



SELECCIÓN DE LÍNEAS Y CRUZAS DE MAÍZ COMBINANDO LAS PRUEBAS DE MESTIZOS Y CRUZAS DIALÉLICAS

SELECTION OF MAIZE LINES AND CROSSES BY COMBINING TOP CROSS AND DIALLELIC CROSS TESTS

José L. Ramírez-Díaz^{1*}, Víctor A. Vidal-Martínez, Ivone Alemán-de-la-Torre¹, Alejandro Ledesma-Miramontes¹, Noel O. Gómez-Montiel³, Yolanda Salinas-Moreno¹, Edgardo Bautista-Ramírez¹, Luis M. Tapia-Vargas⁴ y Ariel Ruiz-Corral¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. ²INIFAP, Santiago Ixquintla, Nayarit, México. ³INIFAP, Iguala, Guerrero, México. ⁴INIFAP, Uruapan, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia (ramirez.joseluis@inifap.gob.mx)

RESUMEN

Obtener híbridos comerciales competitivos de maíz (*Zea mays L.*) requiere de estrategias de selección eficientes para mejorar poblaciones y formar progenitores élite. El objetivo de esta investigación fue seleccionar líneas y cruzas de alta aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) para rendimiento de grano (RG) y características agronómicas, al combinar las pruebas de mestizos (línea × probador) y cruzas dialélicas. En el ciclo agrícola otoño-invierno 2010-2011 se formaron 144 mestizos con líneas S_3 de la población subtropical ST $C_2 F_2$, y como probador la población subtropical PABGT-CE $C_9 F_2$. Los mestizos se evaluaron en secano en el ciclo agrícola primavera-verano (PV) 2012 en Tlajomulco y Tepatitlán, Jalisco, Peña del Panal, Michoacán, y Santa María del Oro, Nayarit, que cubren un intervalo de 1100 a 1900 m de altitud. En esta prueba se seleccionaron, a través de localidades, nueve mestizos por ACG para RG y tolerancia al acame. Con la semilla remanente de las líneas de mestizos seleccionados, en PV 2015 se formaron cruzas dialélicas. Las cruzas se evaluaron en PV 2016 en las localidades anteriores e Iguala, Guerrero. Las líneas ST $C_2 F_2-21-2-1$ y ST $C_2 F_2-29-2-1$ sobresalieron en ambas pruebas por su alta ACG para RG, pero la última se eliminó porque en cruzas dialélicas la ACG y ACE para acame fueron positivas y significativas ($P \leq 0.05$). La ACE de la cruz ST $C_2 F_2-33-1-1 \times ST C_2 F_2-49-2-1$ para RG fue significativa ($P \leq 0.05$), y en acame negativa, pero no significativa. El asociar las pruebas de mestizos y cruzas dialélicas permitió seleccionar de una forma más rigurosa líneas con alta ACG y ACE para RG y características agronómicas, además de eliminar líneas antes de formar el sintético y obtener cruzas simples que podrían usarse para formar híbridos con progenitores élite del otro componente heterótico.

Palabras clave: *Zea mays*, estrategia de selección, aptitud combinatoria, hibridación, rendimiento.

SUMMARY

Obtaining competitive commercial maize (*Zea mays L.*) hybrids requires efficient selection strategies to improve populations and develop elite parents. The objective of this research was to select lines and crosses with high general (GCA) and specific (SCA) combining ability for grain yield (GR) and agronomic characteristics, by combining top crosses (line × tester) and diallel crosses. In the Autumn-Winter 2010-2011 agricultural season, 144 top crosses were formed with S_3 inbred lines from the ST $C_2 F_2$ subtropical population, and as a tester, the subtropical population PABGT-CE $C_9 F_2$. Top crosses were evaluated under rainfed conditions in the 2012 Spring-Summer (SS) agricultural season

at Tlajomulco and Tepatitlán, Jalisco, Peña del Panal, Michoacán, and Santa María del Oro, Nayarit, covering a range from 1100 to 1900 m of altitude. In this test, nine top crosses were selected by GCA across locations for GY and lodging tolerance. With the remaining seed of lines of the selected top crosses diallel crosses were formed in SS 2015. Crosses were evaluated in SS 2016 in the previous locations and Iguala, Guerrero. Lines ST $C_2 F_2-21-2-1$ and ST $C_2 F_2-29-2-1$ stood out in both tests by virtue of their high GCA for GY, but the last one was eliminated because in diallel crosses its GCA and SCA for lodging were positive and significant ($P \leq 0.05$). The SCA of the cross ST $C_2 F_2-33-1-1 \times ST C_2 F_2-49-2-1$ for GY was significant ($P \leq 0.05$), yet in lodging it was negative but not significant. Associating top cross and diallel cross tests allowed to select in a more rigorous way lines with high GCA and SCA for GY and agronomic characteristics; in addition, it allowed to eliminate lines before forming the synthetic and obtaining single crosses that could be used to develop hybrids with elite progenitors of the other heterotic component.

Index words: *Zea mays*, selection strategy, combining ability, hybridization, yield.

INTRODUCCIÓN

Para formar híbridos comerciales competitivos de maíz (*Zea mays L.*) se requiere seleccionar poblaciones con media y varianza genética altas en las características agronómicas de interés (Rebolloza et al., 2016) para producir líneas endogámicas que al combinarse generen híbridos con la máxima expresión heterótica en la característica deseada.

Comstock et al. (1949) generaron el método de mejoramiento interpoplacional de selección recurrente recíproca (SRR) que consiste en seleccionar dos poblaciones divergentes genéticamente, A y B, donde las familias seleccionadas de la población A se cruzan con la población B como probador y viceversa, se evalúan las cruzas y las familias con mayor aptitud combinatoria general (ACG) se recombinan y se inicia un nuevo ciclo de selección; de esta forma, se capitalizan los efectos aditivos en las poblaciones y los no aditivos en la crusa.

Por su estructura, la SRR es el método genotécnico más utilizado para formar híbridos de maíz, al cual se le han hecho modificaciones para mejorar la eficiencia en la selección de líneas y cruzas (Paterniani y Vencovsky, 1978; Ramírez-Díaz et al., 2015; Souza Jr., 1987). Los resultados demuestran que la SRR ha sido efectiva para modificar la ACG de las poblaciones y la aptitud combinatoria específica (ACE) de sus cruzas en rendimiento de grano y otras características agronómicas (Keeratinijakal y Lamkey, 1993; Moll y Hanson, 1984; Romay et al., 2011; Santos et al., 2007). No obstante, existen resultados donde una de las poblaciones del par heterótico no presenta ganancia genética en rendimiento de grano u otras características agronómicas a través de los ciclos de selección (Moll y Hanson, 1984; Romay et al., 2011); es posible que la falta de ganancia genética se deba a que se recombinaron progenitores con valores aditivos bajos en características muy correlacionadas con rendimiento de grano o que no haya buena ACE para rendimiento de grano entre los progenitores seleccionados, pero esto no puede probarse porque se desconoce la ACE. Otra causa es la endogamia que se genera cuando se utilizan pocas líneas para formar las poblaciones (Astete y de Miranda, 2002; Márquez-Sánchez, 2013).

Una opción al problema anterior sería seleccionar de una a tres líneas más en la prueba de mestizos, hacer cruzas dialélicas (Griffing, 1956) y confirmar el valor aditivo y no aditivo de las líneas seleccionadas, para recombinar sólo progenies con alta ACG y ACE y eliminar aquellas que contribuirán negativamente en la población. Otras ventajas de combinar ambas pruebas serían obtener cruzas simples con alta ACE para usarse como probadores de híbridos trilineales y dobles al combinarse con líneas y cruzas simples derivadas de la población recíproca usada como probador. Con el propósito de comprobar la estrategia propuesta, esta investigación tuvo como objetivo seleccionar, en una población de maíz subtropical, líneas y cruzas con alta ACG y ACE para rendimiento de grano y características agronómicas, al combinar la prueba de mestizos y de cruzas dialélicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

En el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se trabaja con el par heterótico Sintético Tardío (ST) y la Población de Amplia Base Genética Tardía (PABGT-CE). La población ST se formó con seis líneas élite S_3 , cuatro tropicales y dos subtropicales, de la cual se seleccionaron los progenitores B-39 y B-41 que participan en los híbridos comerciales H-318, H-377

(Ramírez et al., 2010), H-516 (Gómez et al., 2001) y H-155, entre otros. La PABGT-CE se integró con 20 familias de medios hermanos maternos de germoplasma subtropical adaptado, seleccionadas por su resistencia al carbón de la espiga [*Sphacelotheca reiliana* (Khun) Clint] en Zapopan, Jalisco en condiciones de humedad residual (Ramírez y Ron, 1988).

Método de selección

Se utilizó el método de SRR, con la modificación de recombinar los progenitores seleccionados en mestizos después de haberse evaluado en cruzas dialélicas; esta modificación requiere de un ciclo agrícola más para completar un ciclo de SRR, independientemente del tipo de familia que se utilice como unidad de selección, pero tendría las ventajas siguientes: a) podría resolver el problema de la pérdida de ganancia genética en rendimiento de grano en algunas de las poblaciones del par heterótico (Moll y Hanson, 1984; Romay et al., 2011), porque se recombinarían familias con ACG y ACE altas, y b) en las cruzas dialélicas se identificarían líneas y cruzas simples que pueden usarse como probadores de cruzas trilineales y dobles, lo cual es importante para el INIFAP porque los usuarios directos de sus híbridos son empresas nacionales productoras de semilla que demandan semilla registrada de este tipo de híbridos para aumentar la rentabilidad en la producción de semillas.

En este método de mejoramiento se usaron líneas S_3 como unidad de selección, pues la correlación genética entre una línea S_3 y su crusa de prueba es 0.93 (Bernardo, 1991), valor alto que da confianza para seleccionar líneas y cruzas para formar híbridos comerciales de maíz. En la Figura 1 se presenta el esquema de mejoramiento; nótese que sólo se describen los pasos para una población del par heterótico, pero lo mejor es que el esquema se aplique simultáneamente en ambas poblaciones.

Formación de mestizos

En el ciclo agrícola de otoño-invierno (OI) 2010-2011 se sembraron, en condiciones de riego en terrenos del Campo Experimental Santiago Ixcuintla del INIFAP, 148 líneas S_3 de la población ST $C_2 F_2$ y el probador población PABGT-CE $C_9 F_2$ para formar mestizos. Las líneas y el probador se sembraron en aislamiento en proporción 2:1 (líneas:probador). El tamaño de parcela fue un surco de 4.0 m distanciados a 0.80 m con 22 plantas cada uno. El manejo agronómico del lote se hizo con base en las recomendaciones para el cultivo del maíz generadas por el Programa de Maíz del Campo Experimental Santiago Ixcuintla (INIFAP, 2017a). En la etapa de floración, las espigas de las líneas se eliminaron antes de que iniciara

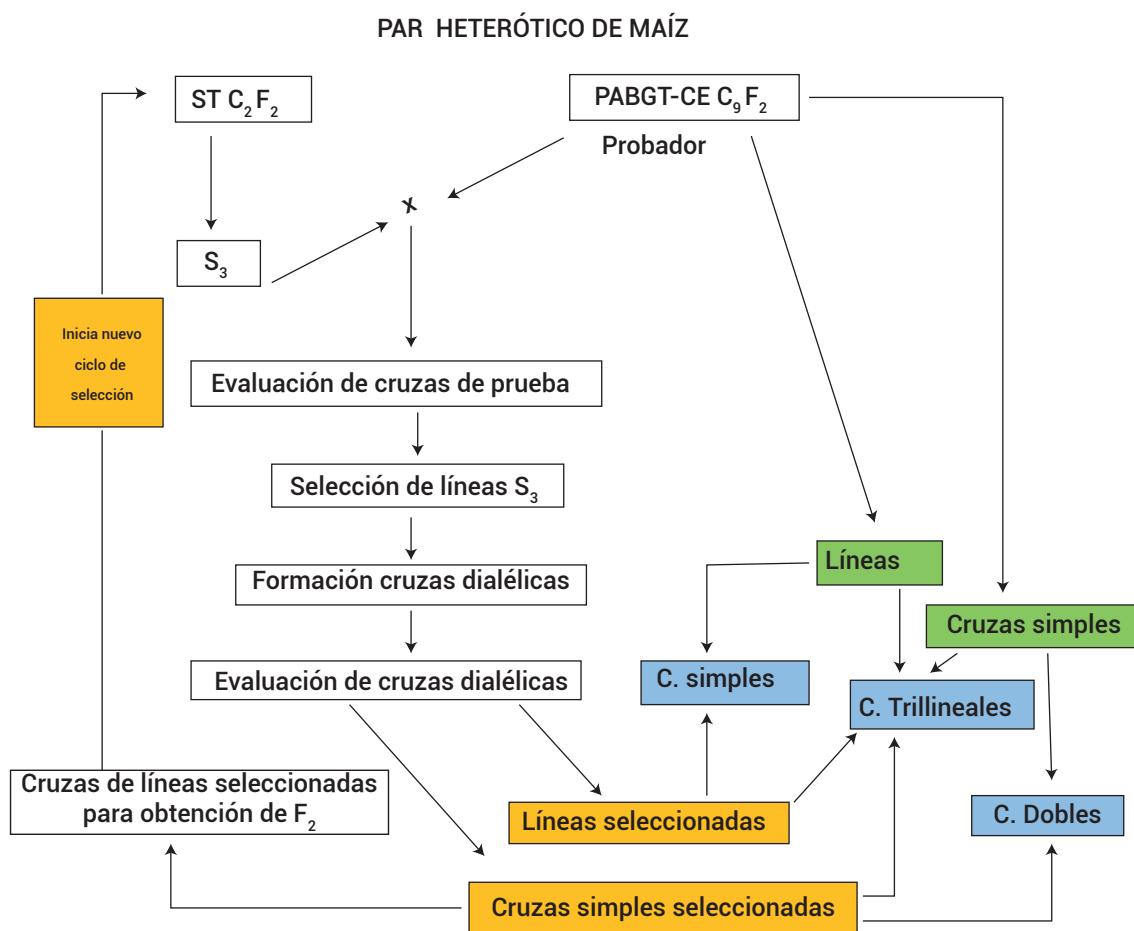


Figura 1. Esquema de selección del par heterótico ST C₂ F₂ × PABGT-CE C₉ F₂ que asocia la prueba de mestizos con cruzas dialélicas entre las líneas seleccionadas en la población. En el esquema se asume que las líneas y cruzas seleccionadas en la población PABGT-CE siguieron el mismo proceso de selección que en la población ST.

la liberación de polen, y en la cosecha se eliminaron mazorcas de plantas acamadas y enfermas.

Evaluación de mestizos

En el ciclo agrícola de primavera-verano (PV) 2012 se integró un ensayo uniforme con 144 mestizos, las poblaciones originales, siete testigos comerciales del INIFAP y tres de empresas privadas. El ensayo se sembró en condiciones de temporal en las localidades de San Miguel Cuyutlán, municipio de Tlajomulco, Jalisco, ubicado a 1350 msnm, Peña del Panal, Michoacán (1897 msnm), Tepatitlán, Jalisco (1930 msnm) y San José de Mojarras, Nayarit (1084 msnm). Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones. El tamaño de parcela fue de un surco de 4.0 m de longitud distanciados a 0.80 m, con 24 plantas cada uno, equivalente a la densidad de población de 75 mil plantas

ha⁻¹. El manejo agronómico de los experimentos se hizo con base en las recomendaciones técnicas para el cultivo del maíz generadas por el INIFAP en cada localidad (INIFAP, 2017a; 2017b; 2017c).

Las variables estudiadas fueron a) rendimiento de grano en peso seco (kg ha⁻¹) el cual se estimó con la ecuación siguiente:

$$\text{Rendimiento} = \text{PC} \times \text{PG}/100 \times \text{PMS} \times \text{FC}$$

donde PC: peso de campo en mazorca (kg), PG: porcentaje de grano, PMS: (100 - porcentaje de humedad del PC)/100, FC: factor de conversión = 10,000/área de la unidad experimental = 3125.

Se evaluó además, b) número de días a floración masculina, contados desde la fecha de siembra hasta que

en el 50 % de las plantas las espigas estuvieran liberando polen, c) número de días a floración femenina, contados desde la fecha de siembra hasta que el 50 % de las plantas exhibieron jilotes con estigmas expuestos con longitud mayor que 3.0 cm, d) altura de planta (cm), medida en tres plantas por parcela desde el suelo hasta la punta de la espiga, e) altura de mazorca (cm), medida en tres plantas por parcela desde el suelo hasta el nudo de la mazorca principal, f) porcentaje de acame de raíz, se calculó a partir del número de plantas acamadas de raíz dividida entre el número total de plantas de cada parcela (NTPL) y multiplicada por 100, se consideraron plantas acamadas de raíz aquellas desviadas 30° de la vertical o con "cuello de ganso", y g) porcentaje de acame de tallo, calculado a partir del número de plantas acamadas de tallo dividida entre el NTPL y multiplicada por 100, se consideraron plantas acamadas de tallo a aquellas dobladas o quebradas abajo del nudo donde se inserta la mazorca principal.

Se hicieron dos tipos de análisis de varianza combinados, uno que incluyó sólo a los mestizos y el otro a los mestizos y testigos; se consideró a las localidades como efectos fijos y a los genotipos como aleatorios. En la comparación de medias se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa ($P \leq 0.05$) (SAS Institute, 1996). La aptitud combinatoria general (ACG) de los mestizos se calculó como la diferencia entre el valor de la variable obtenida en el mestizo y la media general de los mestizos (Hallauer y Miranda, 1988). La prueba estadística de ACG del mestizo se hizo dividiendo el valor de la ACG entre la desviación estándar de la media (S/\sqrt{n}) (Hallauer y Miranda, 1988), donde S es la raíz cuadrada del cuadrado medio del error y n es el número de localidades; éste valor se comparó con el valor crítico obtenido en la tabla de t , prueba de dos colas ($P \leq 0.05$) y los grados de libertad del error, el cual fue igual a 1.97.

Formación y evaluación de cruzas dialélicas

Con base en el análisis conjunto de la prueba de mestizos, del 20 % de mestizos sobresalientes se seleccionaron nueve por rendimiento de grano y tolerancia al acame de raíz y tallo, principalmente. Con la semilla remanente de las nueve líneas seleccionadas en PV 2015, en la localidad de San Miguel Cuyutlán municipio de Tlajomulco, Jalisco, se hicieron las cruzas dialélicas con base en el modelo IV de Griffing (1956), del que se obtuvieron 36 cruzas simples.

En el ciclo agrícola PV 2016 las cruzas simples se evaluaron en un ensayo uniforme integrado con 36 cruzas simples, las poblaciones originales, cuatro testigos comerciales del INIFAP y dos de empresas privadas. Se utilizó el diseño experimental látice triple 7×6 . El tamaño de parcela y la densidad de población fueron iguales a las

usadas en la prueba de mestizos. El ensayo se sembró en cinco localidades, las cuatro ya señaladas para mestizos, más Iguala, Guerrero (751 msnm), de las cuales, cuatro se sembraron en temporal, y en Peña del Panal, Michoacán en punta de riego. El manejo agronómico de los experimentos se hizo con base en las recomendaciones técnicas para el cultivo del maíz generadas por el INIFAP en cada localidad (INIFAP, 2017a; 2017b; 2017c; 2017d). Las variables estudiadas fueron las mismas descritas en la evaluación de mestizos.

En el análisis estadístico combinado sólo se incluyó a las cruzas dialélicas. En la comparación de medias se aplicó la prueba de la DMS ($P \leq 0.05$), y el análisis genético de las cruzas dialélicas se realizó con el programa propuesto por Zhang y Kang (2003). Los análisis estadísticos se hicieron utilizando el paquete estadístico de SAS® (SAS Institute, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de mestizos

En el análisis estadístico conjunto que incluyó mestizos, poblaciones originales y testigos, hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para todas las variables, excepto altura de planta, en el factor variedades \times ambiente. Las medias de rendimiento de grano del 20 % de mestizos sobresalientes fueron estadísticamente iguales a las de los testigos INIFAP-4 ($7,545 \text{ kg ha}^{-1}$) y TC-1 ($6,736 \text{ kg ha}^{-1}$), lo cual indica que su rendimiento de grano es competitivo (Cuadro 1).

Por otra parte, en el análisis estadístico conjunto que incluyó sólo mestizos, hubo diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) para todas las variables en las fuentes de variación, excepto para altura de planta y mazorca en la interacción mestizos \times ambientes. Los resultados anteriores indican diferencias entre ambientes y un comportamiento diferencial de los mestizos a través de los ambientes de evaluación (Cuadro 2).

La media más alta de rendimiento de grano en localidades se registró en Tlajomulco (7761 kg ha^{-1}) y fue mayor ($P \leq 0.05$) que en el resto de localidades, le siguieron las localidades de Morelia (7525 kg ha^{-1}), Santa María del Oro (5019 kg ha^{-1}) y Tepatitlán (3812 kg ha^{-1}), y entre éstas hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3). El rendimiento de grano más bajo obtenido en Tepatitlán se debió a una fuerte sequía que se presentó en la etapa final de llenado de grano, que pudo comprobarse con la media de altura de planta y mazorca, pues éstas fueron mayores ($P \leq 0.05$) que en el resto de las localidades lo que indicó que el desarrollo de las plantas fue normal hasta la etapa

Cuadro 1. Rendimiento de grano y características agronómicas del grupo sobresaliente (20 %) de mestizos formados con líneas S₃ de la población ST C₂ F₂ usando como probador la población PABGT-CE C₉ F₂. Promedio de cuatro localidades. 2012.

Genealogía	Rend (kg ha ⁻¹)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (cm)	
		Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
ST C₂ F₂-56-1-2	7247	72	73	8	0	264	126
ST C₂ F₂-29-2-1	7204	71	71	4	0	266	114
ST C ₂ F ₂ -36-2-2	7146	70	69	15	0	263	130
ST C ₂ F ₂ -84-2-3	7029	71	72	14	0	270	125
ST C₂ F₂-30-2-1	6997	71	71	13	0	271	129
ST C ₂ F ₂ -81-4-3	6908	71	72	23	1	274	123
ST C ₂ F ₂ -29-1-1	6865	71	72	10	0	263	128
ST C₂ F₂-21-2-1	6810	71	71	4	1	262	130
ST C ₂ F ₂ -33-2-1	6758	70	70	8	1	268	132
ST C ₂ F ₂ -81-3-2	6702	70	71	14	1	261	118
ST C₂ F₂-77-2-1	6698	71	70	9	0	276	129
ST C ₂ F ₂ -70-1-1	6697	72	72	16	3	270	125
ST C ₂ F ₂ -33-2-3	6696	71	71	7	0	266	130
ST C ₂ F ₂ -44-2-1	6675	71	73	17	0	276	131
ST C ₂ F ₂ -89-3-1	6655	73	73	4	2	264	131
ST C₂ F₂-89-1-1	6641	73	73	6	0	262	134
ST C ₂ F ₂ -84-2-2	6640	72	72	13	1	266	127
ST C ₂ F ₂ -6-2-1	6626	71	71	16	0	260	119
ST C₂ F₂-33-1-1	6588	72	72	5	1	265	123
ST C₂ F₂-69-3-1	6582	72	72	9	1	276	135
ST C ₂ F ₂ -81-3-6	6528	71	71	17	1	276	126
ST C ₂ F ₂ -81-3-5	6526	71	71	17	0	279	128
Media de mestizos seleccionados (20 %)	6783	71	72	11	1	268	127
Media de nueve mestizos selecc. (6.3 %)	6766	72	72	7.2	0.4	270	128
Media general de mestizos	5956	71	72	12	1	266	126
ST C ₂ F ₂ x PABGT-CE C ₉ F ₂	6237	72	72	6	1	268	125
PABGT-CE C ₉ F ₂	4474	71	71	4	4	244	112
ST C ₂ F ₂	3760	73	74	16	1	246	118
INIFAP-4	7545	74	75	14	1	281	139
TC-1	6736	71	70	8	1	258	113
Testigo regional	5943	71	71	4	2	252	117
Media general	5977	72	72	11.1	0.8	265	126
CV (%)	18.5	1.7	1.9	78.1	254.9	4.4	7.6
DMS 0.05	1088	1	2	8.5	2.1	11	9

Rend: rendimiento de grano. En negritas los mestizos seleccionados para el siguiente ciclo de selección.

Cuadro 2. Cuadros medios del análisis de varianza de mestizos formados con líneas S₃ de la población ST C₂ F₂. Análisis combinado a través de cuatro localidades. 2012.

FV	GL	Rend	Floración		Acame		Altura	
			Masc. [†]	Fem. [†]	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
Ambientes	3	1011497663	49979	52181	124611	71.1	282848	5931
Pr > F		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Reps. (Ambientes)	4	6791209	31.8	28	127.4	1.9	418	536
Pr > F		0.0002	<.0001	<.0001	0.153	0.7	0.0145	0.0002
Mestizos	143	2431346	4.7	5.7	193.4	4.3	434	381
Pr > F		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0145	<.0001	<.0001
Mestizos × Ambientes	571	1500796	1.9	2.6	160.4	4.0	131	105
Pr > F		0.0055	0.0221	0.005	<.0001	0.0185	0.5852	0.0923
R ²		0.86	0.99	0.99	0.92	0.57	0.93	0.69
CV (%)		18.3	1.7	1.9	76.3	246.8	4.3	7.7

[†]Las variables floración masculina y femenina sólo se evaluaron en tres localidades por lo que los grados de libertad correctos para ambientes, reps. (ambientes), mestizos y mestizos × ambientes son 2, 3, 143 y 286, respectivamente. FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, Rend: rendimiento de grano.

Cuadro 3. Rendimiento de grano y características agronómicas de mestizos formados con líneas S₃ de la población ST C₂ F₂ y como probador la población PABGT-CE C₉ F₂, en cuatro localidades. 2012.

Localidad	Rend (kg ha ⁻¹)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (cm)	
		Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
Tlajomulco	7761a			42.6a	1.1a	280b	124b
Morelia	7252b	78.2b	79.0b	1.3b	0.1c	237d	125b
Santa María del Oro	5019c	56.2c	56.4c	0.5b	1.2a	244c	122c
Tepatitlán	3812d	79.9a	80.3a	1.3b	0.5b	303a	133a
DMS 0.05	184	0.20	0.23	1.4	0.3	2	2

Medias con la misma letra en las columnas no son estadísticamente diferentes (DMS, 0.05). Rend: rendimiento de grano.

reproductiva inicial. Al respecto, Çakir (2004) señala que la falta de humedad en el maíz en las etapas de antesis y llenado de grano reduce entre 66 y 93 % el rendimiento de grano. Por otro lado, la media más alta de acame se registró en Tlajomulco, debido a que el 28 de agosto de 2012 hubo una tormenta con vientos fuertes que acamó las plantas (Cuadro 3).

Inicialmente, se aplicó un 20 % de presión de selección en los mestizos evaluados, cuya media de rendimiento de grano, con respecto a la de la población, tuvo un diferencial de selección de 827 kg ha⁻¹. Asimismo, la media del porcentaje de acame de tallo se redujo 8.3 % y la de acame de raíz fue igual a la de la población original. Considerando que la tolerancia al acame es una característica muy importante en los híbridos comerciales por la cosecha mecanizada, dentro del grupo del 20 % sobresaliente se seleccionaron nueve mestizos cuyo diferencial de selección en rendimiento de grano fue de 810 kg ha⁻¹, 17 kg

menos que cuando se seleccionó el 20 % de la población, pero el porcentaje de acame de raíz y tallo se redujeron 37 y 43 % con respecto al de la población original (Cuadro 1).

Se considera que nueve líneas es un número adecuado para integrar el sintético del siguiente ciclo de selección, pues Córdova y Márquez (1979) no encontraron diferencias en rendimiento de grano en sintéticos formados entre cinco y ocho líneas, y Márquez-Sánchez (2013) determinó que en un sintético de maíz formado con 10 líneas S₁ y con la participación de 10 plantas por familia, la endogamia estimada fue baja ($F = 0.0526$).

De los nueve mestizos seleccionados, los formados con las líneas ST C₂ F₂-56-1-2 y ST C₂ F₂-29-2-1 tuvieron los valores aditivos positivos y significativos ($P \leq 0.05$) más altos para rendimiento de grano. En floración masculina el valor aditivo del mestizo con la línea ST C₂ F₂-89-1-1 fue positivo y significativo ($P \leq 0.05$), lo que contribuiría a

hacer más tardía la población, mientras que en floración femenina el valor aditivo del mestizo de la línea ST C₂ F₂-77-2-1 fue negativo y significativo ($P \leq 0.05$), el cual aportaría precocidad a la población. En altura de planta y mazorca, el mestizo de la línea ST C₂ F₂-49-2-1 tuvo valores aditivos positivos y significativos ($P \leq 0.05$) y es el que contribuiría más en modificar estas características en la población, mientras que el valor aditivo del mestizo de la línea ST C₂ F₂-29-2-1 fue negativo y significativo ($P \leq 0.05$), lo que contribuiría a reducir la altura de mazorca en la población. En las variables porcentaje de acame de raíz y tallo, en ninguno de los mestizos seleccionados hubo valores aditivos significativos, pero en la mayoría los valores fueron negativos, por lo que se esperaría que la población mejore en la tolerancia al acame (Cuadro 4).

El rendimiento de grano *per se* y la tolerancia al acame de la población PABGT-CE C₉ F₂ (4,474 kg ha⁻¹ y 8 %) fueron mejores que en la población ST C₂ F₂ (3,760 kg ha⁻¹ y 17 %). La heterosis interpoblacional, con respecto al progenitor medio y mejor progenitor, fue 51.5 % y 39.4 %, respectivamente, valores que están dentro de los encontrados por Keeratinijakal y Lamkey (1993), quienes en maíz encontraron que la heterosis del C₀ al C₁₁ varió de 25.4 a 76 % después de 11 ciclos de SRR.

En el método original de SRR (Comstock *et al.*, 1949), una vez terminada la selección de cruzas se continuaría con la recombinación de progenies seleccionadas, obtención de las generaciones F₁ y F₂ del sintético seleccionado, y se

iniciaría un nuevo ciclo de selección. En esta investigación el objetivo fue recombinar sólo progenies con valores aditivos y no aditivos altos en rendimiento de grano y características agronómicas para integrar el nuevo sintético, y además, seleccionar líneas y cruzas simples élite como probadores de híbridos simples, trilineales y dobles; entonces, se determinó que si se asociaba la prueba de mestizos con la de cruzas dialélicas era posible lograrlo, pues las unidades de selección son líneas S₃, donde la correlación genética entre una línea S₃ y su crusa de prueba es 0.93 (Bernardo, 1991), y además la ACG es heredable desde las primeras generaciones de autofecundación de las líneas (Lile y Hallauer 1994).

Cruzas dialélicas entre líneas seleccionadas en mestizos

En el análisis conjunto de las cruzas hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para todas las variables estudiadas en todos los factores de variación, excepto porcentaje de acame de tallo en cruzas e interacción cruzas × ambientes, resultados que indican un comportamiento diferencial entre ambientes, cruzas y la respuesta de éstas a través de los ambientes de evaluación (Cuadro 5). Con base en estos resultados se realizó el análisis genético de las cruzas, en el que se encontró que los efectos de ACG y ACE fueron significativos ($P \leq 0.05$) para todas las variables, excepto los efectos de ACE para floración masculina y porcentaje de acame de tallo, resultados que indican que las líneas evaluadas difieren tanto en sus valores genéticos aditivos

Cuadro 4. Aptitud combinatoria general de mestizos formados con líneas S₃ de la población ST C₂ F₂ y como probador la población PABGT-CE C₉ F₂. Promedio de cuatro localidades. 2012.

Genealogía	Rend (kg ha ⁻¹)	Aptitud combinatoria general					
		Floración (d)		Acame (%)		Altura (m)	
		Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
ST C ₂ F ₂ -56-1-2	1299*	1	1	-3.40	-0.70	-2	0
ST C ₂ F ₂ -29-2-1	1258*	0	-1	-7.40	-0.70	0	-12*
ST C ₂ F ₂ -30-2-1	1038	0	-1	1.60	-0.70	5	3
ST C ₂ F ₂ -21-2-1	869	0	-1	-7.40	0.30	-4	4
ST C ₂ F ₂ -77-2-1	738	0	-2*	-2.40	-0.70	10	3
ST C ₂ F ₂ -89-1-1	693	2*	1	-5.40	-0.70	-4	8
ST C ₂ F ₂ -33-1-1	645	1	0	-6.40	0.30	-1	-3
ST C ₂ F ₂ -69-3-1	635	1	0	-2.40	0.30	10	9
ST C ₂ F ₂ -49-2-1	67	0	0	-4.40	0.30	18*	10*
Desviación estándar	546	0.7	0.8	4.4	0.9	5.8	4.8
Media de mestizos seleccionados	6766	72	72	7.2	0.4	270	128

* Valor significativo ($P \leq 0.05$).

Cuadro 5. Cuadrados medios del rendimiento de grano y características agronómicas de cruzas dialélicas formadas con nueve líneas de la población ST C₂ F₂ sobresalientes en prueba de mestizos. Análisis combinado a través de cinco localidades. 2016.

FV	GL	Rend	Floración		Altura		Acame	
			Masc.	Fem.	Planta	Mazorca	Raíz	Tallo
Ambientes	4	1242191151	73674	16257	60915	26374	28	385
Pr > F		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0009	<.0001
Reps. (Ambientes)	10	2337464	137	5	903	496	6	72
Pr > F		0.0429	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.446	<.0001
Cruzas	35	4063882	250	7	1253	437	13	23
Pr > F		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0002	0.118
Cruzas × Ambientes	140	1812947	430	2	218	118	9	21
Pr > F		0.0021	0.275	0.0003	0.061	0.0045	0.0006	0.073
CV (%)		18.6	2.5	1.7	5.3	7.2	358.3	180.4
R ²		0.93	0.99	0.99	0.84	0.83	0.48	0.50
Análisis genético								
ACG	8	8070573	21.1	21.8	3925	1355	23.2	43.0
Pr > F		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0001	0.01
ACE	27	2876714	3.0	3.1	462	165	9.4	16.8
Pr > F		0.0002	0.37	0.0004	<.0001	0.003	0.03	0.52
ACG × Ambientes	8	3534491	1.6	0.5	149	66	4.6	126.0
Pr > F		0.004	0.801	0.95	0.56	0.60	0.61	<.0001
ACE × Ambientes	27	1193606	0.7	1.7	108	60	7.7	23.8
Pr > F		0.50	1.00	0.17	0.93	0.85	0.12	0.11

FV: fuente de variación, Rend: rendimiento de grano.

como no aditivos (Cuadro 5).

La interacción ACG × ambientes resultó significativa ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano y acame de tallo, mientras que en la interacción ACE × ambientes no hubo significancia para ninguna de las variables, resultados que coinciden parcialmente con los obtenidos por Murtadha *et al.* (2018), quienes en un trabajo similar no obtuvieron diferencias significativas en rendimiento de grano en los dos tipos de interacción señalados y en este estudio la interacción ACG × ambientes fue significativa ($P \leq 0.05$), lo que muestra que los efectos aditivos son más sensibles al ambiente que los no aditivos (Cuadro 5).

La relación entre el cuadrado medio de la ACG y la ACE fue mayor que 1.0 en todas las variables estudiadas, lo cual muestra que predominó la varianza genética aditiva sobre la no aditiva y se espera que para estas características haya respuesta en los siguientes ciclos de selección en la población ST C₂ F₂, lo que concuerda con lo señalado al respecto por Fasahat *et al.* (2016) y Murtadha *et al.* (2016).

Los progenitores ST C₂ F₂-29-2-1, ST C₂ F₂-69-3-1 y ST C₂ F₂-21-2-1 tuvieron ACG positiva y significativa ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano, y serían los que más contribuirían al rendimiento de grano del sintético; los que menos contribuirían serían los progenitores ST C₂ F₂-56-1-2, ST C₂ F₂-89-1-1 y ST C₂ F₂-77-2-1, pues su ACG fue negativa y significativa ($P \leq 0.05$) (Cuadro 6).

Al comparar la ACG obtenida para rendimiento de grano en mestizos y cruzas dialélicas, hubo un comportamiento diferencial entre las líneas evaluadas (Cuadros 4 y 6). La línea ST C₂ F₂-29-2-1 tuvo ACG alta en las dos pruebas; ésta sería un progenitor ideal para el mejorador porque tiene efectos no aditivos que permitirían obtener buenas combinaciones en cruce con progenitores del otro componente del par heterótico y efectos aditivos altos que contribuirían en el rendimiento de grano de la población; en cambio, la línea ST C₂ F₂-56-1-2 tuvo ACG alta y significativa en mestizos ($P \leq 0.05$), y negativa y significativa en cruzas dialélicas ($P \leq 0.05$), lo que indicaría que predominan los efectos no aditivos sobre los aditivos, ya que en cruce con progenitores del otro componente heterótico se esperarían

Cuadro 6. Aptitud combinatoria general de progenitores seleccionados de maíz derivados de la población ST C₂ F₂ evaluados en cruzas dialélicas. 2016.

Progenitor	Rend (kg ha ⁻¹)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (m)	
		Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
ST C ₂ F ₂ -29-2-1	387**	0.38*	-0.33**	0.70**	1.08*	-6.0**	-4.8**
ST C ₂ F ₂ -69-3-1	305**	-0.25	-0.72**	0.16	0.58	9.1**	3.4**
ST C ₂ F ₂ -21-2-1	269**	-0.21	-0.23*	-0.23	0.10	1.1	3.9**
ST C ₂ F ₂ -49-2-1	78	-0.60**	0.13	-0.15	0.34	8.1**	1.2
ST C ₂ F ₂ -30-2-1	-52	-0.22	0.03	0.57**	-0.46	-2.3*	-2.3**
ST C ₂ F ₂ -33-1-1	-108	0.55**	-0.39**	-0.33	-0.27	-4.4**	-4.9**
ST C ₂ F ₂ -56-1-2	-228*	-0.48**	0.46**	0.38	-0.26	-5.5**	-2.1*
ST C ₂ F ₂ -89-1-1	-242*	0.27	0.67**	-0.59**	0.01	-5.4**	1.5
ST C ₂ F ₂ -77-2-1	-410**	0.58**	0.38**	-0.51*	-1.13*	5.3**	4.0**
Desviación estándar	102	0.15	0.11	1.2	0.84	0.22	0.38

*,** Valores significativos al 0.05 y 0.01 de probabilidad. Rend: Rendimiento de grano.

buenas combinaciones, pero contribuiría poco en el rendimiento de grano de la población.

Un caso contrario al comportamiento de la línea ST C₂ F₂-56-1-2 lo constituyeron las líneas ST C₂ F₂-21-2-1 y ST C₂ F₂-69-3-1, pues tuvieron valores positivos no significativos de ACG en mestizos y efectos positivos significativos ($P \leq 0.05$) en cruzas dialélicas; además, hubo líneas como ST C₂ F₂-33-1-1 que tuvieron ACG baja no significativa, tanto en mestizos como en cruzas dialélicas; en este caso, se esperarían combinaciones modestas con líneas del otro par heterótico y baja contribución en el rendimiento de grano de la población (Cuadros 4 y 6).

Al comparar la ACG obtenida para características agronómicas en mestizos y cruzas dialélicas (Cuadros 4 y 6) también se observa que las líneas tuvieron un comportamiento diferencial en ambas pruebas; así, el progenitor ST C₂ F₂-29-2-1 mostró consistencia en las dos pruebas en rendimiento de grano, pero no así en acame de raíz y tallo, pues en mestizos tuvo ACG negativa no significativa, pero en cruzas dialélicas tuvo el valor positivo más alto y significativo de ACG ($P \leq 0.05$) en acame de raíz y tallo. En este caso el mejorador tendría que decidir si pondera más el rendimiento de grano que la tolerancia al acame. Un caso contrario sería la línea ST C₂ F₂-77-2-1, que tuvo la ACG negativa y significativa ($P \leq 0.05$) más baja en rendimiento de grano en cruzas dialélicas, pero sus valores de ACG de acame de raíz y tallo fueron negativos y significativos ($P \leq 0.05$), por lo que el mejorador tendría que decidir si pondera más al acame que al rendimiento de grano.

Este tipo de ponderaciones son probablemente la razón por la que Moll y Hanson (1984) y Romay *et al.* (2011) no encontraron respuesta a la selección en SRR en una de las poblaciones del par heterótico, pues muchas veces los mejoradores ceden rendimiento de grano a cambio de tener más tolerancia al acame, y en la SRR con enfoque en hibridación, se pondera más la respuesta a la selección en la crusa que en las poblaciones que la integran; sin embargo, la decisión final dependerá de los objetivos del programa de mejoramiento. En este caso, por ser un programa de hibridación comercial se eliminó al progenitor ST C₂ F₂-29-2-1 del sintético por los valores de ACG positivos y significativos ($P \leq 0.05$) en acame de raíz y tallo, tomando en cuenta que la tendencia actual es sembrar en altas densidades de población (Egli, 2015).

Con base en la ACG, se considera que el progenitor ST C₂ F₂-21-2-1 sería el mejor de este grupo por tener ACG positiva y significativa en rendimiento de grano y valor negativo en acame de raíz, pero los híbridos tendrían plantas con mazorca alta, porque la ACG fue positiva y significativa ($P \leq 0.05$) en altura de mazorca (Cuadro 6).

Al analizar la ACE, las cruzas ST C₂ F₂-33-1-1 × ST C₂ F₂-49-2-1 y ST C₂ F₂-21-2-1 × ST C₂ F₂-29-2-1 tuvieron la ACE más alta, positiva y significativa, para rendimiento de grano; de éstas dos, la crusa ST C₂ F₂-33-1-1 × ST C₂ F₂-49-2-1 podría utilizarse como probador para formar cruzas trilineales o dobles utilizando líneas o cruzas élite de la población PABGT-CE C₉ F₂, debido a que, además de tener ACE más alta en rendimiento de grano, tuvo valores negativos de ACE en floración masculina y femenina y acame de raíz y tallo, pero se esperaría que

Cuadro 7. Aptitud combinatoria específica entre progenitores seleccionados de maíz derivados de la población ST C₂ F₂ evaluados en cruzas dialélicas. 2016.

	Rend (kg ha ⁻¹)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (m)	
		Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca
ST C ₂ F ₂ -33-1-1 × ST C2 F2-49-2-1	843**	-0.13	-0.58*	-0.20	-0.78	7.8*	3.1
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-29-2-1	564*	0.25	0.39	-0.87	1.90*	-2.0	-2.3
ST C ₂ F ₂ -33-1-1 × ST C2 F2-69-3-1	445	0.13	-0.13	0.23	-0.69	7.1*	4.0*
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-89-1-1	437	-0.18	-0.41	-0.19	-0.93	4.5	4.0*
ST C ₂ F ₂ -56-1-2 × ST C2 F2-77-2-1	419	-0.24	-0.35	-0.07	0.08	7.1*	5.2**
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-69-3-1	410	0.14	-0.08	-0.86	0.17	-2.9	-5.5**
ST C ₂ F ₂ -77-2-1 × ST C2 F2-89-1-1	303	-0.20	-0.36	0.42	0.15	-1.7	-0.6
ST C ₂ F ₂ -33-1-1 × ST C2 F2-89-1-1	294	-0.39	-0.52*	0.51	-0.45	1.5	-0.2
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-69-3-1	290	0.31	-0.25	0.20	-0.17	8.2**	4.1*
ST C ₂ F ₂ -49-2-1 × ST C2 F2-56-1-2	272	0.12	0.31	-0.90	0.34	-1.7	-2.4
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-49-2-1	264	-0.24	-0.53*	0.51	0.31	6.6*	3.8
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-56-1-2	237	-0.15	-0.13	0.25	0.38	5.0	-0.6
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-77-2-1	184	-0.37	-0.16	-0.60	-1.73	2.1	-2.6
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-49-2-1	175	-0.32	-1.00**	0.24	0.41	2.8	3.9*
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-33-1-1	153	0.01	0.18	0.16	-0.68	-8.0**	-2.5
ST C ₂ F ₂ -49-2-1 × ST C2 F2-77-2-1	101	0.73	0.52*	0.25	0.22	-4.4	-2.9
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-89-1-1	95	-0.31	-0.21	0.41	-0.29	2.5	2.9
ST C ₂ F ₂ -56-1-2 × ST C2 F2-69-3-1	-5	-0.15	-0.51*	0.60	1.17	-0.8	-0.6
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-77-2-1	-34	-0.08	0.01	-0.73	0.35	-1.4	1.0
ST C ₂ F ₂ -56-1-2 × ST C2 F2-89-1-1	-48	0.25	0.30	-0.46	0.01	1.5	-2.7
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-49-2-1	-72	0.25	-0.04	0.11	-1.54	-0.8	-0.8
ST C ₂ F ₂ -69-3-1 × ST C2 F2-77-2-1	-78	0.45	0.30	0.21	0.65	-6.2*	-2.6
ST C ₂ F ₂ -69-3-1 × ST C2 F2-89-1-1	-86	0.22	0.35	-0.24	-0.56	1.5	1.4
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-89-1-1	-92	-0.35	-0.11	-0.52	1.13	-3.4	-0.8
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-56-1-2	-115	0.05	0.34	-0.01	0.14	5.2	3.4
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-56-1-2	-135	0.15	-0.17	-0.21	-2.60**	-2.7	1.1
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-30-2-1	-188	-0.35	0.19	2.93*	1.00	-4.6	-0.4
ST C ₂ F ₂ -30-2-1 × ST C2 F2-33-1-1	-245	0.53	0.78**	-0.64	-0.25	-1.4	-1.3
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-69-3-1	-294	0.28	-0.02	-0.06	-0.66	-2.9	-0.1
ST C ₂ F ₂ -33-1-1 × ST C2 F2-77-2-1	-314	-0.22	-0.10	0.17	0.36	3.5	-1.5
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-30-2-1	-440	0.22	0.16	-0.74	-0.89	-2.1	-5.1*
ST C ₂ F ₂ -29-2-1 × ST C2 F2-33-1-1	-552*	0.10	0.15	-1.04*	2.01*	3.2	1.8
ST C ₂ F ₂ -21-2-1 × ST C2 F2-77-2-1	-580*	-0.07	0.15	0.34	-0.08	1.0	4.0*
ST C ₂ F ₂ -33-1-1 × ST C2 F2-56-1-2	-624**	-0.03	0.22	0.81	0.48	-13.6**	-3.4
ST C ₂ F ₂ -49-2-1 × ST C2 F2-69-3-1	-682**	-1.38*	0.35	-0.08	0.10	-3.9	-0.6
ST C ₂ F ₂ -49-2-1 × ST C2 F2-89-1-1	-902**	0.96*	0.96**	0.06	0.94	-6.3*	-4.1*
Desviación estándar	247	0.38	0.26	2.96	2.0	0.5	0.9

* y **: significancia a P ≤ 0.05 y 0.01, respectivamente. Rend: rendimiento de grano en materia seca (kg ha⁻¹).

las cruzas tengan plantas altas, pues su ACE fue positiva y significativa ($P \leq 0.05$) en altura de planta. Otra crusa de interés sería ST C₂ F₂-30-2-1 × ST C₂ F₂-89-1-1, pues a pesar de que no fueron significativos los valores de ACG, ésta fue positiva para rendimiento de grano, y negativa para floración masculina y femenina, acame de raíz y tallo, por lo que se esperaría obtener híbridos más precoces y tolerantes al acame, pero con mazorca alta debido a que la ACG de altura de mazorca fue significativa ($P \leq 0.05$). Por otro lado, la crusa ST C₂ F₂-21-2-1 × ST C₂ F₂-29-2-1, que tuvo ACG positiva y significativa ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano, se eliminaría debido a que en las cruzas donde la ACE fue positiva y significativa ($P \leq 0.05$) para acame de tallo participó la línea ST C₂ F₂-29-2-1 (Cuadro 7), lo cual confirma el resultado encontrado en la prueba de ACG (Cuadro 6).

En resumen, de acuerdo con los resultados obtenidos, se considera que la prueba de mestizos asociada con la de cruzas dialélicas tiene ventajas importantes debido a que se seleccionan progenitores con valores altos de ACG y ACE, se eliminan progenitores dudosos antes de recombinarse en el siguiente ciclo de selección, se obtiene la F₁ y hay mejor recombinación en la F₂ entre progenitores seleccionados, además de que se obtienen líneas y cruzas simples para formar híbridos simples, trilineales y dobles con progenitores del otro par heterótico. Las desventajas relativas serían un mayor costo adicional para formar y evaluar las cruzas y que se usa un ciclo agrícola más para completar un ciclo de selección en la SRR.

CONCLUSIONES

Tanto en la prueba de mestizos como en cruzas dialélicas las líneas ST C₂ F₂-21-2-1 y ST C₂ F₂-29-2-1 sobresalieron por su alta ACG para rendimiento de grano, eliminándose la última porque en cruzas dialélicas la ACG y ACE para acame fue positiva y significativa ($P \leq 0.05$). La crusa simple ST C₂ F₂-33-1-1 × ST C₂ F₂-49-2-1 resultó la más prometedora porque sus valores de ACE fueron positivo significativo ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano, negativo y significativo ($P \leq 0.05$) para número de días a floración femenina, y negativos, aunque no significativos, para acame de raíz y tallo. Asociar las pruebas de mestizos y cruzas dialélicas permitió seleccionar con más rigor líneas y cruzas con alta ACG y ACE para rendimiento de grano y características agronómicas, eliminar líneas indeseables antes de formar un sintético y obtener líneas y cruzas simples prometedoras para formar híbridos sobresalientes con progenitores élite del otro componente heterótico.

BIBLIOGRAFÍA

- Astete M. F. A. and J. B. de Miranda F. (2002) Inbreeding depression in maize populations of reduced size. *Scientia Agricola* 59:335-340, <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000200020>
- Bernardo R. (1991) Correlation between testcross performance of lines at early and late selfing generations. *Theoretical and Applied Genetics* 82:17-21, <https://doi.org/10.1007/BF00231272>
- Çakir R. (2004) Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research* 89:1-16, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Comstock R. E., H. F. Robinson and P. H. Harvey (1949) A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agronomy Journal* 41:360-367, <https://doi.org/10.2134/agronj1949.00021962004100080006x>
- Córdova O. H. S. y F. Márquez S. (1979) Efecto del número de líneas endogámicas sobre el comportamiento de las variedades sintéticas derivadas de una población de maíz (*Zea mays L.*) I. Rendimiento. *Agrociencia* 37:235-252.
- Egli D. B. (2015) Is there a role for sink size in understanding maize population-yield relationships? *Crop Science* 55:2453-2462, <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0227>
- Fasahat P., A. Rajabi, J. M. Rad and J. Derera (2016) Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biometrics and Biostatistics International Journal* 4:1-22, <https://doi.org/10.15406/bbij.2016.04.00085>
- Gómez M. N. O., J. L. Ramírez D. y A. Turrent F. (2001) H-516, maíz de alto rendimiento para regiones cálidas y semicálidas de México. Folleto Técnico No. 8. Campo Experimental Iguala, CIRPAS-INIFAP-SAGARPA. Iguala, Guerrero. 20 p.
- Griffing B. (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system. *Australian Journal of Biological Sciences* 9:463-493, <https://doi.org/10.1071/BI9560463>
- Hallauer A. R. and F. B. Miranda F. (1988) Quantitative Genetics in Maize Breeding. Second edition. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 468 p.
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2017a) Agenda Técnica Agrícola Nayarit. INIFAP. Ciudad de México. 92 p.
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2017b) Agenda Técnica Agrícola Jalisco. INIFAP. Ciudad de México. 266 p.
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2017c) Agenda Técnica Agrícola Michoacán. INIFAP. Ciudad de México. 267 p.
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2017d) Agenda Técnica Agrícola Guerrero. INIFAP. Ciudad de México. 116.
- Keeratinijakal V. and K. R. Lamkey (1993) Responses to reciprocal recurrent selection in BSSS and BSCB1 maize populations. *Crop Science* 33:73-77, <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300010012x>
- Lile S. M. and A. R. Hallauer (1994) Relation between S₂ and later generation testcrosses of two corn populations. *The Journal of the Iowa Academy of Science* 101:19-23.
- Márquez-Sánchez F. (2013) Endogamia en un sintético de maíz formado con familias de auto hermanos (Líneas S₁). *Revista Fitotecnia Mexicana* 36:259-261.
- Moll R. H. and W. D. Hanson (1984) Comparisons of effects of intrapopulation vs interpopulation selection in maize. *Crop Science* 24:1047-152, <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060010x>
- Murtadha M. A., O. J. Ariyo and S. S. Alghamdi (2018) Analysis of combining ability over environments in diallel crosses of maize (*Zea mays*). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 17:69-78, <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.01.004>
- Paterniani E. and R. Vencovsky (1978) Reciprocal recurrent selection based on half-sib progenies and prolific plants in maize. *Maydica* 23:209-219.
- Ramírez D. J. L. y J. Ron P. (1988) Evaluación de familias de maíz, por su tolerancia al carbón de la espiga *Sphacelotheca reiliana* (Kuhn) Clint, en Jalisco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 11:121-132.

- Ramírez D. J. L., M. Chuela B., V. A. Vidal M., H. L. Vallejo D., R. Ramírez Z., A. Peña R., A. Ortega C., H. Córdova O., A. Morfin V., N. O. Gómez M., F. Caballero H., M. Ramírez M., M. G. Vázquez C., J. A. Ruiz C., J. Ron P., J. J. Sánchez G. y L. Soltero D. (2010) Híbrido de maíz de grano blanco para riego y buen temporal para la zona Centro-Oeste de México. Folleto Técnico Núm. 3. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. CIRPAC-INIFAP. Tepatitlán, Jalisco. 36 p.
- Ramírez-Díaz J. L., A. Ledesma-Miramontes, V. A. Vidal-Martínez, N. O. Gómez-Montiel, J. A. Ruiz-Corral, G. A. Velázquez-Cardelias, J. Ron-Parra, Y. Salinas-Moreno y L. A. Nájera-Calvo (2015) Selección de maíces nativos como donadores de características agronómicas útiles en híbridos comerciales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:119-131.
- Rebolloza H. H., A. Castillo G., V. E. Carapia R., M. Andrade R., O. G. Villegas T., M. E. Núñez V., R. Suárez R. y F. Perdomo R. (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.
- Romay M. C., B. Ordás, P. Revilla and A. Ordás (2011) Three cycles of full-sib reciprocal recurrent selection in two Spanish maize populations. *Crop Science* 51:1016-1022, <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.06.0365>
- Santos M. F., T. M. M. Câmara, G. V. Moro, E. F. N. Costa and C. L. de Souza Jr. (2007) Responses to selection and changes in combining ability after three cycles of a modified reciprocal recurrent selection in maize. *Euphytica* 157:185-194, <https://doi:10.1007/s10681-007-9410-x>.
- SAS Institute (1996) SAS Software Release V 6.12. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 830 p.
- Souza Jr. C. L. (1987) Reciprocal recurrent selection with half-sib progenies obtained alternately from noninbred (S_0) and inbred (S_1) plants in maize. *Maydica* 32:19-31.
- Zhang Y. and M. S. Kang (2003) DIALLEL-SAS: A program for Griffing's diallel methods. In: *Handbook of Formulas and Software for Plant Geneticists and Breeders*. M. S. Kang (ed.). Food Products Press and The Haworth Reference Press. Binghamton, New York, USA. pp:1-19.