

Aptitud combinatoria y heterosis en cruza experimentales de sorgo para grano

Combining ability and heterosis in grain sorghum experimental crosses

Nury Deyanira Gutiérrez-Palacios¹, José Espinoza-Velázquez²,
Armando Rodríguez-García³, Luis Ángel Muñoz-Romero³, Alfonso López-Benítez³

¹Egresada del programa de maestría en Ciencias en Fitomejoramiento, ²Instituto Mexicano del Maíz Email: jespvel839@gmail.com
[*Autor responsable], ³Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro,
Calzada Antonio Narro 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. CP 25315. Tel.: (844) 411 0221..

RESUMEN

México es uno de los principales productores de sorgo en el mundo, y durante 32 años hasta 2012, uno de los mayores importadores. En esta situación de cambio es importante contar con germoplasma fundación que permita la derivación de líneas complementarias y la generación de híbridos competitivos que contribuyan a la reducción de importaciones del grano. En este trabajo se manejaron líneas con potencial para generar híbridos simples, de las cuales se estimó su valor de aptitud combinatoria y heterosis en rendimiento de grano (RTO), además de otras características agronómicas. En 2013 se realizaron los cruzamientos con el diseño II de Carolina del Norte (7 x 7 líneas). Durante P/V de 2014 se establecieron ensayos de rendimiento en Río Bravo, Tamaulipas, y en Buenavista, Saltillo, en los que se incluyeron híbridos y progenitores. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. El análisis genético permitió estimar ACG y ACE. Los progenitores machos M7 (0.54 t ha⁻¹) y M4 (0.52 t ha⁻¹), y las hembras H1 (0.29 t ha⁻¹) y H2 (0.25 t ha⁻¹) tuvieron los mayores efectos de ACG y los más altos RTO, número de granos por panoja (NGP) y peso de 1000 granos (PMG). El NGP contribuyó al alto RTO de machos, y PMG al RTO de las mejores hembras. Las cruza que presentaron efectos positivos y altos de ACE para RTO y sus componentes fueron: A92 x 124-2; A98 x Pan 37; A96 x 124-2; A626 x Pan 37; y A68 x 124-2, que también mostraron alta heterosis: 117.07, 147.79, 93.53, 97.93 y 117.54%, y fueron superiores en RTO. Estos resultados confirman que la presencia de genes con acción aditiva y de dominancia es aprovechable para generar buenas combinaciones híbridas, y seleccionar las mejores para posibles aplicaciones comerciales.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, líneas endogámicas, aptitud combinatoria, heterosis, componentes del rendimiento

ABSTRACT

Mexico is among the main worldwide sorghum grain producers, and one of the bigger importers for a period of 32 years ending up to 2012. In those changing situations, it is worth to count on foundation germplasm from where we can develop complementary inbred lines and then produce competitive hybrids that help in reducing the grain imports. In this research work, combining abilities estimates and heterosis percentages for yield (RTO) and other agronomic variables were derived for inbred lines and crosses. During 2013, 7x7 line crosses following the North Carolina II design were accomplished. The yield performance assays were developed during S-S / 2014 in locations Rio Bravo, Tamaulipas, and Buenavista, Saltillo, Mexico, including parental lines, crosses and witnesses. The experimental design was a complete randomized block design using three replicates. The genetic analysis leads to estimate the GCA and SCA. The male parental lines M7 (0.54 t ha⁻¹) and M4 (0.52 t ha⁻¹) and the females H1 (0.29 t ha⁻¹) and H2 (0.25 t ha⁻¹) had the higher GCA effects and the highest RTO, grain panicle number (NGP), and 1000 grain weight (PMG). The NGP favored high RTO in these male parents, and PMG did so in the female parents. The crosses that showed high and positive SCA effects for RTO and its components were (A92 x 124-2, A98 x Pan 37, A96 x 124-2, A626 x Pan 37 and A68 x 124-2) which also showed high heterosis (117.07, 147.79, 93.53, 97.93 and 117.54 %) and were superior in RTO. These results validated that knowledge about the additive action genes and dominant effects are reliable to produce good hybrids and select the best to possible commercial applications.

Key words: *Sorghum bicolor*, inbred lines, combining ability, heterosis, yield components

INTRODUCCIÓN

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L) Moench] es el quinto cereal más importante del mundo, después del trigo, maíz, arroz y cebada, y es ampliamente cultivado en zonas tropicales semiáridas de África, Asia y América Latina (Reddy *et al.*, 2011). En el concierto mundial, México es uno de los grandes productores y consumidores de sorgo para grano. Según datos publicados por FIRA (2015) del 2005 al 2014, el promedio de superficie sembrada en millones de hectáreas fue de 1.94 ± 0.08 , y la superficie cosechada de 1.75 ± 0.12 . El consumo promedio nacional, en millones de toneladas, fue de 8.36 ± 0.77 , mientras que la producción promedio para el mismo periodo fue de 6.67 ± 0.9 , lo que resulta claramente deficitario.

Durante un tiempo, la diferencia consumo-producción fue subsanada con importaciones, las cuales alcanzaron un promedio en millones de toneladas de 2.08, en el periodo de 2005 a 2012. Para 2013 y 2014, incluso 2015, se equilibró la producción con la demanda, ya que en estos años las importaciones fueron menores a 165 mil toneladas (SIAP, 2013; FIRA, 2015). Esta situación de grandes cambios puede considerarse como un nicho de oportunidad para proponer alternativas varietales que contribuyan a apuntalar la producción nacional, de tal manera que se reduzca aún más la importación de este cereal.

El sorgo se ha convertido en un cultivo fuente de materia prima para la industria pecuaria de alimentos balanceados, lo cual, a su vez, permite que en el mercado alimentario se disponga de proteínas de origen animal para consumo humano (Hernández *et al.*, 2011).

Por otra parte, el mejoramiento genético es un proceso continuo en la formación de variedades e híbridos, por lo que la determinación de los diversos tipos de acción génica es básica para la ejecución de planes de mejoramiento que permitan avances rápidos, en un programa destinado para la obtención de híbridos (Wong *et al.*, 2007).

La estimación de parámetros genéticos se puede lograr con diseños de apareamientos genéticos, tales como los diseños dialélicos y el diseño II de Carolina del Norte (Sprague y Tatum, 1942; Comstock *et al.*, 1949). En este último se utilizan dos conjuntos de líneas: el primero funciona como macho, el segundo como hembra. Este diseño se ha utilizado por un grupo numeroso de investigadores, entre ellos Wong *et al.* (2007), Tadesse *et al.* (2008), Makanda *et al.*

(2010), Guerrero-Guerrero *et al.* (2011), Palemón *et al.* (2012) y Luna-Ortega *et al.* (2013).

El conocimiento de la aptitud combinatoria de progenitores y de la herencia de caracteres es importante en programas de mejoramiento orientados al desarrollo de híbridos (Makanda *et al.*, 2010). Los conceptos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), tal como fueron definidos por Sprague y Tatum (1942) son ampliamente utilizados para seleccionar progenitores e híbridos de sorgo (Zewdie *et al.*, 2000; Poehlman, 2005; Pech *et al.*, 2010).

La heterosis proporciona información importante para mejorar el rendimiento y otras características de importancia agronómica en sorgo. Este parámetro puede variar desde significativamente positivo hasta negativo, de acuerdo con la constitución genética de los padres, como lo ilustran Orozco y Mendoza (1983), quienes reportaron heterosis en rendimiento de grano en sorgo en el rango de -24 a 176%; Osuna *et al.* (2001) de 26 a 173%; Cisneros-López *et al.* (2007) de 35%, y León-Velasco *et al.* (2009) en 47%.

Para obtener híbridos de sorgo se requieren dos conjuntos de líneas: uno de hembras con androesterilidad, y otro de machos androfértiles, capaces de restaurar la producción de polen en la progenie resultante. Esto es de suma importancia, dada la especial estructura de los órganos reproductivos de la especie. En este contexto, el presente estudio se enfocó en la evaluación de aptitud combinatoria y heterosis en cruza experimental de sorgo para grano, de probable utilización en siembras comerciales en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético que se utilizó se compone de 49 cruza, generadas en el ciclo P/V 2013, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, por medio de cruza entre siete hembras androestériles (A) y siete machos restauradores de la fertilidad (R), pertenecientes al programa de sorgo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN); también se incluyeron 14 progenitores, dos híbridos comerciales generados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y un híbrido comercial de una compañía internacional productora de grano. Las cruza se generaron siguiendo el Diseño II de Carolina del Norte (Comstock *et al.*, 1949).

Los ensayos de rendimiento se realizaron en dos localidades: Campo Experimental del INIFAP

en Río Bravo, Tamaulipas (25° 59' N y 98° 06' O. 139 msnm, temperatura media anual de 23.5° C, y 780 mm de precipitación anual, clima muy cálido) (www.inegi.org.mx), y en Buenavista, Saltillo, Coahuila (25° 22' N y 101° 02' O, 1742 msnm, temperatura media anual de 19.8° C y de 350-400 mm de precipitación anual, clima semicálido) (<http://www.uaaan.mx>).

El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones. La parcela fue de un surco de 5 metros de largo, con una distancia entre surcos de 0.80 m. La siembra en Río Bravo se efectuó el 5 de marzo de 2014, y en Buenavista el 25 de abril del mismo año. Se raleó 20 días después de la emergencia a 12 plantas por metro lineal (250 mil plantas ha⁻¹). La fertilización a la siembra fue de 133 unidades de N y 90 unidades de P ha⁻¹; la segunda y última fertilización se aplicó 45 días después de la siembra con 60 unidades de N ha⁻¹. El manejo del cultivo fue de acuerdo con las recomendaciones de INIFAP-Río Bravo. La cosecha se efectuó diez días después de la madurez fisiológica. Cada parcela se desgranó y pesó, y posteriormente se le determinó la humedad de grano. Variables de respuesta: días a floración (DF), altura de planta (AP), peso de mil granos (PMG), número de granos por panoja (NGP) y rendimiento de grano (RTO) en t ha⁻¹.

El análisis de varianza (ANVA) se realizó con el paquete estadístico SAS, 2001. La comparación de medias fue con Tukey ($p < 0.05$).

El análisis genético se realizó con el diseño de apareamiento Genético Carolina del Norte II (Comstock *et al.*, 1949) con efectos fijos, cuyo modelo lineal es:

$$Y_{ijk} = \mu + M_i + H_j + \Phi_{ij} + E_{ijk}$$

Donde: $i = 1, 2, \dots, m$ (machos)

$j = 1, 2, \dots, h$ (hembras)

$k = 1, 2, \dots, r$ (repeticiones)

Y_{ijk} = observación de la craza entre el i -ésimo macho, la j -ésima hembra, en la k -ésima repetición

μ = Media general

M_i y H_j = Efecto del i -ésimo macho y j -ésima hembra

Φ_{ij} = Efecto de la interacción del i -ésimo macho y la j -ésima hembra

E_{ijk} = Error experimental

La estimación de los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para los machos y hembras, y la aptitud combinatoria específica (ACE) para las cruzas, se realizó según la propuesta de (Sprague y

Tatum, 1942), donde:

$$g_i = \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..} \quad g_j = \bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..} \quad S_{ij} = Y_{ij} - g_i - g_j - \bar{Y}_{..}$$

Para heterosis, se usó la fórmula:

$$H = (MF_1 - MP / MP) \times 100;$$

donde:

MF_1 = valor promedio del carácter evaluado en el híbrido

MP = valor del promedio de progenitores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis combinado para los atributos agronómicos de progenitores permitió identificar a los tres superiores de macho (M) y de hembra (H) en cada grupo: M7, M4 y M5 y H2, H1 y H4 (Cuadro 1), de los cuales el volumen de producción de H son cercanos al de M. El RTO en las mejores H fue más homogéneo que en M, lo que probablemente se deba a que las primeras tienen el mismo origen y, por lo tanto, menor variación, lo que sugiere que las combinaciones de los M son las que influyen en el comportamiento de las cruzas.

De los componentes del rendimiento, NGP contribuyó a incrementar el RTO, dato coincidente con el publicado por Peña-Ramos *et al.* (2004). Los machos rendidores: M4 y M5 obtuvieron los mayores valores de NGP, pero ligeramente inferiores en PMG (Cuadro 1). El macho M7 presentó el mayor PMG y el mayor NGP, lo que sugiere que ambos componentes contribuyeron simultáneamente al RTO en este progenitor, lo cual concuerda con lo reportado por Wong *et al.* (2007) y Borrás y Otegui (2001) para maíz.

En el caso de progenitores H, parece ser que el PMG contribuye a incrementar el RTO, ya que H2, H1 y H4, que sobresalen en RTO, también sobresalen con mayor PMG. Estos resultados coinciden a lo reportado por Wong *et al.* (2007) en cruzas de maíz, en las que la expresión del alto RTO la aportó el M con el mayor número de granos por mazorca (equivalente a NGP), y por la H con el mayor peso de mil granos (equivalente a PMG).

Para días a floración (DF), los machos que sobresalieron en RTO fueron más precoces, a excepción del M7 (2 a 3 días más tardío); algo similar sucedió en las hembras rendidoras. Al respecto, debe considerarse que el promedio de DF se incrementó debido a las condiciones climáticas desfavorables en la localidad de Buenavista, que atrasaron el inicio de floración.

Respecto a la variable AP, el macho M7 presentó AP desfavorable para realizar cosecha mecanizada (221.2 cm). En el Cuadro 1 se observa que los progenitores M y H expresaron un comportamiento diferencial en la mayoría de las variables, tal vez como resultado de la divergencia genética entre el material, además de las diferencias en ambientes de producción entre las localidades de estudio (Gómez *et al.*, 1988).

El rendimiento promedio de grano que se obtuvo en las localidades (2.81 t ha⁻¹) (Cuadro 2), fue superior al encontrado en otras evaluaciones de sorgo para grano (Makanda *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2011); e inferior (Geremew *et al.*, 2004; De Almeida *et al.*, 2013).

En los análisis por localidad, la de Río Bravo tuvo un RTO de 3.61 t ha⁻¹, mientras que el de Buenavista fue de 1.97 t ha⁻¹ (Cuadro 2). El bajo RTO de la segunda localidad se atribuye a condiciones desfavorables de temperaturas que afectaron el desempeño de los genotipos. Las cinco cruzas más rendidoras en el combinado: A92 x 124-2; A98 x Pan 37; A98 x 124-2; A92 x Pan 37; y A96 x 124-2, tuvieron buen desempeño en ambas localidades, lo que indica consistencia en las cruzas, excepto en la segunda.

En el análisis combinado, diez cruzas superaron al mejor testigo (83 G19 de la compañía Pioneer Hi-Breed) en un rango de 26 a 3%. El mayor potencial de RTO lo obtuvo A92 x 124-2, sin diferencias estadísticas con A98 x Pan 37 y A98 x 124-2 (Cuadro 2). Las

Cuadro 1. Rendimiento y características agronómicas de líneas machos y hembras en promedio de cruzas. Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

Código	Línea	RTO (t ha ⁻¹)	NGP	PMG (g)	DF (50%)	AP (cm)
M1	14 – 3	3.12 ab	1939.9 bc	23.1 cd	86.69 a	123.81 ab
M2	12 A	2.63 bc	1335.6 d	24.5 bc	87.36 ab	130.40 b
M3	106-2	2.49 c	1761.2 c	21.9 d	90.12 c	130.35 b
M4	124-2	3.53 a	2160.4 ab	26.2 b	86.33 a	148.44 c
M5	IA 28	3.16 ab	2129.3 b	22.5 d	87.07 a	122.49 a
M6	21-1	2.54 c	1641.1 cd	23.3 cd	89.02 bc	119.22 a
M7	Pan 37	3.60 a	2447.6 a	30.1 a	89.36 c	221.19 d
H1	B 92	3.26 a	1791.5 b	28.1 a	87.78 abc	138.51 a
H2	B 98	3.30 a	1944.4 ab	25.8 bc	86.07 a	146.46 cd
H3	B 96	2.99 ab	1827.4 b	24.1 cd	86.86 ab	141.90 abc
H4	B 16	3.06 ab	1708.8 b	26.1 b	86.21 a	139.19 ab
H5	B 68	2.94 ab	2187.4 a	22.6 d	88.98 c	147.32 d
H6	B 626	2.88 ab	1771.3 b	22.3 d	88.50 bc	140.76 abc
H7	B 625	2.63 b	2184.3 a	22.5 d	91.55 c	141.79 abc
DMS		0.54	312.6	1.78	1.78	7.5
0.05						

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹; NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50% de floración; AP = Altura de planta en cm.

tres cruzas mencionadas superaron en 26, 19 y 14% al testigo de Pioneer, respectivamente. De estos resultados se infiere que podrían seleccionarse cruzas que por sus características agronómicas deseables, puedan utilizarse en siembras comerciales.

Respecto a ACG, se observaron efectos significativos para NGP (M), PMG (M y H), DF (H) y AP (M) (Cuadro 3), lo que sugiere la importancia de genes con acción aditiva para mejorar estas características a través de la selección, de acuerdo con resultados de reportes previos (Kenga *et al.*, 2004; Tadesse *et al.*, 2008; Makanda *et al.*, 2010).

Para RTO no se observó ACG significativa, pero sí positiva para la mayoría de los M y para algunas de las H, lo que indica la poca importancia de genes con

efecto aditivo, y sugiere que una respuesta heterótica por hibridación puede ser importante (Peña-Ramos *et al.*, 2004).

Comparaciones individuales de ACG para RTO y NGP muestran que los M (M7, M4 y M5) presentaron los valores más altos y positivos (Cuadro 3), lo que indica, en forma general, que la ACG en NGP influye en el alto efecto de ACG del RTO en M. En H sobresalieron H2 y H1, en los que la ACG de PMG contribuyó al alto efecto de ACG de RTO.

Los resultados reflejan el verdadero valor genotípico de las líneas mencionadas, al ser estimados como efectos medios de una línea en una serie de cruzas, lo que muestra que, entre más alta sea la ACG de una línea, mayor es el desempeño pro-

Cuadro 2. Promedio de rendimiento [t ha⁻¹] de cruzas sobresalientes por localidad y a través de localidades. Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

Híbridos	Combinado	Híbridos	Tamaulipas	Híbridos	Buenavista
A92 x 124-2	4.45 a (26 %)	A92 x 124-2	5.80	A625 x Pan 37	4.23
A98 x Pan 37	4.20 ab (19 %)	A98 x IA28	5.58	A98 x Pan 37	4.01
A98 x 124-2	4.03 abc (14 %)	A98 x 14-3	5.31	A68 x Pan 37	3.81
A16 x Pan 37	4.0 abcd (13 %)	83 G19-Pionner	5.31	A626 x Pan 37	3.72
A92 x Pan 37	3.94 abcd (12 %)	A96 x 124-2	5.14	A16 x Pan 37	3.72
A96 x 124-2	3.89 abcde (10 %)	A16 x IA28	4.85	A92 x Pan 37	3.42
A626 x Pan 37	3.84 abcdef (9 %)	A626 x 12 A	4.84	A98 x 124-2	3.39
A68 x 124-2	3.72 abcdefg (5 %)	A92 x 12 A	4.77	A68 x 124-2	3.19
A98 x 14-3	3.70 abcdefg (5 %)	A96 x Pan 37	4.73	A92 x 124-2	3.10
A98 x IA 28	3.65 abcdefg (3 %)	A98 x 124-2	4.68	A96 x 124-2	2.64
83 G19 Pionner [T3]	3.53 abcdefgh	A16 x 14-3	4.63	A16 x 124-2	2.56
A16 x IA 28	3.39 abcdefghi	A68 x IA28	4.54	A626 x 124-2	2.48
A92 x 12 A	3.39 abcdefghi	A92 x Pan 37	4.46	A96 x IA28	2.38
Media	2.81		3.61		1.97
C.V (%)	28.6		27.9		25.9

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹; NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50% de floración; AP = Altura de planta en cm.

medio de sus híbridos, como lo menciona Belum *et al.* (2007). Esta observación indica la tendencia de progenitores a desarrollar híbridos superiores, como es el caso de H1, H2 y H4, que aparecieron 3, 4 y 2 veces en las cruzas, respectivamente. En el mismo sentido, los machos M4, M7 y M5 dieron excelentes combinaciones híbridas, ya que aparecieron 4 y 3 veces, respectivamente, entre los mejores híbridos. Es importante considerar para la formación de híbridos a aquellos progenitores que muestren ACG positiva y significativa, como propone Makanda *et al.* (2010), ya que se obtiene ganancia genética, con presencia suficiente de genes con acción aditiva.

En el Cuadro 4 se muestran las mejores doce cruzas con efectos de ACE altos y positivos para RTO, de entre las que destacan A92 x 124-2 con RTO más alto (4.45 t ha⁻¹) (Cuadro 2), donde ambos progenitores

tienen valores positivos de ACG, condición que por sí misma asegura alto RTO (Wong *et al.*, 2007; Guerrero-Guerrero *et al.*, 2011). También sobresalieron en ACE A98 x Pan 37 y A16 x Pan 37, ya que ocupan el segundo y cuarto lugar en RTO (Cuadro 2). Los padres de estas cruzas también poseen efecto positivo de ACG, lo cual sugiere combinaciones deseables.

En los tratamientos se presentaron casos donde uno de los progenitores mostró ACG negativa; sin embargo, sus cruzas reflejaron ACE positiva y alto RTO: A92 x 12 A, A96 x 124-2, A68 x 124-2 y A626 x Pan 37 (Cuadros 4 y 2). En resumen, cuando en cruzas específicas participan progenitores en los que al menos uno es ACG positiva, se pueden generar combinaciones exitosas; resultados semejantes encontraron Wong *et al.* (2007) y Guerrero-Guerrero *et al.* (2011); o casos donde los progenitores discrepan respecto a la

Cuadro 3. Valores estimados de ACG de líneas de sorgo machos y hembras. Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

Código	Línea	RTO (t ha ⁻¹)	NGP	PMG (g)	DF (50%)	AP (cm)
M1	14 – 3	0.11	23.5	-1.43	-1.30	-18.46*
M2	12 A	-0.38	-580.8*	-0.03	-0.63	-11.87
M3	106-2	-0.52	-155.2	-2.64	2.13	-11.92
M4	124-2	0.52	244	1.71	-1.66	6.17
M5	1A 28	0.15	212.9	-2.02	-0.92	-19.78*
M6	21-1	-0.47	-275.3	-1.17	1.03	-23.05*
M7	Pan 37	0.59	531.2	5.58*	1.37	78.92*
H1	B 92	0.25	-124.9	3.58*	-0.21	-3.76
H2	B 98	0.29	28.0	1.25	-1.92	4.19
H3	B 96	-0.02	-89.0	-0.39	-1.13	-0.37
H4	B 16	0.05	-207.6	1.63	-1.78	-3.08
H5	B 68	-0.07	271.0	-1.87	0.99	5.05
H6	B 626	-0.13	-145.1	-2.17	0.51	-1.51
H7	B 625	-0.38	267.9	-2.02	3.56*	-0.48
Error estándar		0.48	277.5	1.58	1.58	6.68

*Más grande que 2 x error estándar; RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹; NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50 % de floración; AP = Altura de planta en cm.

Cuadro 4. ACE de las mejores 12 cruzas de sorgo para rendimiento de grano. Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

Cruzas H x M	RTO (t ha⁻¹)	NGP	PMG (g)	DF (50%)	AP (cm)
A92 x 12 A	0.51*	130.7	0.91	-0.15	4.98*
A92 x 124-2	0.67*	56.9	-0.09	0.21	5.95*
A98 x Pan 37	0.31	-83.2	-0.20	0.73	3.95
A96 x 124-2	0.38	-187.5*	-0.59	-1.20	-1.19
A96 x 21-1	0.50*	89.0	-1.61*	1.61	4.18
A16 x Pan 37	0.34	201.9*	1.12*	-0.41	-12.28*
A68 x 106-2	0.39*	135.2	0.12*	-2.28	-7.19*
A68 x 124-2	0.26	213.0*	0.42	0.18	6.63*
A626 x 12 A	0.51*	-123.7	0.95	0.13	2.96
A626 x Pan 37	0.36	209.6*	0.72	0.30	-3.47
A625 x 12 A	0.42*	434.6*	-0.30	1.08	-0.24
A625 x 21-1	0.69*	-109.2	-0.26	-2.91*	7.19*
Error estándar	0.19	78.6	0.50	1.42	2.38

*Más grande que 2 x error estándar; RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹; NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50% de floración; AP = Altura de planta en cm.

magnitud, pero combinan de tal manera, que generan híbridos con alta ACE, similar a lo reportado por Pech *et al.* (2010) en materiales del género *Capsicum*. En coincidencia con Guerrero *et al.* (2012), las líneas que aparecieron con más frecuencia en los híbridos sobresalientes y en sus respectivas cruzas específicas, obtuvieron los valores más altos de ACG.

Las cruzas con alta y positiva ACE en RTO, destacaron en ACE en NPG, e incluso algunas cruzas con efecto significativo. En cambio, PMG tuvo efectos positivos y significativos de ACE en sólo algunos casos. Se observaron efectos importantes de ACE en DF y AP en algunas cruzas (Cuadro 4). El mejoramiento genético por hibridación tendrá éxito, si al menos una o ambas líneas de un híbrido son de alta ACG, como se documenta en los resultados del presente trabajo.

Según se observa en el Cuadro 5, existen diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) para localidades en todas las variables, a excepción de NGP, lo que indica contrastes entre localidades en cuanto a condi-

ciones ambientales. La varianza de $M (M_{ACG})$ y la de $H (H_{ACG})$ presentaron diferencias estadísticas para todas las variables ($p \leq 0.01$), lo cual indica que los efectos aditivos tuvieron gran impacto sobre todas ellas, que coincide con los resultados de Tadesse *et al.* (2008). La interacción $M \times H$ (ACE) impactó significativamente a las variables ($p < 0.01$), con excepción de RTO y NGP, que son determinantes en la valoración económica de nuevos híbridos. En este caso, debe tomarse en cuenta el gran contraste existente entre las localidades, como el ambiente de producción para sorgo, ya que probablemente esta característica enmascaró tal impacto. De cualquier manera, para la mayoría de las variables, los efectos de aptitud combinatoria encontrados sugieren la posibilidad de seleccionar progenitores superiores para aprovecharlos como patrón heterótico, porque probablemente combinen bien con otros genotipos y generen progenies competitivas, como indica Hallauer (1990). Dadas las diferencias entre los progenitores, también se pueden obtener cruzas que se adapten,

Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y nivel de significancia estadística, según análisis con el Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

FV	gl	RTO (t ha ⁻¹)	NGP	PMG (g)	DF (50%)	AP (cm)
LOC	1	230.8**	20835.5 ns	635.4**	22816.7**	41833.5**
REP (LOC)	4	0.8 ns	81500.9 ns	29.9**	9.8 ns	430.6**
M (ACG)	6	54.7**	5773714.3**	339.5**	92.0**	54691.5**
H (ACG)	6	13.4**	1636168.2**	206.2**	154.3**	485.6**
M x H (ACE)	36	35.2 ns	276766.4 ns	16.0**	12.4**	416.3**
M x Loc	6	43.3**	4326642.9**	111.8**	120.1**	106.6 ns
H x Loc	6	18.3**	225780.2 ns	53.1**	12.1 ns	67.5 ns
M x H x Loc	36	39.3*	593659.3**	11.4*	13.6**	166.3 ns
Error	192	133.3	231109.6	7.5	7.5	133.8
Total	293					
Media		3.01	1916.0	24.5	87.99	142.27
C.V (%)		27.7	25.1	11.2	3.11	8.13

*, ** Significativo al 5 y 1 % ($P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$), respectivamente. gl = Grados de libertad; RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹. NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50% de floración; AP = Altura de planta en cm.

y expresen su máximo potencial de rendimiento en ambientes contrastantes.

La interacción M x Loc con diferencias altamente significativas para todas las variables ($p \leq 0.01$), indica que los M respondieron de manera diferente ante los cambios de ambiente, a excepción de AP. En el caso de la interacción H x Loc, solamente reveló significancia estadística ($p \leq 0.01$) para RTO y PMG. La alta variabilidad de los progenitores M para las diferentes características puede deberse a que fueron desarrollados a partir de una base genética relativamente amplia (Tadesse *et al.*, 2008).

En relación con la interacción M x H x Loc, hubo diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) para todas las variables medidas, a excepción de AP (Cuadro 5). En general, los resultados demuestran diferencias en cuanto a efectos genéticos aditivos para los casos donde H y M reflejaron diferencias significativas, lo cual coincide con Tadesse *et al.* (2008), y efectos de dominancia importantes para los casos donde la interacción M x H fueron significativas. Estos resulta-

dos coinciden con reportes previos de Luna-Ortega *et al.* (2013).

Respecto a la heterosis, las 11 cruzas que superaron el 80% para RTO, se presentan en el Cuadro 6. De éstas, sólo A68 x Pan 37 y A625 x Pan 37, con heterosis de 91.1 y 80%, no se ubicaron dentro de las diez cruzas superiores en RTO (Cuadros 2 y 6). El resto de cruzas, además de alta heterosis, también mostraron ser las más rendidoras. De las cruzas más calificadas: A92 x 124-2, A98 x Pan 37, A96 x 124-2, A626 x Pan 37 y A68 x 124-2, destacaron también por presentar ACE positiva (Cuadro 4). Los valores de mayor amplitud de heterosis encontrados se atribuyen a la mayor diversidad de las líneas que participaron en las cruzas, datos que son similares a los reportados por Cisneros-López *et al.* (2007) y León-Velasco *et al.* (2009).

La heterosis de NGP contribuyó más a la heterosis del RTO, ya que la de PMG fue de menor magnitud (Cuadro 6), lo que coincide con Peña-Ramos *et al.* (2004). Los resultados señalan niveles de heterosis relativamente superiores en NGP, pero similares en

Cuadro 6. Heterosis de 11 híbridos sobresalientes de sorgo respecto a la media de ambos progenitores. Diseño II de Carolina del Norte. Río Bravo, Tamaulipas, y Buenavista, Coahuila. 2014.

Cruzas H x M	RTO (t ha⁻¹)	NGP	PMG (g)	DF (50%)	AP (cm)
A92 x 124-2	117.07*	43.68*	33.27*	0.78	27.72*
A92 x Pan 37	105.74*	87.01*	27.04*	-0.28	56.86*
A98 x 14-3	80.05*	95.23*	-2.31	-1.18*	24.43*
A98 x 124-2	120.22*	92.08*	21.87*	2.23*	31.56*
A98 x IA 28	90.60*	79.01*	-0.21	-1.58*	24.68*
A98 x Pan 37	147.79*	157.19*	16.88*	3.12*	62.28*
A96 x 124-2	93.53*	56.32*	7.67*	1.72*	18.85*
A68 x 124-2	117.54*	83.59*	19.13*	-0.09	32.23*
A68 x Pan 37	91.11*	116.61*	16.83*	0.46	68.60*
A626 x Pan 37	97.93*	151.10*	34.19*	2.95*	59.41*
A625 x Pan 37	80*	109.25*	18.19*	3.93*	80.12*
Error estándar	5.30	5.79	1.90	0.53	2.80

*Más grande que 2 x error estándar; RTO = Rendimiento de grano en t ha⁻¹; NGP = Número de granos por panoja; PMG = Peso de mil granos en gramos; DF = Días a 50% de floración; AP = Altura de planta en cm.

cuanto a PMG a los reportados por León-Velasco *et al.* (2009). DF y AP registraron niveles de heterosis importantes para obtener genotipos precoces y altura adecuada (Cuadro 6).

CONCLUSIONES

Los efectos de ACG, significativos para rendimiento y características agronómicas, permitieron identificar a los progenitores superiores: M7, M4 y M5, y H1, H2 y H4, los cuales tendieron a desarrollar híbridos superiores. Las cruzas de efectos positivos de ACE, alta heterosis y potencial de rendimiento fueron: A92 x 124-2, A98 x Pan 37, A96 x 124-2, A626 x Pan 37 y A68 x 124-2.

Se identificaron diez cruzas de alto rendimiento de grano, de entre las que destacan: A92 x 124-2 y A98 x Pan 37, que superaron en 26 y 19% al mejor testigo comercial. El análisis genético general combinado permitió encontrar progenitores superiores

que generaron buenas combinaciones híbridas, así como identificar cruzas específicas rendidoras, con características agronómicas deseables en ambientes contrastantes.

AGRADECIMIENTOS

Al IICA-CONACYT (México) por la beca para estudios de Maestría en Ciencias en Fitomejoramiento. A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UA-AAN), por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto, y al Programa de Mejoramiento de Sorgo de la UAAAN por proporcionar el material genético para este estudio.

LITERATURA CITADA

BELUM, V., S. Reddy, S. Ramesh, P. Sanjana Reddy, B. Ramaiah (2007). Combining ability and heterosis as

- influenced by male-sterility inducing cytoplasm in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Euphytica*. 154:153-164.
- BORRÁS, L., M. E. Otegui (2001). Maize kernel weight response to post flowering source-sink ratio. *Crop Science*. 49:1816-1822.
- CISNEROS-LÓPEZ, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, G. Mora-Aguilera, L. Córdova-Téllez, M. Livera-Muñoz (2007). Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41: 45-55.
- COMSTOCK, R. E., H. F. Robinson, P. H. Harvey (1949). A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Journal American Society of Agronomy*. 41: 360-367.
- DE ALMEIDA F J, F D Tardin, M D Vilela, F F e Silva, I S Correia, C B de Menezes (2013) Genetic evaluation of grain sorghum hybrids in Brazilian environments using the REML/BLUP procedure. *Scientia Agrícola V* 71(2):46-150.
- FIDEICOMISOS Instituidos en Relación con la Agricultura, Banco de México. FIRA (2016). Panorama Agroalimentario, Sorgo 2016. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Morelia, Mich., México. Publicación especial. 34 pp.
- GEREMEW G., A. Asfaw, T. Taye, T. Tesfaye, B. Ketema, H. Hilemichael (2004). Development of sorghum varieties and hybrids for dryland areas of Ethiopia. *Uganda Journal of Agricultural Science* 9:594-605.
- GÓMEZ, M. N., R. Valdivia, H. Mejía (1988). Dialélico integrado con líneas de diferentes programas de maíz para la región cálida. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 11(2) 103-120.
- GUERRERO, G. C., A. Espinoza, A. Palomo, E. Gutiérrez, J. G. Luna, N. Rodríguez (2012). Comportamiento genético y aptitud combinatoria en cruza simples con líneas elite de maíz. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo*. 28(1): 65-77.
- GUERRERO-GUERRERO, C., A. Espinoza-Banda, A. Palomo-Gil, E. Gutiérrez-del Río, H. Zermeño-González, M. P. González-Castillo (2011). Aptitud combinatoria del rendimiento y sus componentes en dos grupos de líneas de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 22(2): 257-267.
- HALLAUER, A. R. (1990). Methods used in developing maize inbreds. *Maydica* 35(1): 1-16.
- HERNÁNDEZ, L. A., T. M. Gallegos, J. E. Reyes, A. L. Meza (2011). PERLA-101: nueva variedad de sorgo para grano en el estado de Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol. 2, Núm. (5): 779-784.
- KENGA, R., S. O. Alabi, S. C. Gupta (2004). Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research* 88: 251-260.
- KUMAR, A., A. Belum, V.S. Reddy, B. Ramaiah, R. Sharma (2011). Heterosis in white-grained grain mold resistant sorghum hybrids. *Journal of SAT Agricultural Research* 9. 6 pp.
- LEÓN-VELASCO, H., L. E. Mendoza, F. Castillo, T. Cervantes, A. Martínez (2009). Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. II: aptitud combinatoria, heterosis y heterobelitosis. *Agrociencia* 43 (6): 609-623.
- LUNA-ORTEGA, J. G., J. L. García-Hernández, R. D. Valdez-Cepeda, M. A. Gallegos-Robles, P. Preciado-Rangel, C. Guerrero-Guerrero, A. Espinoza-Banda (2013). Aptitud combinatoria y componentes genéticos en líneas de maíz. *Universidad y Ciencia. Trópico Húmedo*. 9(3): 243-253.
- MAKANDA, I., P. Tongoona, J. Derera, J. Sibiyi, P. Fato (2010). Combining ability and cultivar superiority of sorghum germplasm for grain yield across tropical low- and mid-altitude environments. *Field Crops Research* 116 (2010) 75-85.
- OROZCO, M. F. J., L. E. Mendoza (1983). Comparación de híbridos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] y algunos de sus progenitores. *Agrociencia* 53: 87-98.
- OSUNA, O. J., L. E. Mendoza, F. Castillo, V. A. González, M. C. Mendoza, H. W. Alanís, M. Hernández (2001). Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of grain sorghum in México: II. Río Bravo, Tamaulipas; and Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 35: 625-636.
- PALEMÓN, A. F., N. O. Gómez, F. Castillo, P. Ramírez, J. D. Molina, S. Miranda (2012). Potencial productivo de cruza intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3 (1): 157-171.
- PECH MAY, A., G. C. Nájera, J. M. Tun, M. M. Elos, J. O. Mijangos, A. P. Gutiérrez, L. L. Moreno (2010). Efectos heteróticos y aptitud combinatoria en poblaciones de chile dulce (*Capsicum annum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 33 (4): 353-360.
- PEÑA-RAMOS, A., S. D. Kachman, J. D. Eastin, D. J. Andrews (2004). Herencia del rendimiento, número y tamaño del grano en sorgo. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27: 149-156.
- POEHLMAN, J. M. (2005). Mejoramiento genético de las cosechas. 2ª. ed. Limusa, México. 511 pp.
- REDDY, B. V. S., A. A. Kumar, S. Ramesh, S. P. Reddy (2011). Breeding sorghum for coping with climate change. Pages 326-329 in *Crop adaptation to climate change* (Yadav SS, Redden B, Hatfield JL and Herman Lotze-Campen, eds.). Iowa, USA: John Wiley & Sons Inc.

- SAS (Statistical Analysis System) (2001). Version 8.2. By SAS Institute Inc, Cary, NC, USA. Copyright 2001.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2013). Estadísticas de producción agrícola en México. Sorgo de grano. www.siap.mx.
- SPRAGUE, G. F. & L. A. Tatum (1942). General vs specific combining ability in single crosses of corn. Journal American Society of Agronomy. 34:923-932.
- TADESSE, T., T. Tesso, G. Ejeta (2008). Combining ability of introduced sorghum parental lines for major morpho-agronomic traits. Journal of SAT Agricultural Research 6. 7 p.
- WONG, R. R., E. Gutiérrez del Río, A. G. Palomo, S. H. Rodríguez, H. O. Córdoba, A. B. Espinoza, J. J. Lozano (2007). Aptitud combinatoria de componentes del rendimiento en líneas de maíz para grano en la Comarca Lagunera, México. Revista Fitotecnia Mexicana. Vol. 30 (2): 181-189.
- ZEWDie, Y., P. W. Bosland, R. Steiner (2000). Combining ability and heterosis for capsaicinoids in *Capsicum pubescens*. HortScience 36:1315-1317.
- www.inegi.org.mx
<http://www.uaaan.mx>

