

ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE CRUZAS DIALÉLICAS ENTRE LÍNEAS DE MAÍZ DE ALTA Y BAJA APTITUD COMBINATORIA GENERAL

YIELD STABILITY OF DIALLELIC CROSSES AMONG MAIZE LINES OF HIGH AND LOW GENERAL COMBINING ABILITY

Marcelina Vélez-Torres¹, J. Jesús García-Zavala^{1*}, Ricardo Lobato-Ortiz¹, Ignacio Benítez-Riquelme¹, J. Jesús López-Reynoso², José A. Mejía-Contreras³ y Gilberto Esquivel-Esquível⁴

¹Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad - Genética, ³Producción de Semillas, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. km 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. Méx., México. ²Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Chapingo, Texcoco, Edo. Méx., México. ⁴Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 13.5 Carr. Los Reyes-Texcoco. 56250, Coatlinchán Texcoco, Edo. Méx., México.

*Autor para correspondencia (zavala@colpos.mx)

RESUMEN

En los programas de mejoramiento genético enfocados a desarrollar híbridos de maíz (*Zea mays L.*), conocer la estabilidad del rendimiento de grano de líneas en combinaciones hibridas es transcendental. El objetivo del presente estudio fue evaluar la estabilidad del rendimiento de cruzas simples dialélicas provenientes de líneas de maíz de alta y baja aptitud combinatoria general (ACG). Se emplearon ocho líneas de la raza Chalqueño: cuatro de alta (A) y cuatro de baja (B) ACG, con diferente nivel endogámico. El rendimiento de mazorca por planta de 24 de las 28 cruzas simples posibles se evaluó en dos localidades del Estado de México, de 2011 a 2013; en las evaluaciones de 2012 y 2013 se incluyeron cuatro testigos comerciales. Se empleó el método AMMI y se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre ambientes, genotipos, interacción genotipo \times ambiente y en los efectos del primer componente principal (CP1). La variabilidad total debida a interacción fue explicada por el CP1 (86.62 %) y CP2 (13.38 %). El modelo retuvo 86.69 % de la suma total de cuadrados. Las cruzas A \times B expresaron los rendimientos más altos y las cruzas A \times A la mayor estabilidad. La crusa A3 \times B3 fue estable y con alto rendimiento (108.27 g/planta). La respuesta de las cruzas a un ambiente específico demostró que además de la ACG de las líneas, la adaptación y la adaptabilidad de la crusa juegan un papel importante para el desempeño de su rendimiento. Las mejores cruzas igualaron en rendimiento de grano al mejor testigo.

Palabras clave: *Zea mays*, adaptabilidad, adaptación, AMMI, hibridación.

SUMMARY

In breeding programs focused on developing maize (*Zea mays L.*) hybrids, knowing the stability of grain yield of inbred lines in hybrid combinations is important. The objective of this study was to evaluate the stability of grain yield of single diallelic crosses from high and low general combining ability (GCA) maize lines. Eight lines of the Chalqueño race were used, four of high (H) and four of low (L) GCA, with different levels of inbreeding. The yield of ear per plant of 24 out of the 28 possible single crosses was evaluated in two locations of the State of Mexico, from 2011 to 2013; in the evaluations of 2012 and 2013 four commercial checks were included. The AMMI method was used and significant differences ($P \leq 0.01$) were found between environments, genotypes, genotype \times environment interaction and in the effects of the first principal component (PC1). The total variability due to interaction was

explained by PC1 (86.62 %) and PC2 (13.38 %). The model retained 86.69 % of the total sum of squares. The crosses H \times L expressed the highest yields and the crosses H \times H the highest stability. The H3 \times L3 cross was stable and with high yield (108.27 g per plant). The response of the crosses to a specific environment showed that in addition to the GCA of the lines, the adaptation and adaptability of the cross play a crucial role in the performance of grain yield. The best crosses equaled the best check in grain yield.

Index words: *Zea mays*, adaptability, adaptation, AMMI, hybridization.

INTRODUCCIÓN

La evaluación del rendimiento de cruzas simples entre líneas de maíz (*Zea mays L.*) de aptitud combinatoria general conocida y contrastante juega un papel importante en los programas de desarrollo de híbridos, al proporcionar información para identificar materiales que posiblemente producirán progenie que presente altos niveles de heterosis para rendimiento de grano, sin la necesidad de hacer todas las cruzas posibles entre las líneas disponibles en un programa de mejoramiento, como lo señalan Oyekunle *et al.* (2015), con ello se reducirán los costos y tiempo asociados a la formación, evaluación y producción de híbridos comerciales.

La capacidad que tiene un individuo de combinarse con otros, medida por medio del valor genotípico de su progenie, se ha definido como aptitud combinatoria (AC) (Márquez, 1988), y al comportamiento promedio de una línea en combinaciones hibridas como aptitud combinatoria general (ACG) (Sprague y Tatum, 1942), la cual se considera está asociada a la acción génica de tipo aditivo (Falconer y Mackay, 2006), y es evaluada por medio de un probador de reducida base genética con alta frecuencia de genes recesivos para el carácter de interés (Lobato-Ortiz *et al.*, 2010), lo que permite clasificar a las líneas como de alta o baja ACG.

En maíz, los primeros trabajos de hibridación indicaron que las cruzas entre líneas de baja AC producen híbridos con un rendimiento bajo; al cruzar líneas de alta AC los rendimientos son altos; y al realizar cruzas entre líneas de baja y alta AC se obtiene un rendimiento equivalente al de cruzas entre líneas de alta AC (Johnson y Hayes, 1940). Posteriormente, Sprague y Tatum (1942) introdujeron los conceptos de ACG y ACE (aptitud combinatoria específica), mediante los cuales Escorcia-Gutiérrez *et al.* (2010) y Pérez-López *et al.* (2014) encontraron que en cruzas simples de alto rendimiento al menos una de sus líneas fue de alta ACG y hubo efectos altos de ACE, y que las cruzas simples de más bajo rendimiento fueron aquellas cuyas dos líneas tuvieron la más baja ACG y efectos bajos de ACE; sin embargo, encontraron alta significancia en la interacción cruzas × ambientes y no mencionan si existieron cruzas con estabilidad a través de ambientes y si las hubo, qué tipo de cruzas fueron las más estables.

El mejorador de maíz, además de identificar las mejores cruzas, necesita analizar la estabilidad de su rendimiento al evaluarlas en ambientes diferentes, para ello existen procedimientos como el método AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) (Zobel *et al.*, 1988), el cual consiste en combinar en un solo modelo el análisis de varianza para estudiar los efectos principales de los genotipos y ambientes, y el análisis de componentes principales (ACP) para estudiar la interacción genotipo × ambiente (IGA) de forma multivariada para su interpretación. Asimismo, el algoritmo de AMMI produce gráficos de dos dimensiones para el análisis de datos de IGA (Gauch, 1988; Kempton, 1984).

El estudio de la IGA permite clasificar a los genotipos por su comportamiento en función de su rendimiento como estables o adaptados a un ambiente particular. El concepto agronómico de estabilidad indica que un genotipo estable es aquel que muestra interacciones mínimas con los ambientes (Becker, 1981). Un genotipo adaptado es aquel que sobrevive, se reproduce y genera progenie en un ambiente particular (Allard y Hansche, 1964), pero éste además puede presentar adaptabilidad, la cual es la capacidad del genotipo para aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente (Gordón-Mendoza *et al.*, 2006).

Se asume que en el desempeño de las combinaciones híbridas de maíz para rendimiento están implícitos tanto factores genéticos como ambientales; por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la estabilidad del rendimiento de cruzas simples dialélicas de maíz provenientes de líneas de alta y baja aptitud combinatoria general, bajo el supuesto de que se pueden identificar genotipos de buen rendimiento, estables, adaptados o que muestran adaptabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

Se evaluaron 24 de las 28 cruzas simples posibles entre ocho líneas autofecundadas de maíz, cuatro con ACG alta (A1, A2, A3, A4) y cuatro con ACG baja (B1, B2, B3, B4), cuya aptitud combinatoria general fue medida en su fase temprana mediante la prueba línea × probador, donde el probador fue una variedad seleccionada para bajo rendimiento (Lobato-Ortiz *et al.*, 2010). Las líneas se formaron en la localidad Montecillo, Estado de México y se derivaron de compuestos intervarietales de la raza de maíz Chalqueño (Cuadro 1).

El compuesto Xolache se formó por las colecciones: México 46, 48, 80, 127, 143, 153, 158, 166, 171, 172, 180; Puebla 21, 241, 242, 243, 244, 260; Durango 2; Guanajuato 26; Tlaxcala 5; Michoacán 1975; y Chalqueño Grueso. El compuesto México Grupo 10 se formó por las colecciones: México 180, 171, 172, 68, 70, 71, 115, 142, 143, 146, 156, 159, 177, y 200. Las cruzas A2 × A3, A2 × B1, A2 × B2, A2 × B3, no se evaluaron por no contar con suficiente semilla. Se incluyeron como testigos los híbridos comerciales de maíz HS2, Promesa, San José y Búho®.

Sitios experimentales

La evaluación de las 24 cruzas simples se hizo durante el ciclo primavera-verano de 2011 y 2012 en el Campo Experimental Montecillo del Colegio de Postgrados y de 2013 en el Campo Experimental Santa Lucía de Prías del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, ambos con ubicación en Texcoco, Estado de México. Sólo en 2012 y 2013 se evaluaron los testigos en las dos localidades.

Cuadro 1. Genealogía de las líneas progenitoras de cruzas simples dialélicas de maíz.

Línea	Genealogía	Nivel de endogamia
A1	Xolache (SM_6) -4-1-1	S_3
A2	Xolache (Orig.) -112-1 (9)-1	S_{11}
A3	Méx. Gpo.10 (Orig.) -6-1-1	S_3
A4	Méx. Gpo.10 (Orig.) -13-1-1	S_3
B1	Méx. Gpo.10 (Orig.) -15-1	S_2
B2	Méx. Gpo.10 (Orig.) -146-1-1	S_3
B3	Xolache (Orig.) -67-1 (9)-1	S_{11}
B4	Xolache (Orig.) -67-1-1-1	S_4

Diseño, unidad experimental y manejo del experimento

Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, con unidades experimentales constituidas por parcelas de dos surcos separados a 80 cm y 6 m de largo, que tuvieron 13 matas por surco, cada una con dos plantas. En ambas localidades se proporcionó un riego de germinación y de auxilio hasta el establecimiento de las lluvias. Se fertilizó con 120 kg N y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹, se aplicó todo el P₂O₅ y la mitad de N en la siembra, el resto del N se suministró en la segunda escarda; se dio un paso de cultivo a los 25 días después de la emergencia (dde) y el aporque a los 40 dde; la maleza se controló con 3.0 L ha⁻¹ de Gesaprim Calibre 90 GDA® siete días después de la siembra.

Variable respuesta y análisis estadístico

Se midió el rendimiento de mazorca por planta (peso de mazorca por parcela/número de plantas por parcela) en g por planta. Se realizó el análisis de estabilidad mediante el estudio de la interacción genotipo × ambiente, de acuerdo con el procedimiento del método AMMI que presenta el modelo descrito por Gauch (1988):

$$Y_{ge} = \mu + a_g + \beta_e + \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_{gn} \delta_{en} + \theta_{ge} + \varepsilon_{ger}$$

donde: Y_{ge} = rendimiento del genotipo g en el ambiente e ; μ = media general; a_g = desviaciones medias de genotipo; β_e = desviaciones medias de ambiente; λ_n = valor propio del eje n del análisis de componentes principales (ACP); Y_{gn} y δ_{en} = calificaciones del ACP de genotipo y de ambiente para el eje n del ACP; N = número de ejes del ACP retenidos en el modelo; θ_{ge} = residual; ε_{ger} = término error.

Los efectos principales en la parte aditiva del modelo fueron analizados por un análisis de varianza ordinario, mientras que el residual no aditivo de esta parte (interacción) se analizó en la parte multiplicativa del modelo mediante un análisis de componentes principales. La significancia de los componentes principales se definió al emplear la prueba de Gollob (Gollob, 1968). La visualización e interpretación de resultados para clasificar la IGA se realizó mediante la técnica de biplot (Kempton, 1984; Yan *et al.*, 2000; Zobel *et al.*, 1988), en la cual se emplearon los tipos AMMI1 (modelo AMMI con un componente principal) y AMMI2 (modelo AMMI con dos componentes principales).

Los mejores híbridos en promedio de los dos ambientes evaluados, que incluyen los testigos, se determinaron al comparar las medias del rendimiento con base en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Para todos los análisis estadísticos se utilizó el paquete SAS ®versión 9.1 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 2 muestra el análisis de varianza obtenido con el procedimiento AMMI, el cual detectó significancia estadística alta ($P \leq 0.01$) para ambientes, genotipos e interacción genotipo × ambiente, lo cual indicó que las cruzas expresaron rendimientos diferentes entre sí en cada ambiente de evaluación. Esto puede ser atribuido a condiciones ambientales cambiantes de un ciclo a otro y sus efectos diferenciales sobre los genotipos (Molina, 1992). El 21.53 % de la suma de cuadrados totales fue atribuible a efectos genotípicos, mientras que los efectos ambientales representaron 52.87 % y la interacción genotipo × ambiente contribuyó con 12.29 %.

La diferencia estadística altamente significativa en la IGA para rendimiento, que se encontró en la parte aditiva del modelo, respaldó la aplicación del análisis de estabilidad de las cruzas, pues dentro de la interacción, de acuerdo con la prueba de Gollob (1968), también los efectos del primer componente principal (CP1) resultaron con alta significancia ($P \leq 0.01$). Dicho componente explicó 86.62 % de la variabilidad total debida a la interacción, mientras que el componente segundo principal (CP2) explicó 13.38 %; es decir, el efecto de la IGA fue explicado en su totalidad por los dos primeros componentes principales, dado que el residuo de la parte multiplicativa resultó no significativo. Asimismo, hubo buena concordancia de la estructura de los datos con el modelo, ya que este retuvo 86.69 % de la suma de cuadrados total (ambiente + genotipo + interacción), para lo cual utilizó 71 grados de libertad (2 para ambientes, 23 para genotipos y 46 para CP1 y CP2), con ello el análisis logró parsimonia y efectividad al aplicar el AMMI (Zobel *et al.*, 1988).

El Cuadro 3 muestra los rendimientos promedio para las cruzas en cada ambiente, las medias genotípicas promediadas por fila variaron desde 47.31 hasta 108.27 g por planta, lo cual fue indicio de las diferencias que existieron en el comportamiento de cada cruzamiento.

Las medias ambientales promediadas por columna variaron de 51.86 a 111.01 g por planta, esto evidenció que en el promedio de rendimiento del total de cruzamientos por año también hubo marcadas diferencias. Los valores de CP1 variaron de -0.52 a 1.00 para los genotipos y de -0.63 a 1.00 para los ambientes; en el CP2 los valores para genotipos fueron de -0.60 a 0.30 y para ambientes de -0.50 a 0.59. La crusa A1 × A2 presentó los valores absolutos más bajos de CP1 y A2 × A4 los valores absolutos más bajos de CP2.

Los gráficos biplot (Figuras 1 y 2) proporcionaron una mejor visión de los resultados del análisis AMMI; por lo tanto, facilitan su interpretación. Un primer acercamiento

Cuadro 2. Análisis AMMI para rendimiento de 24 cruzas simples dialélicas de líneas de maíz de alta y baja ACG evaluadas en tres ambientes (años 2011, 2012 y 2013).

Fuente de variación	GL	SC	CM	% SC
Repeticiones	2	2162.79	1081.40 *	0.76 †
Ambientes	2	150,029.35	75,014.68**	52.87 †
Genotipos	23	61,102.60	2656.63**	21.53 †
Genotipos × ambientes	46	34,870.98	758.06**	12.29†
	CP1	24	30,206.72	1258.61**
	CP2	22	4664.26	212.01 ns
Error	142	35,580.91	250.57	13.38††
Total	215	283,746.63		
Coeficiente de variación (%)	21.39			
Rendimiento medio (g por planta)	73.97			

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; % SC: porcentaje de suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2; †Proporción con respecto a la SC del total; ††Proporción con respecto a la SC de la interacción genotipo × ambiente; *: P ≤ 0.05; **: P ≤ 0.01; ns: no significativo.

a la clasificación de la IGA con base en AMMI1 permitió la visión simultánea del rendimiento medio y la estabilidad de los genotipos en términos del CP1 (Yang *et al.*, 2009; Zobel *et al.*, 1988), el gráfico de dos dimensiones (Figura 1) presenta el efecto de interacción (estabilidad) (primer eje de componentes principales) en la ordenada y los efectos principales (medias del rendimiento de genotipos y ambientes) en la abscisa.

Así mismo, en el eje vertical se encuentran las diferencias de interacción y sobre el eje horizontal las diferencias de los efectos principales (rendimiento) ya sean éstas, entre genotipos o entre ambientes; por ejemplo, las cruzas A1 × A3 y A3 × B3 no difieren en interacción debido a que tienen valores similares sobre el CP1, pero difieren en efectos principales a causa de los valores de rendimiento que tuvieron. Contrariamente, las cruzas A3 × B1 y A4 × B2 difieren en interacción y no en efectos principales. Otro caso son A3 × B4 y B2 × B4 que difieren tanto en interacción como en efectos principales, y son las cruzas que más interactúan con el ambiente. En cuanto a las diferencias entre ambientes, se presenta variabilidad entre años, tanto en efectos principales como en los de interacción.

En general, los individuos ubicados en el mismo cuadrante que el ambiente interactúan de forma positiva con éste; así, las cruzas que presentaron el mayor rendimiento promedio A3 × B3, A2 × B4 y A3 × B4 con 108.27, 104.71 y 102.81 g por planta, respectivamente, se adaptaron al mejor sitio productivo que fue el ciclo agrícola de 2012 en Montecillo; en este ambiente se alcanzaron los rendimientos más altos, y es la localidad donde las líneas

y las cruzas simples fueron obtenidas, por lo que los materiales están más adaptados a las condiciones ambientales prevalecientes en el lugar. Mientras tanto, la crusa A1 × A4 tuvo el menor rendimiento (47.31 g por planta) y se adaptó a los sitios menos productivos que fueron los ciclos 2011 y 2013, donde el rendimiento decayó debido a que en ambos hubo condiciones ambientales adversas.

En el ciclo de 2011 no se observó un buen resultado pese a que tuvo la misma localidad de 2012 (Montecillo), esto porque las condiciones ambientales típicas del lugar fueron alteradas con la incidencia de una helada temprana que estresó a los genotipos y afectó sobre todo a los más tardíos (cruzas de Alta × Alta y algunas cruzas de Baja × Baja ACG), pues los granos de la mazorca se chuparon y perdieron peso, al no haber acumulación de biomasa por la interrupción del llenado de grano, lo cual se manifestó en un rendimiento bajo. En cambio, en 2012 las condiciones fueron normales en la localidad y no hubo factores severos para los materiales, consecuentemente, las cruzas rindieron más y pudieron expresar mejor su potencial de rendimiento.

Las diferencias en el comportamiento del rendimiento de las cruzas entre los ciclos 2012 y 2013, se atribuyeron al distinto año de evaluación y al cambio de localidad, pues en el primero éstas fueron evaluadas en Montecillo, y en el segundo en Santa Lucía, y se da por hecho que las condiciones ambientales fueron diferentes en cuanto a tipo de suelo, humedad, precipitación, plagas y enfermedades presentes entre los sitios, aun cuando la distancia física entre ambas localidades es apenas de 3 km.

Cuadro 3. Rendimiento promedio (g por planta) de 24 cruzas simples dialélicas de líneas de maíz de alta y baja ACG evaluadas en tres ambientes (años 2011, 2012, 2013), y valores de los dos primeros componentes principales para genotipos y ambientes.

Genotipo	Ambientes			Media (g por planta)	CP1	CP2
	2011	2012	2013			
A1 × A2	43.66	100.34	40.54	61.52	0.03	-0.08
A1 × A3	51.02	123.30	43.43	72.58	0.26	-0.05
A1 × A4	40.81	77.08	24.04	47.31	-0.12	0.20
A1 × B1	51.92	110.22	32.85	65.00	0.17	0.17
A1 × B2	36.59	76.58	37.50	50.22	-0.21	-0.09
A1 × B3	73.50	92.96	55.61	74.02	-0.32	0.27
A1 × B4	74.62	99.51	54.01	76.05	-0.23	0.29
A2 × A4	49.47	98.92	42.95	63.78	-0.04	0.00
A2 × B4	73.10	140.55	100.48	104.71	-0.08	-0.60
A3 × B2	63.23	121.08	46.31	76.88	0.15	0.14
A3 × A4	64.99	134.31	35.58	78.29	0.39	0.30
A3 × B1	45.86	129.45	40.38	71.90	0.38	-0.12
A3 × B3	88.69	159.99	76.12	108.27	0.29	0.03
A3 × B4	66.77	191.99	49.68	102.81	1.00	-0.06
A4 × B1	47.15	89.45	45.35	60.65	-0.16	-0.06
A4 × B2	66.76	93.83	53.37	71.32	-0.26	0.17
A4 × B3	84.37	122.26	68.27	91.64	-0.11	0.18
A4 × B4	79.03	120.56	87.82	95.80	-0.26	-0.22
B1 × B2	47.85	77.51	48.72	58.03	-0.34	-0.06
B1 × B3	50.47	116.67	57.53	74.89	0.07	-0.27
B1 × B4	38.42	81.78	26.60	48.93	-0.07	0.10
B2 × B3	68.15	107.05	73.88	83.03	-0.27	-0.17
B2 × B4	52.95	69.39	54.65	59.00	-0.52	-0.04
B3 × B4	57.71	129.55	49.04	78.77	0.26	-0.03
Media (g por planta)	59.05	111.01	51.86			
CP1	-0.37	1.00	-0.63			
CP2	0.59	-0.09	-0.50			

Los resultados expuestos concuerdan con lo expuesto por Kang (1993), al señalar que los genotipos evaluados en diferentes localidades o años frecuentemente tienen fluctuaciones en rendimiento debido a la respuesta del genotipo a efectos de factores ambientales, tales como fertilidad del suelo o la presencia de estreses ambientales bióticos y abióticos. Es en este punto que se evidencia la importancia de evaluar suficientemente los materiales en sitios y años.

No obstante la variabilidad ambiental presente durante la evaluación, de acuerdo con el modelo AMMI1 (Figura 1) las cruzas de alta ACG, A1 × A2 y A2 × A4, que presentaron

un valor en CP1 cercano a cero, tuvieron pequeños efectos de interacción, según lo indicado por Zobel *et al.* (1988), con lo cual contribuyeron en menor grado a la IGA y por lo tanto fueron consideradas como las más estables; sin embargo, esta condición no fue la misma para todas las cruzas de dicho tipo, hubo cruzas de Alta × Baja y Baja × Baja ACG que tuvieron mejor o igual nivel de estabilidad que algunas cruzas de Alta × Alta ACG. En cuanto a los ambientes de evaluación, el 2011 presentó la menor IGA. Contrariamente, los genotipos y ambientes que tuvieron valores altos positivos o negativos del CP1 presentaron alta IGA, fue así como la crusa A3 × B4 y el ciclo de

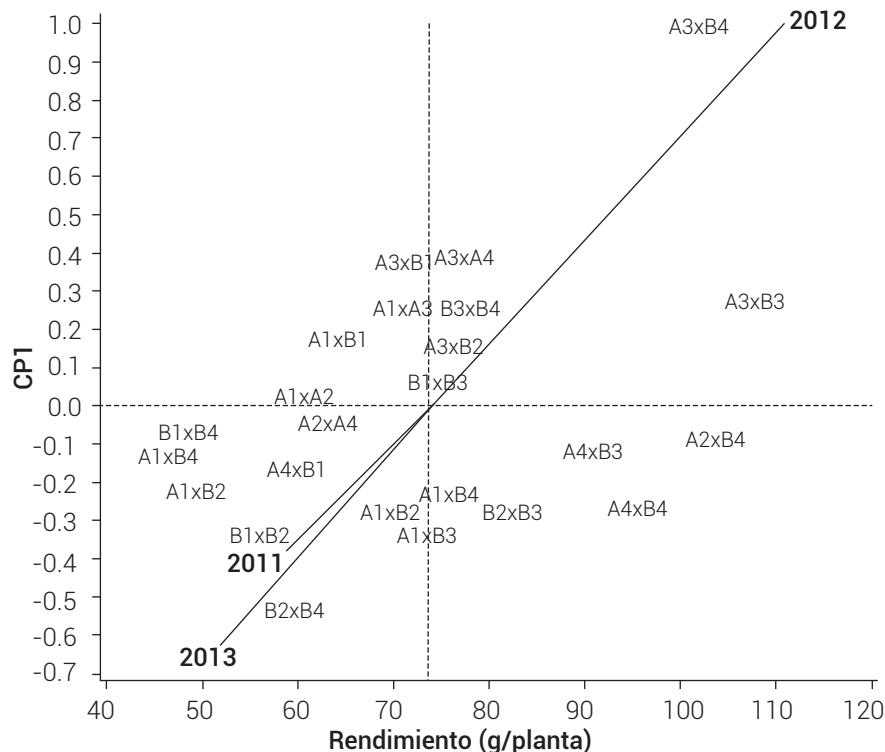


Figura 1. Gráfico biplot del CP1 en función del rendimiento promedio (g por planta) de 24 cruzas simples dialélicas de líneas de maíz de alta y baja ACG evaluadas en tres ambientes (años 2011, 2012 y 2013).

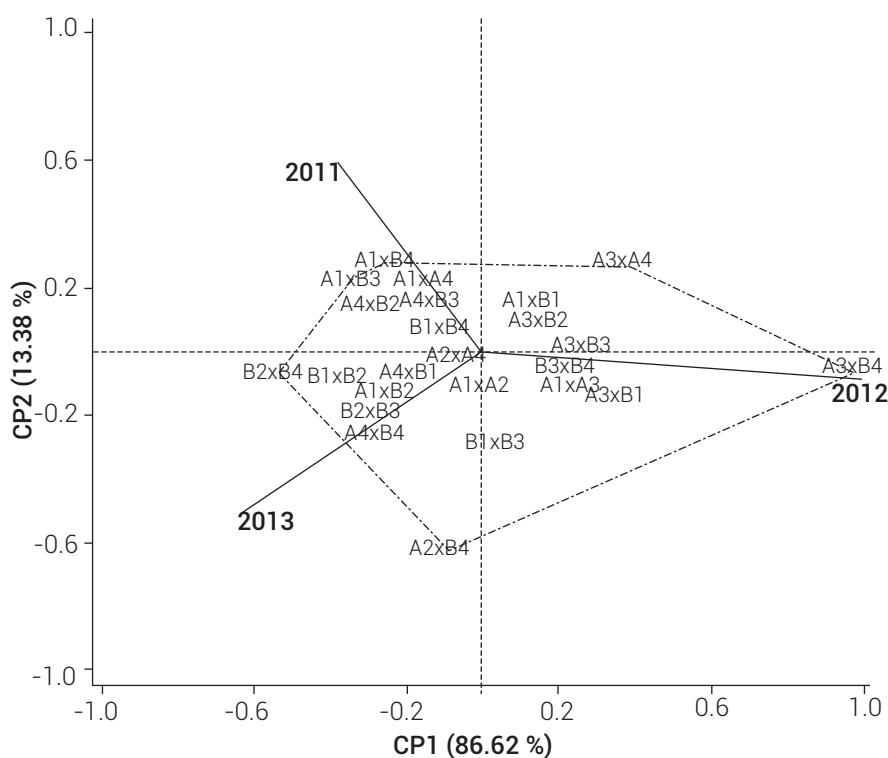


Figura 2. Gráfico biplot del CP1 vs. CP2 que muestra la IGA de 24 cruzas simples dialélicas de líneas de maíz de alta y baja ACG evaluadas en tres ambientes (años 2011, 2012 y 2013).

evaluación 2012 contribuyeron en mayor grado a la interacción genotipo por ambiente para el rendimiento de las cruzas simples.

En adición a lo anterior, al profundizar el análisis de estabilidad con base en el AMMI2, que maximiza la variación entre los genotipos, se incrementó la precisión en la clasificación de la IGA; además, fue posible asociar genotipos con ambientes particulares para reconocer la adaptación o adaptabilidad de las cruzas (Figura 2).

Mediante un biplot aumentado (Gauch, 2006; Gauch *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2000) de un polígono formado con los genotipos vértice (genotipos más alejados del origen del biplot) se identificó que las cruzas de mayor respuesta a los ambientes fueron A3 × A4, A3 × B4, A2 × B4, B2 × B4, A1 × B3, A1 × B4; en contraste, la crusa A2 × A4, que se encontró dentro del polígono y más cercana al origen del biplot, expresó la máxima estabilidad a través de ambientes, lo cual puede ser atribuido a que dicho genotipo es una combinación donde interviniéron dos líneas de alta ACG provenientes de compuestos divergentes, y una de ellas altamente endogámica (S_{11}). Con estos resultados, es posible inferir que la crusa de Alta × Alta puede ser estable debido a que al explotar principalmente efectos aditivos, los cuales son heredables, éstos se conservan a través de ambientes, y proporcionan estabilidad al genotipo. Al respecto, Castañón *et al.* (2000) confirmaron que la estabilidad es heredable.

Lo anterior sugiere que el material más apto para producir a través de ambientes diversos es la crusa simple que contenga ambas líneas altamente endogámicas y de Alta ACG; sin embargo, es necesario considerar que la crusa encontrada con mayor estabilidad no presentó el mejor rendimiento a través de ambientes e incluso estuvo por abajo de la media (Figuras 1 y 2). Ante esta situación, Yan *et al.* (2000; 2001) plantearon que los híbridos estables con alto rendimiento se localizan en los ambientes que poseen grandes efectos del CP1 y efectos del CP2 cercanos a cero; de esta manera, al ambiente 2012 se le identificó con tales características y a la crusa A3 × B3 como el híbrido estable con alto potencial de rendimiento a través de ambientes, ya que posee los menores efectos del CP2 y efectos del CP1 aceptables para un buen rendimiento.

Contrario a este último resultado, los híbridos que se localizan en ambientes con grandes efectos del CP2 carecen de estabilidad, pero son los que se consideran altamente específicos para tal ambiente (Yan *et al.*, 2001), lo cual representa una ventaja en la identificación de adaptación y adaptabilidad de las cruzas. Para determinar la respuesta genotípica a un ambiente específico, Yang *et al.* (2009) mencionan que se considera el ángulo entre el vector del

genotipo y el vector del ambiente, un ángulo menor de 90° o mayor de 270° indica que el genotipo tiene una respuesta positiva al ambiente y una respuesta negativa es indicada si el ángulo está entre 90° y 270°. No obstante, Yan *et al.* (2007) mencionan que al ser la IGA un componente de la adaptación específica, un genotipo que interactúa positivamente con un ambiente puede tener el rendimiento más bajo en ese ambiente. De ahí la importancia de los conceptos de adaptación y adaptabilidad señalados por Allard y Hansche (1964) y Gordón-Mendoza *et al.* (2006).

De acuerdo con los planteamientos anteriores, la Figura 2 muestra que las cruzas A1 × A4, A4 × B3 y B1 × B4 tuvieron una respuesta positiva al ambiente 2011, lo cual fue una clara manifestación de adaptación al sitio de origen, pero únicamente A4 × B3 mostró adaptabilidad al presentar la mejor respuesta al efecto de helada y lograr un rendimiento por encima de la media (Figura 1). En el 2012, las cruzas con respuesta positiva fueron A3 × B4, A3 × B3 y B3 × B4, por lo que son materiales muy bien adaptados a las condiciones ambientales típicas de la localidad, y al tener esta ventaja, tuvieron rendimientos por encima de la media y expresaron su adaptabilidad. En el año 2013, A2 × A4, A4 × B4 y B2 × B3 fueron las cruzas con respuesta positiva, pero solamente las dos últimas expresaron adaptabilidad porque, a pesar del cambio de sitio de cultivo, presentaron rendimientos por arriba de la media. Estos resultados demostraron que tanto la adaptación como la adaptabilidad de la crusa tienen un papel crucial en su desempeño para rendimiento.

Al comparar las cruzas simples con los testigos, se encontraron combinaciones que tuvieron la capacidad de igualar en rendimiento a los híbridos comerciales bajo las mismas condiciones para su desarrollo en campo (Cuadro 4). En el ambiente de evaluación 2012, el híbrido trilineal HS2 y tres cruzas simples de Alta × Baja y una de Alta × Alta ACG tuvieron el promedio de rendimiento más alto, sin diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$). Para el ambiente 2013, los cuatro híbridos comerciales utilizados y tres cruzas simples de Alta × Baja ACG tuvieron los mejores promedios en rendimiento, sin diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$).

De las 24 cruzas simples evaluadas en 2012, cuatro (A3 × B4, A3 × B3, A2 × B4, A3 × A4) resultaron híbridos promisorios al manifestar su adaptación y adaptabilidad al sitio de origen Montecillo, pero cuando se cambiaron a Santa Lucía en 2013, sólo las cruzas de Alta × Baja ACG se mantuvieron bajo los dos conceptos, al mostrar la alta capacidad de respuesta de esta clase de genotipo al ambiente, la cual puede ser atribuida a la explotación de efectos aditivos y no aditivos (de dominancia y epistasis) en este tipo de cruzas. Tales resultados indicaron que el material apto

Cuadro 4. Comparación de medias para rendimiento de mazorca (g por planta) de los mejores híbridos de maíz evaluados en Montecillo, 2012 y Santa Lucía de Prías, 2013.

Genotipo	Año 2012		Genotipo	Año 2013	
	Rendimiento (g por planta)	Rendimiento (t ha ⁻¹)		Rendimiento (g por planta)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
HS2	201.64 a	10.92	HS2	116.35 a	6.30
A3 × B4	191.99 ab	10.40	Búho	102.56 ab	5.56
A3 × B3	159.99 a...c	8.67	A2 × B4	100.48 ab	5.44
A2 × B4	140.55 a...d	7.61	A4 × B4	87.82 a...c	4.76
A3 × A4	134.31 a...e	7.28	Promesa	80.45 a...d	4.36
	DSH = 68.05		San José	77.08 a...e	4.18
			A3 × B3	76.12 a...e	4.12
				DSH = 40.30	

Medias con letras iguales para cada ambiente, no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: diferencia significativa honesta.

para alcanzar alto rendimiento en un ambiente específico es el híbrido de crusa simple proveniente de líneas de alta × baja ACG.

Adicionalmente, la crusa A3 × B3, al presentarse como uno de los mejores híbridos en 2012 y mantenerse así en 2013, apoyó lo estipulado por Yan et al. (2000; 2001) para clasificar a dicha crusa como híbrido estable con alto potencial de rendimiento a través de ambientes.

CONCLUSIONES

Las cruzas simples de alta × baja ACG resultaron más rendidoras que las de alta × alta y baja × baja. Las cruzas simples de alta × alta ACG mostraron la mayor estabilidad debido a la alta ACG de ambas líneas y a un alto grado de endogamia, que permitieron que dichos genotipos conservaran los efectos aditivos a través de ambientes, pero con rendimiento por abajo de la media. Las respuestas que manifestaron las cruzas simples a un ambiente específico demostraron que además de la ACG de las líneas progenitoras, la adaptación y adaptabilidad de la crusa juegan un papel crucial en la expresión de su rendimiento. Las cruzas simples de alta × baja ACG mostraron ser la clase de genotipo apto para alcanzar alto rendimiento en un ambiente específico, pero también el tipo de material potencialmente estable y con alto rendimiento a través de ambientes, como lo manifestó la crusa A3 × B3.

BIBLIOGRAFÍA

- Allard R. W. and P. E. Hansche (1964) Some parameters of population variability and their implications in plant breeding. *Advances in Agronomy* 16:281-325, [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60027-9).
- Becker H. C. (1981) Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30:835-840, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00038812>.
- Castañón G., R. Zetina, R. Arano y B. Raygoza (2000) El AMMI y cluster en la selección de los mejores híbridos experimentales de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 11:71-76.
- Escorcia-Gutiérrez N., J. D. Molina-Galán, F. Castillo-González y J. A. Mejía-Contreras (2010) Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruzas simples de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:271-279.
- Falconer D. S. y T. F. C. Mackay (2006) Introducción a la Genética Cuantitativa. 4^a edición. Editorial Acribia, S. A. Zaragoza, España. 469 p.
- Gauch Jr. H. G. (1988) Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44:705-715, <http://dx.doi.org/10.2307/2531585>.
- Gauch Jr. H. G. (2006) Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science* 46:1488-1500, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193>.
- Gauch Jr. H. G., H. P. Piepho and P. Annicchiarico (2008) Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. *Crop Science* 48:866-889, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513>.
- Gollub H. F. (1968) A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika* 33:73-115, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02289676>.
- Gordón-Mendoza R., I. Camargo-Buitrago, J. Franco-Barrera y A. González-Saavedra (2006) Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17:189-199, <http://dx.doi.org/10.15517/am.v17i2.5159>.
- Johnson I. J. and H. K. Hayes (1940) The value in hybrid combinations of inbred lines of corn selected from single crosses by the pedigree method of breeding. *Journal of the American Society of Agronomy* 32:479-485, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1940.0021962003200070001x>.
- Kang M. S. (1993) Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. *Agronomy Journal* 85:754-757, doi:10.2134/agronj1993.0002196200850030042x.
- Kempton R. A. (1984) The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *The Journal of Agricultural Science* 103:123-135, <https://doi.org/10.1017/S0021859600043392>.
- Lobato-Ortíz R., J. D. Molina-Galán, J. J. López-Reynoso, J. A. Mejía-Contreras y D. Reyes-López (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.
- Márquez S. F. (1988) Genotecnología Vegetal. Métodos, Teoría, Resultados. Tomo II. AGT Editor S. A. México, D. F. 665 p.
- Molina G. J. D. (1992) Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa (Algunas Implicaciones en Genotecnología). AGT Editor S. A. México D. F. 349 p.

- Oyekunle M., B. Badu-Apraku, S. Hearne and J. Franco (2015) Genetic diversity of tropical early-maturing maize inbreds and their performance in hybrid combinations under drought and optimum growing conditions. *Field Crops Research* 170:55-65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.005>.
- Pérez-López F. J., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, J. D. Molina-Gálán, J. J. López-Reynoso y T. Cervantes-Santana (2014) Líneas homocigóticas de maíz de alto rendimiento como progenitoras de híbridos de crusa simple. *Agrociencia* 48:425-437.
- SAS Institute (2002) User's Guide of SAS. SAS Institute Inc. Cary, N. C. USA. 550 p.
- Sprague G. F. and L. A. Tatum (1942) General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of the American Society of Agronomy* 34:923-932, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1942.0021962003400100008x>.
- Yan W., L. A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavnics (2000) Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science* 40:597-605, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>.
- Yan W., P. L. Cornelius, J. Crossa and L. A. Hunt (2001) Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science* 41:656-663, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2001.413656x>.
- Yan W., M. S. Kang, B. Ma, S. Woods and P. L. Cornelius (2007) GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science* 47:641-653, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>.
- Yang R. C., J. Crossa, P. L. Cornelius and J. Burgueño (2009) Biplot analysis of genotype × environment interaction: proceed with caution. *Crop Science* 49:1564-1576, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2008.11.0665>.
- Zobel R. W., M. J. Wright and H. G. Gauch Jr. (1988) Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80:388-393, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>.