM121	67	222	28.6	1.82
LUM124	68	229	26.7	2.43
LUM148	66	166	27.2	1.13
LUM194	68	235	33.3	2.42
LUM209	66	227	27.2	1.39
CML340	64	263	34.5	5.04
CML341	65	236	29.9	2.18
CML342	68	251	27.8	2.64
CML549	87	232	21.4	1.15
CML576	70	207	23.6	1.48
H-515	64	242	30.1	4.00
VS-535	65	269	33.4	3.83
DMS (0.05)	2	16	5.2	0.70

FM: Floración masculina; AP: Altura de planta; P100S: Peso de cien semillas; RG: Rendimiento de grano.

## CONCLUSIONES

La evaluación de líneas a través de mestizos permitió determinar la ACG de líneas de maíz y seleccionar las líneas LUM73, CML341, CML549 y CML576 con ACG positiva. Las líneas CML341, CML549 y CML576, de alta ACG positiva en rendimiento de grano, formaron cruza de alta ACE positiva cuando se cruzaron con las líneas LUM73, LUM209 y LUM76 de ACG negativa. Por su parte, las líneas CML341, CML576 y CML549 resultaron con valores positivos en el efecto de la ACG, tanto en la evaluación de mestizos como en cruza dialélicas. Agronómicamente, las líneas CML340 (5.04 t ha<sup>-1</sup>), CML342 (2.64 t ha<sup>-1</sup>), CML341 (2.18 t ha<sup>-1</sup>), LUM124 (2.43 t ha<sup>-1</sup>) y LUM194 (2.42 t ha<sup>-1</sup>) mostraron ser competitivas en rendimiento de grano.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo y al Programa de Mejoramiento de Maíz de la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, por facilitar el uso de las líneas de maíz evaluadas en esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- Akaogu CI, Badu-Apraku B, Adetimirin VO. 2017. Combining ability and performance of extra-early maturing yellow maize inbreds in hybrid combinations under drought and rain-fed conditions. *The Journal of Agricultural Science* 155: 1520-1540. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000636>
- Astate FA, de Miranda JB. 2002. Inbreeding depression in maize populations of reduced size. *Scientia Agricola* 59: 335-340. <http://doi.org/10.1590/S0103-90162002000200020>
- Bernardo R. 1992. Retention of genetically superior lines during early generations testcrossing of maize. *Crop Science* 32: 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200040019x>
- Buenrostro-Robles M, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JJ, Sánchez-Abarca C. 2017. Rendimiento de líneas de maíz exótico irradiado con rayos gamma y de híbridos de cruz simple. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40: 351-358.
- Castañón G, Jeffers D, Hidalgo H, Tosquy H. 1998. Prueba de mestizos en maíz en el estado de Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana* 9: 89-96.
- Cervantes-Ortiz F, Hernández-Esparza J, Gracia-Rodríguez JG, Rangel-Lucio JA, Andrio-Enríquez E, Mendoza-Elos M, Rodríguez-Pérez G, Rodríguez-Mercado D. 2018. Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 34: 33-42.
- Chávez AJL. 1995. Mejoramiento de plantas 2. Métodos específicos de plantas alógamas. Editorial Trillas. Distrito Federal, México.
- Escorcía-Gutiérrez N, Molina-Galán JD, Castillo-González F, Mejía-Contreras JA. 2010. Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruza simple de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 271-279.
- Falconer DS, Mackay TFC. 2006. Introducción a la genética Cuantitativa. Editorial Acribia, S. A. Zaragoza, España.
- Ferh W. 1991. Principles of Cultivar Development: Theory and Technique. Iowa State University Press. Ames, USA.
- Griffing B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences* 9: 463-493.
- Guillen-de la Cruz P, de la Cruz-Lázaro E, Castañón-Nájera G, Osorio-Osorio R, Brito-Manzano NP, Lozano-del Río A, López-Noverola U. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 101-107.
- Guzmán M, Díaz D, Ramis C, Figueroa-Ruiz R, Jiménez R. 2017. Estimación de la aptitud combinatoria y heterosis en híbridos no convencionales de maíz con alto contenido de proteína. *Biagro* 29: 175-184.
- Hallauer RA, Carena JM, Miranda Filho JB. 2010. Quantitative Genetics in Maize Breeding. Handbook of Plant Breeding. Springer. New York, USA.
- [INEGI]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Morelos 2017. <https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/default.html?t=0730003000000000&ag=17>. (Consultado el 30 de Agosto 2018).
- Kamara MM, El-Degwy IS, Koyama H. 2014. Estimating ability of some maize inbred lines using line x tester mating design under two nitrogen levels. *Australian Journal of Crop Science* 8: 1336-1342.
- Ledesma-Miramontes A, Ramírez-Díaz JL, Vidal-Martínez VA, Peña-Ramos A, Ruiz-Corral JA, Salinas-Moreno Y, Preciado-Ortiz RE. 2015. Propuesta para integrar un patrón heterótico de maíz de grano amarillo para la zona de transición de México. II. Evaluación de mestizos y cruza. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38: 133-143.
- Lobato-Ortiz R, Molina-Galán JD, López-Reynoso JJ, Mejía-Contreras JA, Reyes-López D. 2010. Criterios para elegir el mejor probador de la aptitud combinatoria general para rendimiento de grano de líneas autofecundadas de maíz. *Agrociencia* 44: 17-30.
- López C, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, García-Zavala JJ, Benítez I, Vázquez MG, Carrillo JA. 2017. Productividad de cruza simple de maíz con calidad de proteína en valles altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 559-570.
- Pérez-López FJ, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JdeJ, Molina-Galán JD, López-Reynoso JdeJ, Cervantes-Santana T. 2014. Líneas homocigóticas de maíz de alto rendimiento como progenitoras de híbridos de cruz simple. *Agrociencia* 48: 425-437.
- Poehlman M, Sleper DA. 2003. Mejoramiento genético de las cosechas: Mejoramiento genético del Maíz. Limusa. México.
- Rajaram S, Hans-Joachim B, Ginkel MV. 1996. CIMMYT Approach to breed for drought tolerance. *Euphytica* 92: 147-153.
- Ramírez-Díaz JL, Vidal-Martínez VA, Alemán-de-la-Torre I, Ledesma-Miramontes A, Gómez-Montiel NO, Salinas-

- Moreno Y, Bautista-Ramírez E, Tapia-Vargas LM, Ruiz-Corral A. 2019. Selección de líneas y cruzas de maíz combinando las pruebas de mestizos y cruzas dialélicas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42: 335-346.
- Ramírez JL, Ron J, Sánchez J, Carcía A, Maya J. 1998. Aptitud combinatoria general y correlaciones fenotípicas entre líneas y mestizos de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 9: 69-76.
- Ramírez JL, Chuela M, Vidal VA, Ron J, Caballero F. 2007. Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 453-461.
- Rebolloza HH, Castillo GA, Carapia RVE, Rodríguez AM, Villegas TOG, Núñez VME, Suárez RR, Perdomo RF. 2016. Estimación de parámetros genéticos y selección de líneas  $S_1$  en una población segregante de maíz tropical. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 1893-1904.
- Rodríguez-Pérez G, Zavala-García F, Treviño-Ramírez JE, Ojeda-Zacarías C, Mendoza-Elos M, Rodríguez-Herrera SA, Cervantes-Ortiz F. 2016. Aptitud combinatoria y heterosis entre líneas de dos tipos de maíz para grano. *Interciencia* 41: 47-54.
- [SAGARPA] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2017. Boletín mensual. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/214365/Bolet\\_nes\\_Balanzas\\_productos\\_agropecuarios.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/214365/Bolet_nes_Balanzas_productos_agropecuarios.pdf). (Consultado el 16 de enero 2019).
- Sánchez-Ramírez FJ, Mendoza-Castillo MC, Mendoza-Rodríguez M, Castillo-González F, Cruz-Izquierdo S, Castro-Nava S, Molina-Galán JD. 2017. Aptitud combinatoria de líneas endogámicas para la producción de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruzas simples en condiciones de riego. *Agrociencia* 51: 393-407.
- Sánchez-Ramírez FJ, Mendoza-Castillo MC, Mendoza-Mendoza CG. 2020. Evaluación de mestizos y uso de técnicas multivariadas para identificar líneas sobresalientes de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11: 433-439. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1778>
- [SIAP] Servicio de Información Alimentaria y Pesquera. 2017. Anuario estadístico de la producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (Consultado el 22 de octubre 2018).
- Sprague GE. 1946. Early testing of inbred lines of corn. *Journal American Society of Agronomy* 38: 108-117. <https://doi.org/10.2134/agronj1946.00021962003800020002x>
- Trujillo CA. 2009. Guía para cultivar maíz bajo condiciones de riego en el Estado de Morelos. SAGARPA, INIFAP, CIRPAS. Campo Experimental Zacatepec. Folleto para productores No. 46. Zacatepec, Morelos, México. 17 pp.
- Velázquez-Cardelas GA, González-Huerta A, Pérez-López DJ, Castillo-González F. 2018. Comportamiento de mestizos en tres localidades del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 1217-1230. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1586>
- Wong-Romero R, Gutiérrez-del Rio E, Rodríguez-Herrera SA, Palomo-Gil A, Córdova-Orellana H, Espinoza-Banda A. 2006. Aptitud combinatoria y parámetros genéticos de maíz para forraje en la comarca Lagunera, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 22: 141-15.