

GRAIN YIELD TRAITS OF SINGLE AND THREE-WAY SORGHUM HYBRIDS AND ITS PARENTAL LINES

CARACTERES DEL RENDIMIENTO DE GRANO DE HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES DE SORGO Y DE SUS LÍNEAS PROGENITORAS

Marisol Galicia-Juárez¹, Leopoldo E. Mendoza-Onofre^{1*}, Víctor A. González-Hernández¹, Ma. Eugenia Cisneros-López², Ignacio Benítez-Riquelme¹, Leobigildo Córdova-Téllez¹

¹Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Km 36.5 Carr. México-Texcoco, 56230, Montecillo, Estado de México. (leopoldo@colpos.mx); ²Campo Experimental Río Bravo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Km 61 Carr. Matamoros-Reynosa, 88900, Tamaulipas, México.

ABSTRACT

Reports of a grain yield improvement of single cross (SCSH) *vs.* three-way (TWSH) sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) hybrids are scarce. The objective of this study was to compare mid-parent heterosis, high parent heterosis, and general and specific combining ability for yield traits (panicle length and width, grain yield/panicle, grains/panicle and 100-grains weight) of SCSH, TWSH and its parental lines. Irrigated and rainfed field trials were established in the Mexican Highlands (>2100 m altitude; 8 °C mean early morning temperature during the growing season). Both trials included five groups of genotypes (three or four pairs of 'A'/'B' lines, four 'R' lines, 11 SCSH and 41 TWSH). Significant differences ($p \leq 0.05$) were found for groups of genotypes (G) and environments (E) for most traits, but the $G \times E$ interaction was not significant ($p > 0.05$). The TWSH group did not show significant differences ($p > 0.05$) with that of the SCSH group for any trait. None significant differences ($p > 0.05$) were found for grain yield/panicle and grains/panicle between the group of 'R' lines, and those of SCSH and TWSH. High parent heterosis estimates were low due to the high expression of the 'R' lines. Estimates of general combining ability of female and male parents were significantly different ($p \leq 0.05$), but not for specific combining ability in both hybrid types. Our 'R' lines can be sown as open pollinated varieties in the Mexican Highlands instead of sorghum hybrids.

Key words: *Sorghum bicolor* L. Moench, cold tolerance, sorghum lines, top-cross tests.

RESUMEN

La información del incremento del rendimiento de grano de híbridos simples (HS) *vs.* híbridos trilineales (HT) de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es escasa. El objetivo de este estudio fue comparar la heterosis media, heterosis superior, y la aptitud combinatoria general y específica de caracteres del rendimiento de grano (longitud y ancho de panoja, rendimiento de grano/panoja, número de granos/panoja y peso de 100 granos) de HS, HT y sus líneas progenitoras. En los Valles Altos Centrales de México (>2100 m de altitud; 8 °C de temperatura promedio en la madrugada durante el ciclo de cultivo) se establecieron experimentos de campo en condiciones de riego y secano. Ambos experimentos incluyeron cinco grupos de genotipos (tres o cuatro pares de líneas 'A'/'B', cuatro líneas 'R', 11 HS y 41 HT). Hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para grupos de genotipos (G) y ambientes (A) en la mayoría de los caracteres, pero la interacción $G \times A$ no fue significativa ($p > 0.05$). No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el grupo de HS y el de HT para caracter alguno. Tampoco hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) para el rendimiento de grano/panoja y granos/panoja entre los grupos de líneas 'R', HS e HT. Los estimadores de heterosis superior fueron bajos debido a la alta expresión de las líneas 'R'. Los estimadores de la aptitud combinatoria general de los progenitores femeninos y masculinos fueron diferentes ($p \leq 0.05$), pero no los de la aptitud combinatoria específica, en ambos tipos de híbridos. Nuestras líneas 'R' se pueden sembrar como variedades de polinización libre en los Valles Altos Centrales de México en lugar de híbridos de sorgo.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L. Moench, tolerancia al frío, líneas de sorgo, prueba de mestizos.

*Author for correspondence ❖ Autor responsable
Received: January, 2019. Approved: June, 2019.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 53: 855-867. 2019.

INTRODUCTION

Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is a well-known crop adapted to tropical and subtropical regions (Gnansounou *et al.*, 2005). In the Mexican Highlands (>2100 m altitude), chilling temperatures (8 °C) prevail in the early morning hours during most of the growing season, even during the summer. A group of 'A', 'B', and 'R' sorghum lines adapted to this region, regarded as cold tolerant, were developed by our research group (Cisneros-López *et al.*, 2012). Grain yield of the resulting single cross sorghum hybrids (SCSH), when grown them in the Mexican Highlands has varied from 2.5 to 8.0 t ha⁻¹ depending upon field conditions (Osuna-Ortega *et al.*, 2000; Cisneros-López *et al.*, 2007b; León-Velasco *et al.*, 2009a). In addition, SCSH that involve a cold tolerant parental line, when sown in tropical or subtropical regions, produce similar grain yields and could be harvested earlier than control hybrids adapted to warm environments (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2001, 2003).

In a three-way sorghum hybrid (TWSH) the female parent is a male sterile single cross (the product of an 'A' line × a 'B' non-isogenic line); the male parent is an 'R' line. Comparisons of SCSH *vs.* TWSH are scarce and relatively old. In pioneer studies carried on during the decades of the 60's and 70's the differences in grain yield between both types of hybrids were not significant (Walsh and Atkins, 1973; Patanothai and Atkins, 1974), or with small advantages in favor of the SCSH (Ross, 1969). According to Jowett (1972), the TWSH have a greater genetic diversity and may be less vulnerable than SCSH to the presence of insects, diseases or other environmental stress (Wilson *et al.*, 2001; Da Costa *et al.*, 2005). Grain yield and grain yield components are quantitative inherited traits; therefore, it is necessary to estimate the type and magnitude of the genes action involved in order to select the appropriate breeding method. The suitable selection of sorghum parental lines that combine well and produce desirable hybrids is essential (Premalatha *et al.*, 2006). Furthermore, in order to have an effective and efficient hybridization program it is necessary to evaluate the general (GCA) and specific (SCA) combining ability of the parental lines, also, to assess the degree of mid-parent heterosis and high parent heterosis of the hybrid combinations (Mahdy *et al.*, 2011; Thakare *et al.*, 2014).

INTRODUCCIÓN

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es un cultivo reconocido por su adaptación a las regiones tropicales y subtropicales (Gnansounou *et al.*, 2005). En los Valles Altos Centrales de México (>2100 m de altitud), las temperaturas bajas (8 °C) prevalecen en las primeras horas de la mañana durante la mayor parte del ciclo del cultivo, incluso durante el verano. Nuestro grupo de investigación ha desarrollado líneas 'A', 'B' y 'R' de sorgo adaptadas a esta región, denominadas como tolerantes al frío (Cisneros-López *et al.*, 2012). El rendimiento de grano de los híbridos simples (HS) respectivos, cuando se siembran en los Valles Altos Centrales de México, ha variado de 2.5 a 8.0 t ha⁻¹ según las condiciones de campo (Osuna-Ortega *et al.*, 2000; Cisneros-López *et al.*, 2007b; León-Velasco *et al.*, 2009a). Además, los HS que involucran una línea parental tolerante al frío, cuando se siembran en regiones tropicales o subtropicales, producen rendimientos de grano similares y pueden cosecharse antes que los híbridos testigo adaptados a ambientes cálidos (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2001, 2003).

En un híbrido trilineal (HT) de sorgo el progenitor femenino es un híbrido simple androestéril (producto del cruzamiento de una línea 'A' × una línea 'B' no isogénica); el progenitor masculino es una línea 'R'. Las comparaciones entre HS e HT son escasas y relativamente antiguas. En estudios pioneros realizados durante las décadas de 1960 y 1970, no hubo diferencias significativas en el rendimiento de grano entre ambos tipos de híbridos (Walsh y Atkins, 1973; Patanothai y Atkins, 1974), o las ventajas fueron pequeñas a favor de los HS (Ross, 1969). Según Jowett (1972), los HT tienen mayor diversidad genética y pueden ser menos vulnerables a la presencia de insectos, enfermedades u otro estrés ambiental que los HS (Wilson *et al.*, 2001; Da Costa *et al.*, 2005). El rendimiento de grano y sus componentes son caracteres de herencia cuantitativa; por lo tanto, es necesario estimar el tipo y la magnitud de acción de los genes involucrados para seleccionar el método apropiado de mejoramiento. La selección adecuada de líneas parentales de sorgo que combinen bien y que produzcan híbridos deseables es esencial (Premalatha *et al.*, 2006). Además, para tener un programa de hibridación efectivo y eficiente se requiere evaluar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica

The aim of this study was to compare the grain yield traits of parental lines, single cross and three-way cold tolerant sorghum hybrids, under chilling field conditions.

MATERIALS AND METHODS

In Montecillo, Estado de México (19° 29' N, 98° 54' W, 2250 m of altitude), two experiments were established in 2014. One trial was sown in April 22 under irrigated conditions including 67 genotypes: four pairs of 'A/B' isogenic lines, four 'R' lines, 13 SCSH and 42 TWSH. A second trial was sown on May 21 under rainfed conditions, with 62 genotypes: three pairs of 'A/B' isogenic lines, four 'R' lines, 11 SCSH and 41 TWSH. Galicia-Juárez *et al.* (2017) described the process to develop these SCSH and TWSH. The experimental plots were implemented by two rows 3.0 m long and 0.80 m apart in both trials. Plants were 10 cm apart (125 000 plants ha⁻¹). Genotypes were distributed in a complete random blocks design with three repetitions. Rainfall, maximum and minimum temperatures were registered during the study period in the nearest meteorological station (500 m away from the experimental plots).

Genetic material

The cold tolerant lines have food grade attributes; they are photoperiod insensitive and their leaf blades do not show anthocyanin pigmentation. Tannins are scarce or absent in the grain. Predominant endosperm is floury (75%); glume color is light-tan. Grain color of the 'A/B' lines is creamy and opaque, while in the 'R' lines grain color varies from white to light brown (Mendoza-Onofre *et al.*, 2017).

Traits

Experimental units were 10 representative plants per plot. Panicle length (PL, cm), from the base to the tip the panicle; and panicle width (PW, cm), in the widest part of the panicle were measured at the end of flowering. Panicles were harvested one week after grain reached physiological maturity (presence of the "black layer") (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006). Each panicle was threshed and the following traits were registered: grain yield/panicle (GYP, g), 100-grains weight (100GW, g) and grains/panicle (GP=100×GYP/100GW).

Statistical analysis

A combined analysis of variance (ANOVA) was performed including five groups of genotypes ('A', 'B' and 'R' lines, SCSH

(ACE) de las líneas parentales; además, evaluar la magnitud de la heterosis superior y de la heterosis media de las combinaciones híbridas (Mahdy *et al.*, 2011; Thakare *et al.*, 2014).

El objetivo de este estudio fue comparar los caracteres de rendimiento de grano de líneas progenitoras, y de híbridos simples y trilineales de sorgo tolerantes al frío, en condiciones frías de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En Montecillo, Estado de México (19° 29' N, 98° 54' O y 2250 m de altitud), se establecieron dos experimentos en el año 2014. Un experimento se sembró el 22 de abril, bajo riego, que incluyó 67 genotipos: cuatro pares de líneas isogénicas 'A/B', cuatro líneas 'R', 13 HS y 42 HT. El segundo experimento se sembró el 21 de mayo en condiciones de secano e incluyó 62 genotipos: tres pares de líneas isogénicas 'A/B', cuatro líneas 'R', 11 HS y 41 HT. Galicia-Juárez *et al.* (2017) describieron el proceso para desarrollar estos HS y HT. En ambos experimentos las parcelas fueron dos surcos de 3.0 m de largo espaciados a 0.80 m. La separación entre plantas fue 10 cm (125 000 plantas ha⁻¹). Los genotipos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La precipitación, y las temperaturas máximas y mínimas se registraron durante el período de estudio en la estación meteorológica más cercana (a 500 m de las parcelas experimentales).

Material genético

Las líneas tolerantes al frío tienen atributos de grado alimenticio; son insensibles al fotoperíodo y sus limbos no muestran pigmentación de antocianinas. Los taninos son escasos o ausentes en el grano. El endospermo predominante es harinoso (75%); el color de la gluma es bronceado claro. El color del grano de las líneas 'A/B' es cremoso y opaco, mientras que en las líneas 'R' varía de blanco a marrón claro (Mendoza-Onofre *et al.*, 2017).

Caracteres

Las unidades experimentales fueron 10 plantas representativas por parcela. Al final de la floración se midió la longitud de la panoja (LP, cm), desde la base hasta el ápice de la panícula; y su ancho (AP, cm), en la parte más amplia de la panoja. Las panojas se cosecharon una semana después de que el grano alcanzó la madurez fisiológica (presencia de la "capa negra") (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006). Cada panoja se desgranó y se registró el rendimiento de grano/panoja (RGP, g), peso de 100 granos (PCG, g) y número de granos/panoja (GP=100×RSP/PCS).

and TWSH), two environments (irrigated and rainfed), genotypes/group and its respective interactions. Data subjected to ANOVAs correspond to the averages of 10 plants/plot. As each group was represented by a different number of observations, PROC GLM of SAS (2002) was applied. The Tukey test ($p \leq 0.05$) was used for mean comparisons.

Estimates of GCA and SCA were obtained according to the top-cross model. Therefore, the term “lines” were given to each ‘A’ line for the SCSH analysis, and to each ‘A’ × ‘B’ non-isogenic cross for the TWSH analysis. The term “tester” were assigned to the ‘R’ lines in both types of hybrids (Galicia-Juárez *et al.*, 2017). The GCA of lines and testers were estimated by their averages while the SCA estimates corresponded to the line × tester interaction. Tukey ($p \leq 0.05$) test was also used for mean comparisons. Mid-parent heterosis was estimated as the ratio of the F1/mean performance of the parental lines (two for the SCSH and three in the TWSH) × 100. High parent heterosis corresponded to the ratio of the F1/performance of the best parent × 100 (Sattar *et al.*, 2014). Data of the fertile ‘B’ and ‘R’ lines were used in these calculations. The average heterosis of the set of SCSH *vs.* that of the TWSH was compared using the Student “t” based on an unpaired model.

RESULTS AND DISCUSSION

Environmental effects were higher than genotypic effects for grain yield/panicle and grains/panicle, while genotypic effects were higher than the environmental ones only for panicle length (Table 1).

The environment × groups of genotypes, as well as the genotypes × environment within groups [(Gen × Env)/Grupo] interactions were not significant ($p > 0.05$) for all traits, thus indicating that the genotypes performed similarly in the two environments (irrigated and rainfed) may be due to the close distance (100 m) between the sorghum breeding station and the trial sites. Nevertheless, a significant interaction genotype × environment interaction is a frequent response in SCSH studies (Almeida *et al.*, 2014).

Environmental effects

The variables panicle width, grain yield/panicle, grains/panicle and 100-grains weight were higher ($p \leq 0.05$) in the rainfed trial than in the irrigated one (Table 2). This unusual superiority of the rainfed environment may be attributed to a higher amount of rainfall (770 mm) and higher maximum temperatures (23.8 °C) in 2014, compared to the average of the

Análisis estadístico

Un análisis de varianza (ANDEVA) combinado se efectuó e incluyó cinco grupos de genotipos (líneas ‘A’, ‘B’, ‘R’, HS e HT), dos ambientes (riego y secano), genotipos/grupo y sus respectivas interacciones. Los datos sujetos al ANDEVA corresponden al promedio de 10 plantas/parcela. Como cada grupo estuvo representado por diferente número de observaciones, se aplicó PROC GLM de SAS (2002). La comparación de medias fue mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Los estimadores de la ACG y ACE de los híbridos simples y trilineales se obtuvieron mediante la prueba de mestizos. Por lo tanto, en el análisis de los HS el término “líneas” se asignó a cada línea ‘A’, y en el análisis de los HT las “líneas” fueron cada cruza ‘A’ × ‘B’ no isogénica. El término “probador” se asignó a las líneas ‘R’ en ambos tipos de híbridos (Galicia-Juárez *et al.*, 2017). La ACG de las líneas y de los probadores se estimaron por sus promedios, mientras que las estimaciones de ACE correspondieron a la interacción línea × probador. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La heterosis media de los híbridos se estimó mediante la relación del comportamiento de la F1/comportamiento promedio de los progenitores (dos en los HS y tres en los HT) × 100. La heterosis superior correspondió al comportamiento de la F1/comportamiento del mejor progenitor × 100 (Sattar *et al.*, 2014). En estos cálculos de heterosis se utilizaron los datos de las líneas fértiles ‘B’ y ‘R’. La heterosis promedio del grupo de HS *vs.* la del grupo de HT se comparó con la prueba “t” de Student, con base en un modelo de parcelas no apareadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos ambientales fueron mayores que los efectos genotípicos para el rendimiento de grano/panoja y granos/panoja, mientras que los efectos genotípicos fueron mayores que los ambientales sólo para la longitud de la panoja (Cuadro 1).

Las interacciones ambiente × grupos de genotipos, así como genotipos × ambiente dentro de grupo [(Gen × Amb)/Grupo] no fueron significativas ($p > 0.05$) para todos los caracteres, lo cual indica que los genotipos tuvieron un desempeño similar en los dos ambientes (riego y secano) quizás por la corta distancia (100 m) entre la estación experimental de mejoramiento genético y los sitios de prueba. Sin embargo, una interacción significativa genotipo × ambiente es una respuesta frecuente en los estudios de HS (Almeida *et al.*, 2014).

Table 1. Square means of the combined ANOVA for grain yield traits.**Cuadro 1.** Cuadrados medios del ANDEVA combinado para caracteres del rendimiento de grano.

Source of variation	DF (GL)	Square means				
		Panicle traits		Grain yield components		
		PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCG)	GYP (RGP)	GP
Environments	1	12.70 ns	237.42 **	20.38 *	7660.39 **	3798133 **
Rep/Env	4	14.62	27.77	4.69	91.36	234272
Groups of genotypes	4	225.38 **	245.60 **	4.06 ns	1438.73 **	873659 **
Env×Groups	4	6.73 ns	3.76 ns	0.27 ns	25.38 ns	92886 ns
Gen/Groups						
A	3	26.17 **	8.87 *	0.56 ns	34.99 ns	192867 ns
B	3	31.03 **	0.71 ns	0.11 ns	102.93 ns	21815 ns
R	3	18.14 **	32.61 **	1.24 **	310.92 **	674891 **
SCSH (HS)	14	17.16 **	9.05 **	0.25 **	96.80 *	98252 **
TWSH (HT)	41	11.53 **	13.18 **	4.49 ns	113.77 **	132170 **
(Gen×Env)/Group						
A	2	0.69 ns	0.81 ns	0.06 ns	83.50 ns	70388 ns
B	2	1.18 ns	0.34 ns	0.19 ns	77.67 ns	38204 ns
R	3	1.46 ns	1.01 ns	0.11 *	5.93 ns	34867 ns
SCSH (HS)	8	1.75 ns	2.38 ns	0.04 ns	51.53 ns	83079 *
TWSH (HT)	40	1.53 *	2.14 ns	4.29 ns	34.08 ns	42600 ns
Residual	372	3.41	3.71	2.89	45.92	62015
VC (CV) (%)		7	15	66	22	20

DF: degrees of freedom; VC: variation coefficient; A: male sterile lines; B: maintainer lines; R: restorer lines; PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. F test: *($p \leq 0.05$), **($p \leq 0.01$), ns: non-significant ($p > 0.05$). ✧ GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación; A: líneas androestériles; B: líneas mantenedoras; R: líneas restauradoras; LP y AP: largo y ancho de la panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento de grano/panoja; GP: granos/panoja. Prueba de F: *($p \leq 0.05$), **($p \leq 0.01$), ns: no significativo ($p > 0.05$).

ten years' period 2004-2014 (739 mm and 22.5 °C), as well as the lower minimum temperature average during the start of the growing season in the irrigated trial (May, 9.7 °C) than in the rainfed experiment (June, 12.0 °C).

Comparisons among groups of genotypes and among lines within groups

The significant differences ($p \leq 0.05$) among the five groups of genotypes for most of the yield traits (Table 1) were related to the clear superiority of the groups of 'R' lines and both hybrid types over the groups of 'A' and 'B' lines (Table 2). The absence of significant differences ($p > 0.05$) between the groups of 'A' and 'B' lines ratifies its isogenic nature.

It is noticeable that there were not significant differences ($p > 0.05$) for grain yield/panicle and grains/panicle among the group of 'R' lines and both groups of sorghum hybrids (Table 2). Likewise,

Efectos ambientales

Los caracteres: ancho de panoja, rendimiento de grano/panoja, granos/panoja y peso de 100 granos fueron mayores ($p \leq 0.05$) en el experimento de secano que en el de riego (Cuadro 2). Esta superioridad inusual del ambiente de secano puede atribuirse a una mayor cantidad de lluvia (770 mm) y mayores temperaturas máximas (23.8 °C) en 2014, comparado con el promedio del período de diez años 2004-2014 (739 mm y 22.5 °C), así como a una temperatura mínima promedio más baja durante el inicio de la estación de crecimiento en el experimento de riego (mayo, 9.7 °C) que en el de secano (junio, 12.0 °C).

Comparaciones entre grupos de genotipos y entre líneas dentro de grupos

Las diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los cinco grupos de genotipos para la mayoría de los

Table 2. Agronomic trait means for environments, groups of genotypes, and lines within each group of genotypes.

Cuadro 2. Promedios de los caracteres agronómicos por ambiente, grupos de genotipos, y líneas dentro de cada grupo de genotipos.

Factor	Traits				GP
	PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCS)	GYP (RGP)	
	cm		g		
Environments					
Irrigated	26.4 a	11.9 b	2.4 b	27.1 b	1167 b
Rainfed	26.1 a	13.5 a	2.8 a	36.2 a	1368 a
Groups of genotypes					
A	22.7 b	8.5 c	2.2 a	19.9 b	915 b
B	22.5 b	8.5 c	1.9 a	19.0 b	1037 b
R	23.6 b	10.7 b	2.5 a	30.4 a	1274 a
SCSH (HS)	27.1 a	13.2 a	2.5 a	33.5 a	1342 a
TWSH (HT)	26.9 a	13.5 a	2.7 a	32.9 a	1289 a
Lines within groups of genotypes					
GROUP A					
A1	25.6 a	7.9 b	2.1 a	23.7 a	1107 a
A2	20.9 b	10.1 a	1.9 a	21.6 a	1082 ab
A3	22.4 b	8.6 ab	2.6 a	15.7 a	616 b
A5	21.6 b	7.5 b	2.3 a	16.2 a	698 ab
GROUP B					
B1	25.7 a	8.3 a	1.9 a	25.2 a	1294 a
B2	20.3 c	8.9 a	1.8 a	18.3 a	1086 a
B3	22.2 b	7.9 a	1.9 a	15.3 a	790 a
B5	21.6 bc	8.4 a	1.8 a	15.5 a	862 a
GROUP R					
R14	24.7 a	12.4 a	2.1 c	20.4 b	995 c
R17	21.3 c	7.7 c	3.1 a	31.6 a	1034 c
R19	25.2 a	12.8 a	2.4 b	32.1 a	1350 b
R25	23.1 b	10.2 b	2.2 bc	37.6 a	1717 a

A: male sterile lines; B: maintainer lines; R: restorer lines; SCSH: single cross sorghum hybrids; TWSH: three-way sorghum hybrids; PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. Different letter(s) in each trait and within the same group denote statistical significance (Tukey, $p \leq 0.05$). ❖ A: líneas androestérides; B: líneas mantenedoras; R: líneas restauradoras; HS: híbridos simples de sorgo; HT: híbridos trilineales de sorgo; LP y AP: largo y ancho de la panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento de grano/panoja; GP: granos/panoja. Letras diferentes en cada caracter y dentro del mismo grupo denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cisneros-López *et al.* (2007a) and Galicia-Juárez *et al.* (2017) reported that there were not significant differences ($p > 0.05$) for physiological seed quality traits and seedling growth between the group of ‘R’ lines and that of the SCSH adapted to the Mexican Highlands. According to our results, the pedigree selection method applied for grain yield traits was

caracteres relacionados con el rendimiento de grano (Cuadro 1) se atribuyen a la clara superioridad de los grupos de líneas R y de ambos tipos de híbridos sobre los grupos de líneas ‘A’ y ‘B’ (Cuadro 2). La ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los grupos de las líneas ‘A’ y ‘B’ confirma su naturaleza isogénica.

quite effective for developing these restorer lines so that some of these male lines could be used as open pollinated varieties. León-Velasco *et al.* (2009a) suggested this option for reducing seed price, as compared to that of the hybrids.

There were not significant differences ($p > 0.05$) between TWSH and SCSH groups for any yield trait (Table 1). These two types of hybrids showed also similar responses in seed physiological quality traits (Galicia-Juárez *et al.*, 2017).

In relation to the lines performance within each group, there were not significant differences ($p > 0.05$) between the four 'B' lines except for panicle length (Tables 1, 2). In contrast, there were significant differences ($p \leq 0.05$) for all traits within the 'R' lines, including grain yield/panicle and grain yield components; *i.e.*, grain yield/panicle of R17, R19 and R25 were higher than that of R14 (Table 2).

Within the single cross hybrids and within the three-way hybrids there were significant differences ($p \leq 0.05$) for all traits (Table 3). Grain yield/panicle of SCSH varied from 25.8 to 50.5 g, while that for TWSH varied from 23.9 to 40.7 g. The yield of the best TWSH did not surpass that of the best SCSH.

The R17 line stands out as the most frequent male parent in the ten top SCSH and TWSH (Table 3), while the R14 line predominate in the low yield hybrids. Therefore, the genetic contribution of the restorer line plays an important role in the grain yield of our cold tolerant hybrids.

Heterosis

Mid parent heterosis was of similar magnitude in both types of hybrids for all traits except for panicle width and 100-grain weight, which were higher in the three-way hybrids (Table 4). Therefore, the greater heterozygosity of the SCSH with respect to the TWSH is not necessarily associated to a higher mid-parent heterosis. High parent heterosis estimates were lower than those for mid-parent heterosis because in most cases the magnitude of the agronomic trait of the 'R' lines (the best parental line) was similar to that of the hybrids.

Estimates of mid-parent heterosis (140%) and high parent heterosis (114%) for grain yield/panicle of SCSH are within the range values found in similarly cold tolerant genotypes evaluated in the Mexican Highlands: 129 and 124% (Osuna-Ortega

Destaca que no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) para el rendimiento de grano/panoja y granos/panoja entre el grupo de líneas 'R' y ambos grupos de híbridos de sorgo (Cuadro 2). De manera similar, Cisneros-López *et al.* (2007a) y Galicia-Juárez *et al.* (2017) tampoco encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) para caracteres de la calidad fisiológica de las semillas y el crecimiento de plántulas entre el grupo de líneas 'R' y el de HS adaptados a Valles Altos Centrales de México. Con base en nuestros resultados, el método de selección de pedigrí aplicado para los caracteres del rendimiento de grano fue efectivo para desarrollar estas líneas restauradoras, de modo que algunas de estas líneas masculinas podrían usarse como variedades de polinización libre. León-Velasco *et al.* (2009a) sugirieron esta opción para reducir el precio de la semilla, en comparación con el de los híbridos.

No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los grupos de HS e HT para ningún carácter del rendimiento (Cuadro 1). Estos dos tipos de híbridos también mostraron respuestas similares en los caracteres de la calidad fisiológica de las semillas (Galicia-Juárez *et al.*, 2017).

En relación con el comportamiento de las líneas dentro de cada grupo, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las cuatro líneas 'B' excepto por la longitud de la panoja (Cuadros 1, 2). En contraste, hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para todos los caracteres entre las líneas 'R' incluyendo el rendimiento de grano/panoja y los componentes del rendimiento de grano; *i.e.*, el rendimiento de grano/panoja de R17, R19 y R25 fue mayor que el de R14 (Cuadro 2).

Dentro de los híbridos simples y dentro de los híbridos trilineales hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para todos los caracteres (Cuadro 3). El rendimiento de grano/panoja de los HS varió de 25.8 a 50.5 g, mientras que el de los HT varió de 23.9 a 40.7 g. El rendimiento del mejor HT no superó al del mejor HS.

La línea R17 destaca como el progenitor masculino más frecuente en los diez HS e HT superiores (Cuadro 3), mientras que la línea R14 predomina en los híbridos de bajo rendimiento. Por lo tanto, la contribución genética de la línea restauradora desempeña un papel importante en el rendimiento de grano de nuestros híbridos tolerantes al frío.

Table 3. Means for grain yield traits of single cross and three-way sorghum hybrids.

Cuadro 3. Medias de los caracteres del rendimiento de grano de híbridos simples y trilineales de sorgo.

Genotypes	Traits				GP
	PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCG)	GYP (RGP)	
	cm		g		
Single cross hybrids					
A1×R17	29.2 ac	14.0 ad	2.9 a	50.5 a	1712 a
A1×R19	30.2 ab	15.2 ab	2.4 bc	40.1 ab	1709 a
A2×R17	24.3 f	11.9 cd	2.6 ac	36.6 ac	1392 ab
A5×R25	24.8 f	12.1 bd	2.6 ac	36.3 bc	1443 ab
A3×R17	25.5 df	12.2 bd	2.6 ac	35.8 bc	1411 ab
A1×R25	28.2 ad	11.9 bd	2.4 ac	35.6 bc	1466 ab
A5×R17	25.4 df	11.5 d	2.8 ab	35.3 bc	1277 ab
A5×R19	27.1 cf	12.3 ad	2.8 ab	32.7 bc	1184 b
A2×R25	25.4 df	11.8 cd	2.2 bc	31.6 bc	1412 ab
A1×R14	30.4 a	14.9 ac	2.2 bc	31.5 bc	1397 ab
A3×R14	27.4 bc	14.1 ad	2.4 bc	30.1 bc	1268 ab
A3×R19	27.9 ad	14.5 ad	2.8 ab	28.5 bc	1027 b
A2×R14	26.3 cf	13.7 ad	2.2 c	28.1 bc	1285 ab
A5×R14	28.6 ac	15.5 a	2.5 ac	27.6 bc	1126 b
A2×R19	27.5 ad	13.3 ad	2.2 bc	25.8 c	1194 b
Top ten three-way hybrids for grain yield/panicle					
(A1'B2) ×R17	26.3 fo	12.3 fk	2.7 af	40.7 a	1490 ab
(A5'B1) ×R25	26.2 go	11.5 ik	2.8 ac	40.4 ab	1420 ac
(A3'B1) ×R17	27.5 aj	13.2 ck	2.7 ae	38.7 ac	1421 ac
(A2'B3) ×R17	26.1 go	12.7 ek	2.8 ae	38.3 ad	1392 ad
(A2'B5) ×R17	25.1 jo	12.9 dk	2.7 ag	38.1 ad	1406 ad
(A2'B3) ×R25	25.7 io	13.2 ck	2.5 ch	37.4 ae	1512 ab
(A3'B2) ×R17	24.2 jo	13.2 ck	2.5 ch	37.0 af	1512 ab
(A5'B1) ×R17	26.7 dn	12.2 gk	2.7 ag	37.0 af	1367 ad
(A5'B2) ×R17	24.8 jo	10.8 k	2.7 ag	36.6 af	1363 ae
(A3'B1) ×R25	27.4 ak	13.4 bk	2.7 af	36.6 af	1341 af
Low ten three-way sorghum hybrids for grain yield/panicle					
(A1'B2) ×R14	28.8 ad	14.4 ag	2.3 eh	29.7 bi	1304 af
(A5'B1) ×R14	29.3 ab	16.9 a	2.3 fh	29.6 ci	1290 af
(A3'B2) ×R19	27.2 bk	13.8 bi	2.8 ac	27.8 di	995 f
(A1'B5) ×R14	29.2 ac	15.3 ae	2.3 dh	27.6 di	1172 bf
(A1'B3) ×R14	29.6 a	16.1 ab	2.5 bh	27.5 di	1091 cf
(A2'B5) ×R14	26.5 dn	13.1 ck	2.4 ch	26.7 ei	1101 cf
(A3'B1) ×R14	28.7 ae	15.7 ac	2.6 ah	26.2 fi	1056 df
(A3'B5) ×R14	28.3 ag	15.6 ac	2.5 ch	25.3 gi	1078 cf
(A5'B3) ×R14	27.6 aj	14.9 af	2.5 bh	24.9 hi	1003 ef
(A2'B3) ×R14	27.1 bk	15.1 ae	2.3 gh	23.9 i	1053 df

PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. Different letter(s) in each trait and within the same group denote statistical significance (Tukey, $p \leq 0.05$). ✦ LP y AP: largo y ancho de la panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento grano/panoja; GP: granos/panoja. Letras diferentes en cada caracter y dentro del mismo grupo denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

Table 4. Estimates of mid-parent heterosis and high parent heterosis for agronomic traits of single cross (SCSH) and three-way sorghum hybrids (TWSH).**Cuadro 4.** Estimaciones de heterosis media y heterosis superior para caracteres agronómicos de híbridos simples (HS) y trilineales (HT).

Type of hybrid	Traits				
	PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCS)	GYP (RGP)	GP
			Mid-parent heterosis		
SCSH (HS) (n=15)	118 a	139 b	116 b	140 a	121 a
TWSH (HT) (n=42)	118 a	147 a	126 a	149 a	120 a
			High parent heterosis		
SCSH (HS) (n=15)	112 a	123 a	103 a	114 a	108 a
TWSH (HT) (n=42)	111 a	125 a	107 a	109 a	101 a

n: number of genotypes involved in the average; PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. Different letter(s) in each trait and within the same type of hybrid denote statistical significance (Tukey, $p \leq 0.05$). Values above 100 are relative to mid-parent or high-parent value (which is 100). ❖ n: número de genotipos involucrados en el promedio; LP y AP: largo y ancho de la panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento de grano/panoja; GP: granos/panoja. Letras diferentes en cada caracter y dentro del mismo tipo de híbrido denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$). Los valores superiores a 100 son relativos al valor de heterosis media o heterosis superior (que es 100).

et al., 2000), 135 and 122% (Cisneros-López *et al.*, 2007b), and 147 and 123% (León-Velasco *et al.*, 2009b), respectively. In other latitudes, Haussmann *et al.* (2000) reported that mid-parent heterosis for grain yield varied from 113 to 188%, where the highest values corresponded to genotypes involving exotic germplasm or from trials carried out under environmental stress conditions. In more recent studies, ranks of mid-parent heterosis has fluctuated between 103.9 and 155.4% for grain yield/panicle, and from 103.2 to 119.8% for 100-grains weight; the corresponding high parent heterosis has varied from 105.1 to 134.7% and 105.6 to 118.2%, respectively (Jain and Patel, 2013).

General and specific combining ability

Estimates of GCA of lines and testers for SCSH showed significant effects ($p \leq 0.05$) (Table 5). Similar magnitudes were found for most traits in both hybrid types. Therefore, the combining ability results for single cross hybrids shown in Table 6 may well also represent the TWSH.

Among lines, A1 outstood by its higher values of GCA for panicle length, grain yield/panicle and grains/panicle; among testers, R14 showed good GCA performance for panicle length and panicle

Heterosis

La heterosis media fue de magnitud similar en ambos tipos de híbridos para todos los caracteres, excepto para el ancho de panoja y el peso de 100 granos, los que fueron mayores en los híbridos trilineales (Cuadro 4). Por lo tanto, la mayor heterocigosidad de los HS con respecto a los HT no está necesariamente asociada con una heterosis media mayor. Las estimaciones de heterosis superior fueron más bajas que las de heterosis media porque en la mayoría de los casos la magnitud de los caracteres agronómicos de las líneas 'R' (la mejor línea progenitora) fue similar a la de los híbridos.

Las estimaciones de heterosis media (140%) y heterosis superior (114%) para el rendimiento de grano/panoja de los HS están dentro del intervalo de valores que se han observado en genotipos similares tolerantes al frío evaluados en Valles Altos Centrales de México: 129 y 124% (Osuna-Ortega *et al.*, 2000), 135 y 122% (Cisneros-López *et al.*, 2007b), y 147 y 123% (León-Velasco *et al.*, 2009b), respectivamente. En otras latitudes, Haussmann *et al.* (2000) indicaron que la heterosis media para el rendimiento de grano varió entre 113 y 188%, donde los valores más altos correspondieron a genotipos que involucraban germoplasma exótico o de experimentos que se establecieron

Table 5. Square means of the combined ANOVA's for grain yield traits of lines and testers of single cross hybrids.

Cuadro 5. Cuadrados medios de los ANDEVA combinados para caracteres del rendimiento de grano de líneas y probadores de híbridos simples.

Source of variation	DF (GL)	Square means				
		PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCG)	GYP (RGP)	GP
Lines	3	45.2 **	5.5 ns	0.33 **	127.5 ns	244084 **
Testers	3	28.5 **	27.3 **	0.63 **	295.4 **	126838 ns
Lines × Tester	8	2.3 ns	3.8 ns	0.10 ns	57.9 ns	66999 ns
Error	56	1.7	3.5	0.06	50.4	54024
VC (CV) (%)		5	14	10	21	17

VC: variation coefficient; DF: degrees of freedom; PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. F test: * ($p \leq 0.05$); ** ($p \leq 0.01$); ns: non-significant ($p > 0.05$). ❖ CV: coeficiente de variación; GL: grados de libertad; LP y AP: largo y ancho de la panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento de grano/panoja; GP: granos/panoja. Prueba de F: * ($p \leq 0.05$), ** ($p \leq 0.01$), ns: no significativo ($p > 0.05$).

Table 6. General combining ability of lines and testers of single cross sorghum hybrids. Average of irrigated and rainfed trials.

Cuadro 6. Aptitud combinatoria general de líneas y probadores de híbridos simples de sorgo. Promedio de experimentos de riego y seco.

Type	Traits				
	PL (LP)	PW (AP)	100GW (PCG)	GYP (RGP)	GP
Lines					
A1	29.5 a	14.0 a	2.5 ab	39.4 a	1571 a
A2	25.9 b	12.7 a	2.3 b	30.5 b	1321 b
A3	27.0 b	13.6 a	2.6 a	31.5 b	1235 b
A5	26.5 b	12.8 a	2.7 a	33.0 ab	1257 b
Testers					
R14	28.2 w	14.6 w	2.3 x	29.3 x	1269 w
R17	26.1 x	12.4 xy	2.7 w	39.6 w	1448 w
R19	28.2 w	13.8 wx	2.5 wx	31.8 x	1278 w
R25	26.1 x	11.9 y	2.4 wx	34.5 wx	1440 w

PL and PW: panicle length and width; 100GW: 100-grains weight; GYP: grain yield/panicle; GP: grains/panicle. Different letter(s) in each trait and within the same group denote statistical significance (Tukey, $p \leq 0.05$). ❖ LP y AP: largo y ancho de panoja; PCG: peso de 100 granos; RGP: rendimiento de grano/panoja; GP: granos/panoja. Letras diferentes en cada caracter y dentro del mismo grupo denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

width, while R17 performed best for grain yield/panicle, 100-grains weight and grains/panicle (Table 6). Significant differences for GCA in female and male parents of single cross hybrids and three-way sorghum hybrids were also found in earlier studies (Walsh and Atkins, 1973; Laosuwan and Atkins, 1977).

en condiciones de estrés ambiental. En estudios más recientes, los intervalos de heterosis media han fluctuado entre 103.9 y 155.4% para el rendimiento de grano/panoja, y de 103.2 a 119.8% para el peso de 100 granos; la correspondiente heterosis superior ha variado de 105.1 a 134.7% y de 105.6 a 118.2%, respectivamente (Jain y Patel, 2013).

The line \times tester interaction (estimate of the specific combining ability) was not significant ($p > 0.05$) for any trait (Table 5), thus testers identified the same best female parent. Walsh and Atkins (1973) neither found significant line \times tester interaction effects for grain yield, 100-grains weight, grains/panicle, plant height and days to flowering. In contrast, Laosuwan and Atkins (1977) found significant line \times tester interaction effects in single cross hybrids for grain yield, and for grains per panicle in three-way hybrids. As far as for SCA in sorghum is concerned, it is quite common to find significant differences for most of the agronomic traits (Gaikwad *et al.*, 2002; Kenga *et al.*, 2004; Knoll and Anderson, 2016). In accordance to Antuna *et al.* (2003), the GCA effects are related with additive effects while the SCA effects are related to dominant and epistatic effects. Therefore, a good line selection program as well as the identification of the best hybrids combinations determine the sorghum breeding program success. When the GCA effects are more important than the SCA effects, it is desirable to use recurrent selection methods (Hausmann *et al.*, 2012). On this regard, from 1960 to 1990, the International Crop Research Institute for the Semiarid Tropics (ICRISAT) generated 19 random mated populations with good agronomic performance (Reddy *et al.*, 2005). According to our results, it is convenient to apply recurrent selection methods to generate new cold tolerant sorghum lines, although recurrent selection in sorghum breeding programs is now in disuse due to its high field work involved and its long-term impact.

CONCLUSIONS

Single cross and three-way sorghum hybrids adapted to chilling conditions have a similar genetic and agronomic performance. The male sterile A1 line stands out for a high general combining ability. Three out of four 'R' lines yielded as much as the best hybrids, so these lines could be used as open pollinated varieties in the Mexican Highlands.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the scholarship granted to the first author by the National Council of Science and Technology of México (CONACYT).

Aptitud combinatoria general y específica

Las estimaciones de ACG de líneas y probadores para HS mostraron efectos significativos ($p \leq 0.05$) (Cuadro 5). En ambos tipos de híbridos los valores fueron de magnitud similar para la mayoría de los caracteres. Por lo tanto, los resultados de la aptitud combinatoria para híbridos simples (Cuadro 6) también pueden representar los correspondientes a los híbridos trilineales.

Entre las líneas, A1 destacó por sus valores más altos de ACG para longitud de la panoja, rendimiento de grano/panoja y granos/panoja; entre los probadores, R14 mostró una buena ACG para longitud y ancho de panoja, mientras que R17 tuvo el mejor valor para rendimiento de grano/panoja, peso de 100 granos y granos/panoja (Cuadro 6). En estudios iniciales (Walsh y Atkins, 1973; Laosuwan y Atkins, 1977) también se encontraron diferencias significativas para la ACG en progenitores femeninos y masculinos de híbridos simples y trilineales de sorgo.

La interacción línea \times probador (estimador de la aptitud combinatoria específica) no fue significativa ($p > 0.05$) para variable alguna (Cuadro 5), por lo que los probadores identificaron al mismo mejor progenitor femenino. Walsh y Atkins (1973) tampoco encontraron efectos significativos de interacción línea \times probador para el rendimiento de grano, peso de 100 granos, granos/panoja, altura de planta y días a floración. En contraste, Laosuwan y Atkins (1977) encontraron efectos significativos de interacción línea \times probador para rendimiento de grano en híbridos simples, y para granos/panoja en híbridos trilineales. En lo que respecta a la ACE en sorgo, es común encontrar diferencias significativas para la mayoría de los caracteres agronómicos (Gaikwad *et al.*, 2002; Kenga *et al.*, 2004; Knoll y Anderson, 2016). De acuerdo con Antuna *et al.* (2003), la ACG está relacionada con efectos aditivos, mientras que la ACE se relaciona con efectos de dominancia y epistáticos. Por lo tanto, el éxito de un programa de fitomejoramiento en sorgo depende de un buen esquema de selección de líneas, así como de la identificación de las mejores combinaciones de híbridos. Cuando los efectos de ACG son más importantes que los efectos de ACE, es deseable usar métodos de selección recurrente (Hausmann *et al.*, 2012). Al respecto, de 1960 a 1990, el Instituto Internacional de Investigación de Cultivos

LITERATURE CITED

- Almeida F., J. E., F. Dessaune T., M. D. Vilela R., F. Fonseca S., I. S. Correia G., and C. Beserra M. 2014. Genetic evaluation of grain sorghum hybrids in Brazilian environments using the REML/BLUP procedure. *Sci. Agric.* 71: 146-150.
- Antuna G., O., F. Rincón S., E. Gutiérrez R., N. A. Ruiz T., y L. Bustamante G. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 11-17.
- Cisneros-López, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, and V. A. González-Hernández. 2012. Male parent effects on stigma receptivity and seed set of sorghum A-lines under chilling field temperatures. *Plant Breed.* 131: 88-93.
- Cisneros-López, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, G. Mora-Aguilera, L. Córdova-Téllez, and M. Livera-Muñoz. 2007a. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41: 45-55.
- Cisneros-López, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, G. Mora-Aguilera, L. Córdova-Téllez, and M. Livera-Muñoz. 2007b. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. II: *Fusarium verticilloides* (Sacc.) Nirenberg effects on seed yield and its components under field conditions. *Agrociencia* 41: 283-294.
- Da Costa V., R., C. Casela R., L. Zambolim, F. Santos G., and F. X. Do Vale R. 2005. Evaluation of genetic mixtures of sorghum lines for anthracnose resistance management. *Fitopatol. Bras.* 30: 525-526.
- Galicia-Juárez, M., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, M. E. Cisneros-López, I. Benítez-Riquelme, and L. Córdova-Téllez. 2017. Heterosis and combining ability of seed physiological quality traits of single cross *vs.* three-way sorghum hybrids. *Acta Sci. Agron.* 39: 175-181.
- Gaikwad N., J., Y. R. Thete, G. D. Kanawade, V. J. Patil, and S. N. Kute. 2002. Selection of parents is based on combining ability in sorghum. *Indian J. Agric. Res.* 36: 141-144.
- Gnansounou, E., A. Dauriat, and C. E. Wyman. 2005. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Biores. Technol.* 96: 985-1002.
- Hausmann B., I. G., A. B. Obilana, P. O. Ayiecho, A. Blum, W. Schipprack, and H. H. Geiger. 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in a semi-arid area of Kenya. *Crop Sci.* 40: 319-329.
- Hausmann B., I. H. Fred R., E. Weltzien-Rattunde, P. S. C. Traoré, K. vom Brocke, and H. K. Parzies. 2012. Breeding strategies for adaptation of pearl millet and sorghum to climate variability and change in West Africa. *J. Agron. Crop Sci.* 198: 327-339.
- Jain K., S., and R. P. Patel. 2013. Heterosis studies for yield and its attributing traits in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Forage Res.* 39: 114-117.
- Jowett, D. 1972. Yield stability parameters for sorghum in East Africa. *Crop Sci.* 12: 314-317.
- Kenga, R., S. O. Alabi, and S. C. Gupta. 2004. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Res.* 88: 251-260.
- Knoll J., E., and W. F. Anderson. 2016. Yield components in hybrid versus inbred sweet sorghum. *Crop Sci.* 56: 1-9.
- León Velasco, H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana, and A. Martínez-Garza. 2009a. Evaluation para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) generó 19 poblaciones panmíticas de sorgo con buen comportamiento agronómico (Reddy *et al.*, 2005). De acuerdo con nuestros resultados, es conveniente aplicar métodos de selección recurrente para generar nuevas líneas de sorgo tolerantes al frío; sin embargo, la selección recurrente en los programas de mejoramiento de sorgo ahora está en desuso por el intenso trabajo de campo que involucra y porque su impacto es a largo plazo.

CONCLUSIONES

Los híbridos simples y trilineales de sorgo adaptados a las condiciones de frío matutino tienen un comportamiento genético y agronómico similar. La línea A1 androestéril destaca por una alta aptitud combinatoria general. Tres de las cuatro líneas 'R' rindieron tanto como los mejores híbridos, por lo que estas líneas podrían usarse como variedades de polinización libre en los Valles Altos Centrales de México.

—Fin de la versión en Español—



- of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Genetic variability and adaptability. *Agrociencia* 43: 483-496.
- León Velasco, H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana, and A. Martínez-Garza. 2009b. Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. II: Combining ability, heterosis and heterobeltiosis. *Agrociencia* 43: 609-623.
- Laosuan, P., and R. E. Atkins. 1977. Estimates of combining ability and heterosis in converted exotic sorghums. *Crop Sci.* 17: 47-50.
- Mahdy, E. E., M. A. Ali, and A. M. Mahmoud. 2011. The effect of environment on combining ability and heterosis in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Asian J. Crop Sci.* 3: 1-15.
- Mendoza-Onofre, L. E., M. E. Cisneros-López, M. Galicia-Juárez, y M. Hernández-Martínez. 2017. Líneas mantenedoras (líneas B) y restauradoras (líneas R) de sorgo granífero adaptadas a los Valles Altos Centrales de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 40: 107-110.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, F. Castillo-González, M. C. Mendoza-Castillo, H. Williams-Alanís, and M. Hernández-Martínez. 2000. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México. I: High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, V. A. González-Hernández, M. C. Mendoza-Castillo, H.

- Williams-Alanís, and M. Hernández-Martínez. 2001. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México. II: Río Bravo, Tamaulipas; y Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 35: 625-636.
- Osuna-Ortega, J., M. C. Mendoza-Castillo, and L. E. Mendoza-Onofre. 2003. Sorghum cold tolerance, pollen production, and seed yield in the Central High Valleys of Mexico. *Maydica* 48: 125-132.
- Patanothai, A., and R. E. Atkins. 1974. Yields stability of single crosses and three-way hybrids of grain sorghum. *Crop Sci.* 14: 287-290.
- Premalatha, N., N. Kumaravadivel, and P. Veerabathiran. 2006. Heterosis and combining ability for grain yield and its components in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Indian J. Gen.* 66: 123-126.
- Reddy B., V. S., S. Ramesh, and R. Ortiz. 2005. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. *In: Jules Janick* (ed). *Plant Breeding Reviews*. John Wiley & Sons. Inc. Volume 25: 139-172.
- Ross, W. M. 1969. Performance of three-way sorghum hybrids. *Proceedings Annual Corn-Sorghum Research Conference*. American Seed Trade Ass. 24: 129-134.
- Statistical Analysis System (SAS). 2002. SAS Institute. *SAS/STAT User's Guide*. Ver 8, 6th Ed. Cary, NC. USA.
- Sattar T., A., Z. Akram., G. Shabbir, K. Saifullah K., and M. Shahid I. 2014. Heterosis and combining ability studies for quantitative traits in fodder sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *J. Agric. Res.* 3: 329-337.
- Thakare D., P., R. B. Ghorade, and A. B. Bagade. 2014. Combining ability studies in grain sorghum using line \times tester analysis. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 3: 594-603.
- Valadez-Gutiérrez, J., L. E. Mendoza-Onofre, H. Vaquera-Huerta, L. Córdova-Téllez, M. C. Mendoza-Castillo, and G. García-de los Santos. 2006. Flowers thinning, seed yield and post-anthesis dry matter distribution in sorghum. *Agrociencia* 40: 303-314.
- Walsh E., J., and R. E. Atkins. 1973. Performance and within-hybrid variability of three-way and single crosses of grain sorghum. *Crop Sci.* 13: 267-271.
- Wilson, J. P., R. N. Gates, and M. S. Panwar. 2001. Dynamic multiline population approach to resistance gene management. *Phytopathology* 91: 255-260.

