

EVALUACIÓN DE DOS GENERACIONES DE HÍBRIDOS Y PROGENITORES DE SORGO TOLERANTES AL FRÍO. II: APTITUD COMBINATORIA, HETEROSIS Y HETEROBELTIOSIS

EVALUATION OF TWO GENERATIONS OF COLD TOLERANT SORGHUM HYBRIDS AND PARENTAL LINES. II: COMBINING ABILITY, HETEROSIS AND HETEROBELTIOSIS

Humberto León-Velasco¹, Leopoldo E. Mendoza-Onofre^{2*}, Fernando Castillo-González²,
Tarcicio Cervantes-Santana^{†2}, Ángel Martínez-Garza^{†2}

¹Universidad Autónoma de Chiapas. ²Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Montecillo, Estado de México (leopoldo@colpos.mx)

RESUMEN

En el Colegio de Postgraduados, México, se han formado dos generaciones de híbridos y progenitores experimentales de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tolerantes al frío, adaptados a los Valles Altos Centrales de México. En 1996 se establecieron cinco experimentos (tres con riego y dos de secano), a 2250 m de altitud, para estimar la aptitud combinatoria general (ACG) de las líneas, así como la heterosis y heterobeltiosis de los híbridos para rendimiento, peso y número de granos; y comparar el comportamiento *per se* vs. la ACG de las líneas. Cada experimento incluyó 12 híbridos de primera generación, 80 de segunda y sus progenitores respectivos, más cuatro testigos, en un diseño láctice cuadrado 11×11 con cuatro repeticiones, en parcelas de dos surcos de 3.0 m de longitud y 0.7 m de ancho con una planta cada 10 cm. Entre generaciones, en riego y secano, la ACG para rendimiento y peso de grano de las líneas B y R de 2ª generación fue superior. La mejor ACG para rendimiento de grano fue de las líneas B (9, 11, 1 y 7) y R (22, 17 y 19), en riego, y en secano de las líneas B (6, 3, 5 y 1) y R (20, 22, 14 y 16). En riego, el rendimiento *per se* de ambos tipos de líneas fue un buen estimador de la ACG. Los híbridos de 2ª generación presentaron más amplia heterosis y heterobeltiosis, para las tres variables, en ambas condiciones de humedad. En riego, el rendimiento de los cuatro mejores híbridos varió de 53 a 58 g/planta, su heterosis de 80 a 91 % y su heterobeltiosis de 47 a 77 %, mientras en secano las variaciones respectivas fueron de 16 a 19 g/planta, 127 a 148 %, y 109 a 146 %.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, aptitud combinatoria, heterobeltiosis, heterosis, tolerancia al frío.

INTRODUCCIÓN

La aptitud combinatoria general (ACG) es el comportamiento promedio de una línea en combinaciones híbridas y la aptitud combinatoria

ABSTRACT

Two generations of cold tolerant sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] experimental hybrids and parental lines adapted to the Mexican High Central Valleys were developed at the Colegio de Postgraduados, México. In 1996, five experiments were set up (three irrigated and two rain fed), at 2250 m of altitude, to estimate the general combining ability (GCA) of the lines, as well as the heterosis and heterobeltiosis of the hybrids for grain yield, seed weight and seed number; and to compare the *per se* response vs. the GCA of the lines. Each experiment included 12 first generation hybrids, 80 from the second and their corresponding parents, in addition to four testers, in an 11×11 square lattice design with four repetitions. Plots had two rows (3.0 m long and 0.7 m wide) with one plant each 10 cm. Among the two sorghum generations, under both irrigated and rain fed conditions, the GCA for grain yield and seed weight of the 2nd generation of B- and R- lines was higher. In the irrigated condition, the greatest GCA for grain yield was that of B- lines numbered as 9, 11, 1 and 7, and R lines numbered as 22, 17 and 19; while in rain fed, it was that of B- lines 6, 3, 5 and 1, and R-lines 20, 22, 14 and 16. Under irrigation, the grain yield *per se* of both types of lines was a good estimate of the GCA. The 2nd generation hybrids showed greater heterosis and heterobeltiosis, for the three variables, in both moisture conditions. Under irrigation, the yield of the best four hybrids varied from 53 to 58 g/plant, their heterosis from 80 to 91 % and their heterobeltiosis from 47 to 77 %, while under rain fed the respective variations were from 16 to 19 g/plant, 127 to 148 %, and 109 to 146 %.

Key words: *Sorghum bicolor*, combining ability, heterobeltiosis, heterosis, cold tolerance.

INTRODUCTION

The general combining ability (GCA) is the average response of a line in hybrid combinations and the specific combining ability (SCA) is the deviation of a cross with regards to the average response of their parents (Sprague and Tatum, 1942).

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2008. Aprobado: Abril, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 609-623. 2009.

específica (ACE) es la desviación de una crucea respecto al comportamiento promedio de los padres (Sprague y Tatum, 1942). Ambas son útiles para seleccionar progenitores e híbridos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] (Kenga *et al.*, 2004; Solanki *et al.*, 2007). En este cultivo, la ACG fue importante para mejorar el vigor de plántulas (Yu y Tuinstra, 2001), rendimiento y días a floración (Estrada y Ángeles, 1975). Se ha sugerido que el comportamiento *per se* de las líneas puede ser un buen estimador de la ACG (Orozco y Mendoza, 1983; Mendoza, 1988), por la correlación significativa entre ambos (Yu y Tuinstra, 2001).

La heterosis, sinónimo de vigor híbrido, es la manifestación de la superioridad del comportamiento de la F_1 respecto a la media de los padres (Goldman, 1999) y la heterobeltiosis es la superioridad del híbrido sobre el mejor progenitor (Fonseca y Patterson, 1968). En sorgo, la heterosis puede manifestarse mediante floración más precoz, mayor número de hojas, porte y amacollamiento, semillas más pesadas, mayor producción de grano (Tüsüz, 1997) y mayor velocidad de emergencia, vigor y peso seco de plántulas (Yu y Tuinstra, 2001; Cisneros-López *et al.*, 2007a). El híbrido de sorgo explota la heterosis de la crucea de una línea A androestéril con una línea R fértil restauradora de la fertilidad masculina. En México, la heterosis del rendimiento de híbridos susceptibles al frío formados con líneas introducidas de EE. UU. osciló de -24 a 176 % y la heterobeltiosis de -51 a 94 %, sin observar una asociación entre ambas ni con el rendimiento (Orozco y Mendoza, 1983). La floración del híbrido de sorgo es más semejante a la del progenitor hembra (Mendoza, 1983); mientras que la calidad, rendimiento, peso y número de semillas son más similares a las del progenitor macho (Cisneros-López *et al.*, 2007a, b). En EE. UU., la heterosis para rendimiento y número de granos fue 5.04 y 3.43 veces superior respectivamente a la del tamaño de grano; la heterobeltiosis fue alta y positiva para los primeros dos caracteres y negativa para el tamaño de grano (Peña *et al.*, 2004).

En Chapingo, Estado de México, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) inició en 1960 un programa genotécnico para producir variedades o híbridos tolerantes al frío (TF), adaptados a esas regiones. Para 1972 se habían derivado 746 líneas de introducciones africanas y de otros materiales (Ángeles, 1968; Livera y Carballo, 1976-1977); en 1981 se liberaron tres variedades (Romo, 1981), aunque finalmente sólo una (VA-110) estuvo disponible para los productores. Ante la necesidad de genotipos de mayor precocidad, uniformidad y rendimiento de grano que VA-110, en 1980, en el Colegio de Postgraduados (CP) se inició la formación de híbridos de sorgo TF

They are both useful for selecting parental lines and hybrids in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] (Kenga *et al.*, 2004; Solanki *et al.*, 2007). In this crop, the GCA was important to improve seedling vigor (Yu and Tuinstra, 2001), grain yield and days to flowering (Estrada and Ángeles, 1975). It has been suggested that *per se* response of the lines can be a good estimate of the GCA (Orozco and Mendoza, 1983; Mendoza, 1988), because of their significant correlation (Yu and Tuinstra, 2001).

Heterosis, synonym of hybrid vigor, is the superiority of the F_1 with regards to the parents' average (Goldman, 1999) and heterobeltiosis is the superiority of the hybrid over the best parent (Fonseca and Patterson, 1968). In sorghum, earliness, more leaves, taller plants, more tillers, heavier seeds, greater grain yield (Tüsüz, 1997) and faster seedling emergence, seed vigor and high seedling dry weight (Yu and Tuinstra, 2001; Cisneros-López *et al.*, 2007a) are examples of heterosis responses. The sorghum hybrid exploits the heterosis of a male-sterile A- line crossed to a male-fertile R- line that restores male-fertility. In México, heterosis for yield of cold sensitive hybrids developed with lines introduced from the USA oscillated from -24 to 176 % and heterobeltiosis from -51 to 94 %, without observing any association neither among them nor with yield (Orozco and Mendoza, 1983). Hybrid flowering is more similar to that of the female parent (Mendoza, 1983); while seed quality, grain yield, seed weight and seed number are more similar to the male parent (Cisneros-López *et al.*, 2007a, b). In the USA, heterosis for grain yield and seed number was 5.04 and 3.43 times higher, respectively, than for grain size; heterobeltiosis was high and positive for the first two traits and negative for grain size (Peña *et al.*, 2004).

In Chapingo, State of México, the Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) began a plant breeding program in 1960 to produce cold tolerant (CT) varieties or hybrids. By 1972, a total of 764 lines had been derived from African introductions and other materials (Ángeles, 1968; Livera and Carballo, 1976-1977); in 1981, three varieties were offered (Romo, 1981), although in the end, seed from only one (VA-110) was available to farmers. Due to the need of earlier flowering, more uniform plants and higher grain yielder genotypes than VA-110, the development of CT sorghum hybrids began in 1980 at the Colegio de Postgraduados (CP), and in 1990 the first 40 were evaluated (Mendoza-Onofre, 1992; Osuna-Ortega *et al.*, 2000). This group was called "first generation of CT sorghum hybrids". In 1992, a new group of B- and R- lines was available, of greater plant uniformity, longer panicle, larger

y en 1990 se evaluaron los primeros 40 (Mendoza-Onofre, 1992; Osuna-Ortega *et al.*, 2000). A este grupo se le denominó “primera generación de híbridos de sorgo TF”. En 1992 se disponía de un grupo nuevo de líneas B y R de mayor uniformidad de planta, panoja más larga, grano más grande y excersión de mayor longitud, con semejante o mayor precocidad que sus antecesoras. En 1995 se formó la “segunda generación de híbridos de sorgo TF”, cuyo rendimiento de grano y otras características agronómicas se evaluó conjuntamente con la primera generación y sus respectivos progenitores, en 1996 (León-Velasco *et al.*, 2009).

Los objetivos de esta investigación fueron estimar la ACG de las líneas, así como la heterosis y heterobeltiosis de dos generaciones de híbridos para rendimiento, peso y número de granos; y comparar el comportamiento *per se* vs. la ACG de las líneas. Se espera que exista variabilidad genética de naturaleza aditiva para rendimiento, peso y número de granos entre los progenitores de ambas generaciones; que el comportamiento *per se* de las líneas estime la respectiva ACG; que la 2ª generación de líneas supere a la 1ª en ACG; y que la heterosis y heterobeltiosis de la 2ª generación de híbridos sea mayor que las de la 1ª.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el Cuadro 1 se presentan las características principales de los ambientes de evaluación.

La siembra fue manual, en seco y a chorrillo en el fondo del surco. Se dejó una plántula cada 10 cm (142 850 plantas ha⁻¹). Los experimentos con riego tuvieron humedad óptima y los de secano quedaron expuestos a la precipitación pluvial (Cuadro 1). En riego se abonó con 120 kg N y 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ y en secano con 80 kg N y 40 kg P₂O₅ ha⁻¹; todo el P₂O₅ y la mitad de N se aplicó a la siembra y el resto en el aporque. La escarda y el aporque fueron 40 y 60 d después de la siembra.

En cada experimento se evaluaron 12 híbridos y sus progenitores (tres líneas B y cuatro líneas R) de 1ª generación; 80 híbridos y sus progenitores (ocho líneas B y 10 líneas R) de 2ª generación; y

grain and greater length exertion, with similar or earlier flowering than their antecessors. The “second generation of CT sorghum hybrids” was developed in 1995, whose grain yield and other agronomic traits were evaluated together with the first generation and their corresponding parental lines in 1996 (León-Velasco *et al.*, 2009).

The objectives of this study were to estimate the GCA of the lines, as well as the heterosis and heterobeltiosis of two generations of hybrids, for grain yield, seed weight and seed number; and to compare the *per se* response vs. the GCA of the lines. We expected genetic variability of an additive nature for grain yield, seed weight and seed number among the parents of both generations. It was also assumed that the *per se* line response is a good estimate of the corresponding GCA; that the 2nd generation of lines will outperform the 1st in GCA; and that heterosis and heterobeltiosis of the 2nd generation of hybrids will be greater than those of the 1st.

MATERIALS AND METHODS

The main characteristics of the evaluation environments are shown in Table 1.

Sowing was manual, in dry conditions, and seeds were placed at the bottom of the row. A plant was left each 10 cm (142 850 plants ha⁻¹). The irrigated experiments had optimal soil moisture, while the rain fed were exposed to rainfall only (Table 1). Under irrigation, 120 kg N and 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ were applied, and 80 kg N and 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ in the rain fed experiments; all the P₂O₅ and half the N were applied at sowing and the rest at hilling. Weeding and hilling were applied at 40 and 60 d after sowing.

In each experiment, 12 hybrids and their 1st generation parents (three B- lines and four R- lines); 80 hybrids and their 2nd generation parents (eight B- lines and ten R- lines); and four testers (VA-110, L-88, RB-4000 and Purépecha) were evaluated. Lines A- and B- were isogenic pairs. The 121 genotypes were allocated in an 11×11 square lattice design with four repetitions. The experimental plot had two rows, 3.0 m long and 0.7 m wide.

Cuadro 1. Características de los cinco ambientes de evaluación en Valles Altos Centrales de México. 1996.
Table 1. Characteristics of the five evaluation environments in the Mexican High Central Valleys. 1996.

Exp	Localidad	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (m)	Siembra		Textura	pH	MO (%)	PP (mm)	Helada (Fecha [†])
					Condición	Fecha					
1	Sta. Lucía	19° 29'	98° 54'	2250	Riego	09/05	M-A-A-	7.0-7.3	1-2	431	15-20/10
2	Tecámac	19° 43'	98° 56'	2260	Riego	15/05	Arcilla	7.2-7.6	2-3	326	12-19/10
3	Montecillo	19° 29'	98° 54'	2250	Riego	16/05	Arcilla	8.0-8.3	1-3	426	15-20/10
4	Montecillo	19° 29'	98° 54'	2250	Secano	10/06	Arcilla	8.0-8.3	1-3	370	15-20/10
5	Tecámac	19° 43'	98° 56'	2260	Secano	12/06	Arcilla	7.2-7.6	2-3	320	12-19/10

Exp, experimento; M-A-A-, migajón-arcillo-arenosa; pH, potencial hidrógeno; MO, materia orgánica; y PP, precipitación pluvial (durante el ciclo de cultivo). [†] Intervalo de las tres primeras heladas.

cuatro testigos (VA-110, L-88, RB-4000 y Purépecha). Las líneas B fueron las isogénicas de las líneas A. Los 121 genotipos se distribuyeron en un diseño látice cuadrado 11×11 con cuatro repeticiones. La parcela experimental tuvo dos surcos de 3 m de largo y 0.7 m de ancho.

En 20 plantas representativas y con competencia completa, por parcela, se midió el rendimiento de grano (RG, en g/planta, con 12 % de humedad); peso de 100 granos (PG, en g, promedio de ocho submuestras de 100 granos elegidos al azar) y número de granos por panoja (NG = 100 × RG/PG).

El análisis de varianza (ANVA) (SAS, 1999-2000) combinado para cada variable se desglosó de manera anidada, con el PROC GLM, en tres partes: la primera, debida a la variación entre los grupos de genotipos, la segunda, a genotipos dentro de cada grupo y, la tercera, a genotipos individuales (León-Velasco *et al.*, 2009). La ACG para cada variable y progenitor, se estimó con base en el promedio aritmético de los híbridos que tenían a ese progenitor en común. La separación de medias, ajustadas con LSMEANS, fue con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La heterosis se calculó con la fórmula: Heterosis = Rendimiento de la F_1 - Media de los padres, en porcentaje con respecto a la media de los progenitores (Falconer, 1970), y la Heterobeltiosis = Rendimiento de la F_1 - Media del progenitor superior, también en porcentaje, con respecto a la media de este progenitor (Fonseca y Patterson, 1968). En cada generación de líneas B y R se aplicó análisis de regresión lineal (PROC REG) entre el comportamiento *per se* de cada variable de la línea vs. su correspondiente ACG; además, en cada generación de híbridos se aplicó análisis de correlación simple (PROC CORR) entre las heterosis o heterobeltiosis de las tres variables, así como entre rendimiento, heterosis y heterobeltiosis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aptitud combinatoria general

Experimentos con riego

En esta condición ambiental, no hubo información de seis híbridos (7.5 % del total) de 2^a generación debido a escasa nacencia, por lo que la estimación de la ACG de las líneas 2, 11 (B), 16, 20, 21, 22 y 23 (R) podría presentar alguna imprecisión, sobre todo de la hembra 11, representada con 5 de sus 10 cruas; sin embargo, Serrano *et al.* (1994) demuestran que cuando se evalúa un arreglo de cruas dialélicas que incluya progenitores, la confiabilidad de los parámetros genéticos no se modifica al excluir 10 % de cruas, y hasta 30 % si el interés es evaluar los efectos de progenitores.

El comportamiento *per se* de los progenitores para rendimiento de grano por planta, peso de 100 granos y granos por panoja, con base en el promedio de los tres experimentos de riego, dentro de cada generación, fue diferente ($p \leq 0.05$), excepto para PG en las líneas R de

In 20 fully competitive and representative plants per plot, grain yield was measured (GY, g/plant, with 12 % moisture); as well as the 100-seeds weight (SW, g, average of eight sub-samples of 100 seeds randomly chosen), and seed number per panicle (SN = 100 × GY/SW).

The combined analysis of variance (ANOVA) (SAS, 1999-2000) for each variable was broken down in a nested model, with PROC GLM, in three parts: the first, due to the variation between genotype groups; the second, due to the genotypes within each group; and the third, due to individual genotypes (León-Velasco *et al.*, 2009). The GCA for each variable and parental line was estimated based on the arithmetic average of the hybrids which had that parent in common. The means comparison adjusted with LSMEANS was carried out by Tukey ($p \leq 0.05$). The heterosis was calculated with the formula: Heterosis = Yield of the F_1 - Mean of the parents, in percentage with regards to the parental mean (Falconer, 1970), and the Heterobeltiosis = Yield of the F_1 - Mean of the superior parent, also in percentage, with regards to the mean of this parent (Fonseca and Patterson, 1968). In each generation of B- and R- lines a linear regression analysis was performed (PROC REG) between the *per se* response of each variable in the line vs. its corresponding GCA; in addition, in each generation of hybrids a simple correlation analysis (PROC CORR) was applied between the heterosis or heterobeltiosis of the three variables, as well as between yield, heterosis and heterobeltiosis.

RESULTS AND DISCUSSION

General combining ability

Irrigated experiments

Under this environmental condition, there was no information for six 2nd generation hybrids (7.5 % of the total) due to scarce seedling emergence; thus, estimation of the GCA of the B- lines 2 and 11; and R- lines 16, 20, 21, 22 and 23 could show some imprecision, especially for female 11, represented by 5 of its 10 crosses. However, Serrano *et al.* (1994) show that when an arrangement of diallel crosses including parents is evaluated, genetic parameters reliability is not modified when 10 % of the crosses are excluded, and up to 30 % if the interest is evaluating the effects of parents.

The *per se* response of the parental lines for grain yield per plant, 100-seeds weight and seeds per panicle, based on the average of the three irrigated experiments, was different ($p \leq 0.05$) within each generation, except for SW in the 1st generation R-lines (Table 2). In the case of females (B- lines), the GY, SW and SN of the two generations were similar ($p < 0.05$), and on average they differed in 5 %. Male parents (R- lines) of the 2nd generation were superior to those of the 1st generation in GY (39 %) and SW

Cuadro 2. Comportamiento *per se* y aptitud combinatoria general de las líneas progenitoras de dos generaciones de híbridos de sorgo. Promedios de tres experimentos con riego.
Table 2. *Per se* response and general combining ability of parental lines in two generations of sorghum hybrids. Averages over three irrigated experiments.

Línea	Rendimiento (g/planta)		Peso de 100 granos (g)		Número de granos	
	<i>Per se</i>	ACG	<i>Per se</i>	ACG	<i>Per se</i>	ACG
Hembra B						
Primera generación						
28	34.82 a	39.91 a	2.28 a	1.92 a	1504 a	2104 a
29	26.27 b	35.73 b	1.66 b	1.78 a	1609 a	2075 a
30	21.47 b	33.26 c	1.85 b	1.88 a	1160 b	1804 b
Media	27.52	36.3	1.93	1.86	1424	1994
DSH ¹	5.93	2.08	0.26	0.18	295	104
Segunda generación						
9	31.13 a	53.93 a	1.46 e	2.46 d	2179 a	2195 a
11	29.38 ab	50.76 b	1.95 ab	2.84 a	1522 b	1759 e
1	23.84 c	50.70 b	1.65 de	2.42 d	1447 b	2103 b
7	29.49 ab	49.09 bc	2.12 a	2.63 bc	1408 b	1869 cd
2	25.08 bc	48.18 c	1.90 b	2.51 cd	1329 b	1914 c
3	25.31 bc	47.88 cd	1.96 ab	2.69 ab	1320 b	1795 de
5	24.51 c	46.32 de	1.70 cd	2.56 b-d	1444 b	1828 c-e
6	24.21 c	45.77 e	1.86 bc	2.62 bc	1322 b	1759 e
Media	26.62	49.08	1.82	2.59	1497	1903
DSH ¹	4.63	1.82	0.20	0.16	231	91
Macho R						
Primera generación						
34	32.20 a	37.59 a	1.36 a	1.92 a	2385 a	1996 a
33	31.36 a	36.93 ab	1.28 a	1.85 a	2451 a	2093 a
31	29.29 a	35.22 ab	1.40 a	1.80 a	2132 b	1985 ab
32	24.89 b	34.40 b	1.41 a	1.86 a	1812 c	1902 b
Media	29.43	36.04	1.36	1.86	2195	1994
DSH ¹	3.82	2.64	0.17	0.23	190	131
Segunda generación						
22	53.30 a	53.17 a	2.59 b	2.48 de	2059 a	2148 a
17	32.15 ef	52.26 ab	2.90 a	2.89 a	1125 d	1829 cd
19	39.57 cd	51.97 ab	2.54 bc	2.77 ab	1554 c	1898 c
16	48.10 ab	50.92 bc	2.54 bc	2.51 c-e	1913 ab	2040 b
20	48.74 ab	50.82 bc	2.29 de	2.47 de	2138 a	2056 ab
23	43.13 bc	49.88 c	2.53 b-d	2.42 ef	1704 bc	2050 ab
25	42.17 c	47.79 d	1.98 f	2.67 bc	2150 a	1769 d
15	37.79 c-e	46.96 d	2.32 c-e	2.58 c-e	1619 c	1851 cd
14	35.63 de	45.77 d	2.23 e	2.62 b-d	1604 c	1765 d
21	28.63 f	40.76 e	2.58 b	2.26 f	1137 d	1802 cd
Media	40.92	49.03	2.45	2.57	1700	1921
DSH ¹	5.66	2.08	0.25	0.18	282	104
DSH ²	2.60		0.114		129	

Valores con diferentes letras en la columna de cada grupo de líneas y en cada generación son diferentes ($p \leq 0.05$). DSH¹, DSH², diferencia significativa honesta dentro de cada grupo y entre promedios de grupos.

1^a generación (Cuadro 2). En el caso de las hembras (líneas B) el RG, PG y NG de las dos generaciones fueron semejantes ($p > 0.05$), y en promedio difirieron en 5 %. Los progenitores masculinos (líneas R), de 2^a generación fueron superiores a los de la 1^a generación en RG (39 %) y PG (80 %), pero inferiores en NG (23 %); la superioridad del RG se atribuye a la contribución del PG y el decremento en NG se explica por

(80 %), but inferior in SN (23 %). The higher GY is attributed to the contribution of the SW while the decrease in SN is explained by the inverse relation with SW that both yield components usually present (Maman *et al.*, 2004).

The differences in GCA within parental type (female or male) in each generation were significant ($p \leq 0.05$), except for seed weight in the 1st generation

la relación inversa con PG que generalmente presentan ambos componentes del rendimiento (Maman *et al.*, 2004).

Las diferencias de ACG dentro de tipo de progenitor (hembra o macho) de cada generación fueron significativas ($p \leq 0.05$), excepto para peso de grano en las líneas B y R de 1ª generación (Cuadro 2). En las hembras, en la 1ª generación destaca la ACG de la Línea 28, y en la 2ª la Línea 9, pues sus híbridos se ubicaron en el grupo superior ($p > 0.05$) de RG y NG. En los machos, en la 1ª generación las Líneas 34, 33 y 31 forman el grupo superior de significancia en ACG para rendimiento y número de granos, mientras en la 2ª lo forman las Líneas 22, 17 y 19 para rendimiento. Estos resultados demuestran la presencia de variabilidad genética de la ACG de los progenitores de ambas generaciones para rendimiento y granos por panoja.

Entre generaciones, el promedio de la ACG de ambos tipos de líneas de 2ª generación fue superior ($p \leq 0.05$) en rendimiento (35 %) y peso de grano (39 %), sin diferencias en el número de granos por panoja (Cuadro 2). Estos resultados confirman el progreso logrado por mejoramiento genético en las líneas B y R (León-Velasco *et al.*, 2009) y demuestran que la 2ª generación de líneas es superior a la 1ª en ACG.

Asociación de ACG con la expresión *per se* de progenitores

La precisión de las regresiones puede diferir pues la 1ª generación se compone de 12 híbridos, mientras en la 2ª fueron 74; no obstante, las tendencias son semejantes. Los coeficientes de regresión indicaron una relación positiva entre el rendimiento *per se* y su respectiva ACG para las líneas B de 1ª [$RG_{ACG} = 22.62 + 0.497 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 1.0^{**}$, $p \leq 0.01$, $CV = 0.2\%$] y 2ª generación [$RG_{ACG} = 31.36 + 0.666 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.52^*$, ($p \leq 0.05$), $CV = 4\%$]; *i. e.*, por cada gramo diferencial del rendimiento de las líneas B de 1ª generación la ACG se incrementó en 0.497 g; mientras en la 2ª generación la ACG aumentó 0.666 g. La misma tendencia ocurrió en las regresiones para peso y número de granos *per se* vs. sus respectivas ACG; que si bien en la 1ª generación no fueron significativas, presentaron buen ajuste al modelo ($R^2 = 0.81$ y $R^2 = 0.90$) y en la 2ª generación resultaron significativas al 10 y 5 %. Así pues, el rendimiento *per se* de las dos generaciones de líneas B es un estimador aceptable de su ACG.

En las líneas restauradoras sólo el rendimiento *per se* de ambas generaciones fue buen estimador de su ACG:

B- and R- lines (Table 2). In the females, the GCA of Line 28 stands out in the 1st generation and Line 9 in the 2nd, since their hybrids were in the superior group ($p > 0.05$) for GY and SN. The restorer Lines 34, 33 and 31 of the 1st generation were in the superior group in GCA for yield and seed number, while Lines 22, 17 and 19 of the 2nd generation were for yield. These results prove the presence of genetic variability of the GCA in the parents of both generations for grain yield and seeds per panicle.

Between generations, the average of GCA in both types of 2nd generation lines was higher ($p \leq 0.05$) in yield (35 %) and seed weight (39 %), without differences in seeds per panicle (Table 2). These results confirm the progress attained in the genetic improvement of the B- and R- lines (León-Velasco *et al.*, 2009), and they demonstrate that the 2nd generation of lines is superior to the 1st in GCA.

Association of GCA with the *per se* response of the parental lines

The precision of the regressions could differ because the 1st generation is made up of 12 hybrids, while there were 74 in the 2nd; however, tendencies are similar. The regression coefficients indicate a positive relation between yield *per se* and its corresponding GCA for the 1st generation B- lines [$GY_{GCA} = 22.62 + 0.487 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 1.0^{**}$, $p \leq 0.01$, $VC = 0.2\%$] and 2nd generation B- lines [$GY_{GCA} = 31.36 + 0.666 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.52^*$, $p \leq 0.05$, $VC = 4\%$]; *i. e.*, for each differential gram in grain yield for the 1st generation B- lines, the GCA increased in 0.497 g; while in the 2nd generation the GCA increased 0.666 g. The same tendency occurred in the regressions for seed weight and seed number *per se* vs. their corresponding GCA's; although in the 1st generation they were not significant, they showed good model adjustment ($R^2 = 0.81$ and $R^2 = 0.90$), and in the 2nd generation they were significant at 10 and 5 %. Thus, yield *per se* of the two generations of B- lines is an acceptable estimate of their GCA.

In the restorer lines, only the grain yield *per se* of both generations was a good estimator of their GCA: [$GY_{GCA} = 23.56 + 0.424 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.88+$, $p \leq 0.10$, $VC = 2\%$] in the 1st, and [$GY_{GCA} = 35.99 + 0.319 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.43^*$, $VC = 6\%$] in the 2nd generation. Mendoza (1988), when evaluating 13 females, 18 males and their corresponding sorghum hybrids, also indicates that yield *per se* of the lines can be used as a criterion to select female ($R = 0.68^{**}$) and male ($R = 0.61^{**}$) parents with high GCA.

[$RG_{ACG} = 23.56 + 0.424 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.88^+$, $p \leq 0.10$, $CV = 2\%$] en la 1^a, y [$RG_{ACG} = 35.99 + 0.319 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.43^*$, $CV = 6\%$] en la 2^a generación. Mendoza (1988), al evaluar 13 hembras, 18 machos y sus respectivos híbridos de sorgo, también indica que el rendimiento *per se* de las líneas puede servir como criterio para seleccionar progenitores femeninos ($r = 0.68^{**}$) y masculinos ($r = 0.61^{**}$) de alta ACG.

Experimentos en secano

En esta condición ambiental hubo dos líneas B (67 % del total) y un híbrido de 1^a generación (8.3 %) que no produjeron grano, por lo que los resultados de este grupo de líneas no se discutirán. En el caso de las líneas R, hubo dos de 2^a generación (20 % del total) que no produjeron grano pero todos los híbridos de esa generación llegaron a madurez fisiológica.

El promedio general del rendimiento de híbridos y progenitores en la condición de secano disminuyó 77 %, comparado con la de riego. Al desglosar por generaciones, el rendimiento de los híbridos y las líneas B y R se redujo en 78, 80 y 87 % en la 1^a generación, así como en 75, 72 y 79 % en la 2^a (Cuadros 2 y 3). VA-110 fue el mejor testigo y disminuyó 67 % (León-Velasco *et al.*, 2009). La misma tendencia se observó para PG y NG, aunque en menor cuantía, excepto para PG de híbridos y machos de 2^a generación. Estas drásticas disminuciones fueron consecuencia de las heladas que acortaron la etapa de llenado de grano, con mayor efecto en los genotipos más tardíos (León-Velasco *et al.*, 2009). Sin embargo, los genotipos de 2^a generación redujeron menos su rendimiento (75 %) que los de la 1^a generación (81 %), sobre todo las líneas *per se* (75 vs. 83 %). Al respecto, los criterios de selección por tolerancia al frío aplicados, se basan en una alta proporción de polen fértil (medido indirectamente por un mayor llenado de grano en la panojas autofecundadas), precocidad y rendimiento. Es decir, la tolerancia a heladas, como tal, no está contemplada como criterio de selección.

Respecto al comportamiento *per se*, en la 1^a generación no hubo diferencias significativas entre las líneas R para RG, PG y NG. En la 2^a generación, se observan diferencias significativas para PG entre líneas B, así como para RG, PG y NG entre líneas R (Cuadro 3). Entre las B de 2^a generación destacan las Líneas 3 y 7 en PG. Entre líneas R, las de 2^a generación fueron mejores en RG (131 %) y PG (38 %), como ocurrió en riego, pero en esta condición también fueron superiores en NG (55 %); en consecuencia, la superioridad del RG se debe a la contribución de ambos componentes (Peña *et al.*, 2004).

Rain fed experiments

Under this environmental condition, there were two B- lines (67 % of the total) and one 1st generation hybrid (8.3 %) that did not produce grain, thus results of this group of lines will not be discussed. In the case of the R- lines, there were two 2nd generation ones (20 % of the total) that did not produce grain but all the hybrids in that generation reached physiological maturity.

The general average of hybrid and parental lines grain yield under rain fed conditions decreased 77 % when compared to that irrigated. When broken down in generations, the yield of hybrids and the B- and R- lines was reduced in 78, 80 and 87 % in the 1st generation, and 75, 72 and 79 % in the 2nd (Tables 2 and 3). VA-110 was the best control test and decreased in 67 % (León-Velasco *et al.*, 2009). The same trend was observed for SW and SN, although to a lesser degree, except for the SW of 2nd generation hybrids and males. These drastic decreases were due to frosts that shortened the grain filling period, with greater effect in the late flowering genotypes (León-Velasco *et al.*, 2009). However, the 2nd generation genotypes decreased less their grain yield (75 %) than those from the 1st generation (81 %), especially the lines *per se* (75 vs. 83 %). In this regard, the selection criteria applied for cold tolerance during the breeding program are based on a high proportion of fertile pollen (measured indirectly by a high seed set in self-pollinated panicles), early flowering and grain yield. That is, frost tolerance, as such, is not taken into account as a selection criterion.

Regarding the *per se* response, in the 1st generation there were no significant differences among R- lines for GY, SW and SN. In the 2nd generation, significant differences are observed for SW among B- lines, as well as for GY, SW and SN among the R- lines (Table 3). Among B- lines of the 2nd generation, Lines 3 and 7 stand out in SW. Among R- lines, those of the 2nd generation were better in GY (131 %) and SW (38 %), as occurred under irrigation, but in this condition they were also superior in SN (55 %); consequently, the superiority of the GY is due to the contribution of both yield components (Peña *et al.*, 2004).

The differences in GCA of the three variables within parental types (female or male) were significant ($p \leq 0.05$) in the 2nd generation and in the 1st only for SN in males (Table 3). In the 2nd generation females, the extreme values for GY, SW and SN contrast at 58, 26 and 39 %; Lines 6, 3, 5 and 1 make up the best group in significance because of their GCA in GY. Regarding the restorer lines, in the 1st generation the extreme GCA's for GY, SW and SN differ in 31,

Cuadro 3. Comportamiento *per se* y aptitud combinatoria general de las líneas progenitoras de dos generaciones de híbridos de sorgo. Promedios de dos experimentos de secano.
Table 3. *Per se* response and general combining ability of parental lines in two generations of sorghum hybrids. Averages over two rain fed experiments.

Línea	Rendimiento (g/planta)		Peso de grano (g)		Número de granos	
	<i>Per se</i>	ACG	<i>Per se</i>	ACG	<i>Per se</i>	ACG
Hembra B						
Primera generación						
30	--	8.74 a	--	1.26 a	--	682 a
29	5.53 -	8.49 a	1.08 -	1.16 ab	529 -	753 a
28	--	7.42 a	--	0.97 b	--	675 a
Media		8.22		1.13		703
DSH ¹		1.99		0.21		149
Segunda generación						
6	9.13 a	13.72 a	1.36 bc	1.51 a	682 a	903 b
3	6.75 a	13.70 a	1.61 a	1.52 a	387 a	892 b
5	7.48 a	13.56 a	1.26 cd	1.45 a	591 a	920 ab
1	6.76 a	12.62 ab	1.28 cd	1.27 b	550 a	994 a
7	8.27 a	12.32 b	1.54 ab	1.45 a	511 a	849 b
2	7.14 a	12.18 b	1.23 cd	1.32 b	569 a	926 ab
9	7.01 a	10.90 c	1.07 d	1.21 b	636 a	904 b
11	7.84 a	8.68 d	1.19 cd	1.22 b	642 a	714 c
Media	7.55	12.21	1.32	1.37	571	888
DSH ¹	4.63	1.19	0.24	0.12	347	89
Macho R						
Primera generación						
31	4.03 a	9.32 a	0.72 a	1.16 a	677 a	825 a
32	3.91 a	9.27 a	0.91 a	1.24 a	452 a	709 ab
34	2.81 a	7.92 a	0.75 a	1.10 a	507 a	685 ab
33	4.01 a	7.11 a	0.83 a	1.11 a	357 a	605 b
Media	3.69	8.41	0.80	1.15	498	706
DSH ¹	6.65	2.54	0.35	0.27	497	190
Segunda generación						
20	7.26 ab	14.67 a	0.93 c	1.34 b-d	756 ab	1107 a
22	10.90 a	14.47 a	1.26 ab	1.36 a-c	859 ab	1063 ab
14	9.92 ab	13.99 a	1.25 ab	1.50 a	799 ab	936 cd
16	10.19 ab	13.83 a	1.14 a-c	1.42 a-c	937 a	962 bc
19	--	12.24 b	--	1.45 ab	--	858 de
17	--	11.99 b	--	1.46 ab	--	798 e
15	8.30 ab	11.11 bc	0.97 c	1.36 a-c	883 ab	809 e
25	7.07 ab	10.92 bc	1.02 bc	1.28 cd	717 ab	827 e
23	6.04 b	10.48 c	0.94 c	1.20 d	561 b	879 c-e
21	8.46 ab	8.49 d	1.29 a	1.32 b-d	684 ab	640 f
Media	8.51	12.22	1.1	1.37	774	888
DSH ¹	4.84	1.39	0.25	0.15	362	104
DSH ²	4.48		0.23		328	

Valores con diferentes letras en la columna de cada grupo de líneas y en cada generación son diferentes ($p \leq 0.05$). DSH¹, DSH², diferencia significativa honesta dentro de cada grupo y entre promedios de grupos.

Las diferencias de ACG de las tres variables dentro de tipo de progenitores (hembra o macho) fueron significativas ($p \leq 0.05$) en la 2^a generación y en la 1^a sólo para el NG de los machos (Cuadro 3). En las hembras de 2^a generación, los valores extremos para RG, PG y NG contrastan en 58, 26 y 39 %; las Líneas 6, 3, 5 y 1 integran el mejor grupo de significancia por su ACG en RG. Referente a los machos, en la 1^a generación las ACG's extremas para RG, PG y NG

13 and 36 %, being Lines 31, 32 and 34 the superior group for SN ($p \leq 0.05$). In the 2nd generation, the extreme GCA's for GY, SW and SN differ in 73, 25 and 73 %; Lines 20, 22, 14 and 16 make up the group with superior yield.

Between generations, the behavior of GCA in both parental types partially concurs with what was observed under irrigation, since the 2nd generation was superior ($p \leq 0.05$) in GY (48 %), SW (21 %) and

divergen en 31, 13 y 36 %, donde las Líneas 31, 32 y 34 hacen el grupo superior ($p \leq 0.05$) en NG. En la 2ª generación, las ACG's extremas para RG, PG y NG difieren en 73, 25 y 73 %; las Líneas 20, 22, 14 y 16 forman el grupo de rendimiento superior.

Entre generaciones, el comportamiento de la ACG de ambos tipos de líneas concuerda parcialmente con lo observado en riego, pues la 2ª generación fue superior ($p \leq 0.05$) en RG (48 %), PG (21 %) y NG (26 %); la superioridad del RG se debe en mayor medida a la contribución de sus dos componentes en las líneas R, lo que confirma que el progreso logrado por mejoramiento genético de las líneas se manifiesta en ambas condiciones de humedad.

Al comparar las dos condiciones de humedad, la ACG del RG de las líneas B cambió de orden en alto grado, infiriéndose que en este tipo de líneas existe una fuerte interacción genotipo \times ambiente. En las líneas R hubo cambios de orden menos drásticos, especialmente en las de 2ª generación; es decir, fueron más consistentes en ambas condiciones, por lo que se deduce que su interacción con el ambiente es menor.

En conclusión, aunque el programa de formación de híbridos de sorgo TF del CP ha sido efectivo en el mejoramiento y la selección de líneas nuevas de sorgo, es necesaria una inversión adicional de tiempo y recursos para exponer los genotipos más precoces de la 2ª generación en ambientes de secano con alta probabilidad de heladas tempranas para delimitar su área de adaptación.

Asociación de ACG con la expresión *per se* de progenitores

En esta condición ambiental, el coeficiente de regresión entre rendimiento *per se* de las líneas B de 2ª generación y su ACG no fue significativo [$RG_{ACG} = 11.40 + 0.116 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.003$, $CV = 15\%$] y tampoco para NG ($R^2 = 0.03$); sólo se observó relación positiva y significativa entre peso de grano *per se* y su ACG [$PG_{ACG} = 0.614 + 0.574 (PG_{per\ se})$; $R^2 = 0.65^*$, $CV = 6\%$]. En contraste, los coeficientes de regresión entre rendimiento *per se* y su ACG para las líneas R de 1ª [$RG_{ACG} = 6.58 + 0.494 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.07$, $CV = 15\%$] y 2ª generación [$RG_{ACG} = 6.32 + 0.696 (RG_{per\ se})$; $R^2 = 0.27$, $CV = 17\%$] fueron más altos y positivos pero no significativos, al igual que para PG ($R^2 = 0.43$ y $r^2 = 0.27$) y NG ($R^2 = 0.12$, en 2ª generación). Sin embargo, el NG *per se* y la ACG de las líneas R de 1ª generación mostraron relación lineal positiva y significativa [$NG_{ACG} = 381.79 + 0.651(NG_{per\ se})$; $R^2 = 0.92^*$, $CV = 4\%$]. Por tanto, en secano el comportamiento *per se* de las líneas no fue tan buen estimador de su ACG, como en riego.

SN (26 %). The superiority of the GY is due primarily to the contribution of their two grain yield components in the R- lines. Thus, the progress achieved through genetic improvement of the lines is evident in both moisture conditions.

When comparing the two moisture conditions, the GCA for GY of B- lines changed its order to a high degree, thus inferring that in this type of lines there is a strong genotype \times environment interaction. The change of order of the R- lines were less drastic, especially those from the 2nd generation; that is, the GCA for grain yield of the R- lines was more consistent in both conditions, so we can deduce that they interacted less with the environment.

In conclusion, although the breeding program of CT sorghum hybrids has been effective in improving and selecting new sorghum lines, an additional investment in time and resources is necessary in order to expose the early flowering genotypes of the 2nd generation to rain fed environments in which a high probability of early frosts occur so as to specify their adaptation area.

Association of GCA with *per se* responses of the parental lines

Under this environmental condition, the regression coefficient between grain yield *per se* of the B- lines of the 2nd generation and its GCA was not significant [$GY_{GCA} = 11.40 + 0.116 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.003$, $VC = 15\%$] and it was not either for SN ($R^2 = 0.03$); a positive and significant relation was only observed between seed weight *per se* and its GCA [$SW_{GCA} = 0.614 + 0.574 (SW_{per\ se})$; $R^2 = 0.65^*$, $VC = 6\%$]. In contrast, the regression coefficients between yield *per se* and its GCA for the R- lines of the 1st [$GY_{GCA} = 6.58 + 0.494 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.07$, $VC = 15\%$] and 2nd generation [$GY_{GCA} = 6.32 + 0.696 (GY_{per\ se})$; $R^2 = 0.27$, $VC = 17\%$] were higher and positive but not significant, just like for the SW ($R^2 = 0.43$ and $R^2 = 0.27$) and SN ($R^2 = 0.12$, in the 2nd generation). However, the SN *per se* and the GCA of the R- lines in the 1st generation showed a positive and significant linear relation [$SN_{GCA} = 381.79 + 0.651(SN_{per\ se})$; $R^2 = 0.92^*$, $VC = 4\%$]. Therefore, under rain fed, the behavior *per se* of the lines was not such a good estimator of its GCA, as under irrigation.

Heterosis and heterobeltiosis

Irrigated experiments

The average heterosis (47 %) and heterobeltiosis (23 %) for GY of the 2nd generation hybrids outperformed those of the 1st (29 and 17 %) (Table

Heterosis y heterobeltiosis

Experimentos con riego

Los valores promedio de heterosis (47 %) y heterobeltiosis (23 %) para RG de los híbridos de 2^a generación superaron a los de la 1^a (29 y 17 %) (Cuadro 4).

4). In another study, with twelve 2nd generation hybrids, the average heterosis and heterobeltiosis for yield were 35 and 22 % (Cisneros-López *et al.*, 2007b). In particular, in the present study, heterosis of the 2nd generation hybrids varied from 5 to 91 % and heterobeltiosis from -11 to 77 %; heterosis of the superior group in GY (27 hybrids)

Cuadro 4. Heterosis y heterobeltiosis para rendimiento de grano de las dos generaciones de híbridos de sorgo. Promedios de tres experimentos de riego.

Table 4. Heterosis and heterobeltiosis for grain yield of two generations of sorghum hybrids. Averages over three irrigated experiments.

Híbrido	RG (g/planta)	H (%)	HB (%)	Híbrido	RG (g/planta)	H (%)	HB (%)
Primera generación				Segunda generación (continuación)			
28×33	42.56 a	29	22	1×16	50.52	40	5
28×34	42.33 a	26	22	3×23	50.34	47	17
28×32	38.12 a	28	9	5×17	50.26	77	56
29×34	37.54 a	28	17	2×19	50.12	55	27
28×31	36.95 a	15	6	5×16	49.99	38	4
29×31	36.79 a	32	26	3×25	49.92	48	18
30×33	36.00	36	15	7×23	49.85	37	16
29×33	35.99	25	15	7×20	49.71	27	2
29×32	35.04	37	33	3×16	49.67	35	3
30×34	33.21	24	3	2×23	49.65	46	15
30×31	32.04	26	9	6×16	49.33	36	3
30×32	31.67	37	27	3×17	49.29	72	53
Media	36.52	29	17	6×19	48.98	54	24
DSH	5.81			5×20	48.77	33	0
Segunda generación				7×25	48.40	35	15
				5×19	48.34	51	22
9×19	58.47 a	65	48	3×19	48.33	49	22
9×22	58.24 a	38	9	1×15	47.57	54	26
1×19	58.11 a	83	47	9×21	47.54	59	53
9×17	56.96 a	80	77	3×15	47.19	50	25
11×17	56.85 a	85	77	6×17	47.11	67	47
1×22	54.45 a	41	2	6×23	46.34	38	7
7×16	53.99 a	39	12	2×15	46.05	46	22
7×17	53.89 a	75	68	7×15	46.05	37	22
9×23	53.58 a	44	24	6×20	45.96	26	-6
1×17	53.36 a	91	66	5×15	45.73	47	21
1×20	53.06 a	46	9	2×14	45.64	50	28
9×20	52.86 a	32	8	1×14	45.55	53	28
7×22	52.86 a	28	-1	2×25	45.36	35	8
9×16	52.49 a	33	9	5×25	45.16	35	7
7×19	52.42 a	52	32	6×25	44.76	35	6
9×25	52.37 a	43	24	5×23	44.19	31	2
3×22	52.35 a	33	-2	5×14	43.93	46	23
11×14	52.30 a	61	47	7×14	43.36	33	22
3×20	52.20 a	41	7	6×15	43.11	39	14
9×14	52.19 a	56	46	6×14	41.86	40	17
9×15	52.12 a	51	38	3×14	41.72	37	17
2×17	51.91 a	81	61	2×21	40.76	52	42
5×22	51.49 a	32	-3	1×21	40.42	54	41
1×23	51.47 a	54	19	3×21	40.30	49	41
6×22	51.13 a	32	-4	7×21	39.20	35	33
11×15	51.06 a	52	35	6×21	38.64	46	35
2×16	51.05 a	40	6	11×25	37.69	5	-11
11×19	50.93	48	29	5×21	36.98	39	29
1×25	50.81	54	20	Media	48.85	47	23
2×22	50.62	29	-5	DSH	7.43		

RG, rendimiento de grano por planta; H, heterosis; y HB, heterobeltiosis. Valores con diferentes letras en la columna de cada generación son diferentes ($p \leq 0.05$). DSH, diferencia significativa honesta dentro de cada generación.

En otro estudio, con 12 híbridos de 2^a generación, los valores promedio de heterosis y heterobeltiosis para rendimiento fueron 35 y 22 % (Cisneros-López *et al.*, 2007b). En particular, la heterosis de los híbridos de 2^a generación varió de 5 a 91 % y la heterobeltiosis de -11 a 77 %; la heterosis del grupo superior en RG (27 híbridos) osciló de 28 a 91 % y la heterobeltiosis de -4 a 77 %. En los híbridos de 1^a generación la heterosis fluctuó de 15 a 37 % y la de sus mejores seis de 15 a 32 %, así como la heterobeltiosis de 3 a 33 y de 6 a 26 %. Los valores superiores y mayor amplitud de heterosis y heterobeltiosis de la 2^a generación de híbridos se atribuye a la mayor diversidad de las líneas que intervinieron. Orozco y Mendoza (1983) observaron que la heterosis en el rendimiento de híbridos de sorgo evaluados en el Estado de Morelos, formados con líneas introducidas de EE. UU., varió de -24 a 176 % y la heterobeltiosis de -54 a 94 %; estas amplias variaciones se atribuyeron a la variabilidad de las líneas introducidas. Osuna-Ortega *et al.* (2001) evaluaron el rendimiento de grupos de híbridos formados con las combinaciones entre líneas tolerantes y susceptibles al frío. En Celaya, Guanajuato, la heterosis fluctuó de 26 a 173 % y la heterobeltiosis de 3 a 103%, resultado del distinto grado de adaptación de los híbridos, consecuencia del contraste genético entre las líneas progenitoras, pues las tolerantes fueron formadas por el CP en los Valles Altos y las susceptibles por instituciones nacionales o extranjeras, en regiones tropicales y subtropicales.

Para PG y NG se observó también variación amplia, cercana a la de la heterosis y heterobeltiosis del RG. Los promedios de heterosis y heterobeltiosis del PG de los híbridos de 2^a generación fueron superiores a los de la 1^a en 59 y 256 %, así como los del NG en 105 y 101 %. En la 2^a generación la heterosis del PG osciló de -2 a 51 % y la heterobeltiosis de 19 a 49 %; para NG la heterosis varió de -31 a 61 % y la heterobeltiosis de -41 a 55 %. En la 1^a generación la heterosis del PG varió de -2 a 21 % y la heterobeltiosis de -21 a 8 %; la heterosis del NG de -2 a 27 % y la heterobeltiosis de -27 a 16 %. Peña *et al.* (2004) observaron que la heterosis del PG fue de menor amplitud que la de RG y NG, por lo que concluyeron que el NG es el componente que más contribuyó a la heterosis del RG. Al respecto, en la 1^a generación la correlación de la heterosis del PG vs. NG fue negativa ($R = -0.69^*$) y en la 2^a también ($R = -0.71^{**}$), pero en esta generación la heterosis del NG estuvo asociada con la del RG ($R = 0.65^{**}$); asimismo la heterobeltiosis del NG correlacionó de manera positiva con la del RG ($R = 0.56^{**}$) y negativa con la del PG ($R = -0.66^{**}$). Esto indica que la heterosis y heterobeltiosis del número de granos contribuyó en

oscillated from 28 to 91 % and heterobeltiosis from -4 to 77 %. In the 1st generation hybrids, heterosis fluctuated from 15 to 37 % and that of the best six from 15 to 32 %, while heterobeltiosis from 3 to 33 and 6 to 26 %. The superior values and broader amplitude of heterosis and heterobeltiosis of the 2nd generation of hybrids are attributed to the greater diversity of the lines involved. In the State of Morelos, México, Orozco and Mendoza (1983) observed that heterosis of sorghum hybrids made with lines introduced from the USA varied from -24 to 176 % and heterobeltiosis from -54 to 94 %. These wide ranges were attributed to the variability of the introduced lines. Osuna-Ortega *et al.* (2001) evaluated the grain yield of groups of hybrids combining cold tolerant and cold susceptible lines. In Celaya, Guanajuato, heterosis of these hybrids fluctuated from 26 to 173 % and heterobeltiosis from 10 to 103 %, resulting from the different degree of hybrids adaptation, due to the genetic contrast between parental lines, since the tolerant ones were developed by the CP in the Mexican Highlands and the susceptible ones by national or foreign institutions located in tropical and subtropical regions.

For SW and SN, wide variation was also observed, close to that of heterosis and heterobeltiosis of GY. The average heterosis and heterobeltiosis of SW for the 2nd generation hybrids were superior to those of the 1st in 59 and 256 %, as well as those of SN in 105 and 101 %. In the 2nd generation, heterosis of the SW oscillated from -2 to 51 % and heterobeltiosis from 19 to 49 %; for SN, heterosis varied from -31 to 61 % and heterobeltiosis from -41 to 55 %. In the 1st generation, heterosis of SW varied from -2 to 21 % and heterobeltiosis from -21 to 8 %; heterosis of SN from -2 to 27 % and heterobeltiosis from -27 to 16 %. Peña *et al.* (2004) observed that heterosis of SW was of less amplitude than that of GY and SN, so they concluded that SN is the component that most contributed to heterosis of GY. Regarding this, in the 1st generation, the correlation of heterosis of SW vs. SN was negative ($R = -0.69^*$) and also in the 2nd ($R = -0.71^{**}$), but in this generation heterosis of SN was associated with that of GY ($R = -0.65^{**}$); likewise, heterobeltiosis of SN had a positive correlation with that of GY ($R = 0.56^{**}$) and negative with that of SW ($R = -0.66^{**}$). This means that heterosis and heterobeltiosis of seed number contributed to a greater degree to heterosis and heterobeltiosis of grain yield in the 2nd generation hybrids, than that of seed weight.

The correlations between yield and its heterosis and heterobeltiosis of the 1st generation of hybrids were not significant; in contrast, in the 2nd generation,

mayor medida a la heterosis y heterobeltiosis del rendimiento en la 2^a generación de híbridos, que el peso del grano.

Las correlaciones entre rendimiento con su heterosis y heterobeltiosis de la 1^a generación de híbridos no fueron significativas; en cambio en la 2^a generación, el RG correlacionó con su heterosis ($R = 0.39^{**}$) y ésta a su vez con la heterobeltiosis ($R = 0.91^{**}$). Se infiere que a medida que aumentó el RG del híbrido se incrementó la heterosis y que cuando creció la heterosis también lo hizo la heterobeltiosis, lo que significaría una relación positiva entre los tres estimadores, como resultado de buena conjugación de genes aditivos de los respectivos progenitores. En la mayoría de los casos, el rendimiento de los híbridos de la 2^a generación superó al mejor progenitor, y en 7 de los 12 híbridos de 1^a generación y en 72 de los 74 de 2^a, el progenitor de mayor rendimiento fue la línea restauradora; por lo tanto, los casos de heterobeltiosis negativa de la 2^a generación son ocasionadas por líneas R cuyo RG superó al de sus híbridos, como es el caso de la Línea 22 (53.30 g/planta), que León *et al.* (1998) sugieren utilizarla como variedad de polinización libre en riego.

Experimentos en seco

Ante la ausencia de información de dos de las tres líneas B de 1^a generación, sólo se discuten los resultados correspondientes a 64 de los 80 híbridos de 2^a generación (Cuadro 5). La heterosis de estos híbridos fluctuó de -41 a 148 % y la heterobeltiosis de -44 a 146 %; en el grupo estadísticamente superior para RG (22 híbridos) la heterosis osciló de 51 a 148 % y la heterobeltiosis de 38 a 146 %. La amplitud y el valor máximo de heterosis y heterobeltiosis fue superior a lo que ocurrió en la condición de riego; en este caso sobresalen los híbridos 2×20 (148 y 146 %), 6×20 (133 y 109 %), 3×20 (131 y 123 %) y 3×25 (127 y 122%), infiriéndose que hubo efectos aditivos para rendimiento de esos cuatro híbridos, pues las líneas B (6, 2 y 3) no fueron estadísticamente diferentes y las R (20 y 25) fueron del primer grupo estadístico para rendimiento de grano en seco (Cuadro 3). La amplitud de heterosis del RG de los híbridos de 2^a generación resultó similar a las publicadas por Orozco y Mendoza (1983), y Osuna-Ortega *et al.* (2001), pero destaca la mayor amplitud y el valor más alto de heterobeltiosis.

En cuanto a los componentes del rendimiento, la heterosis del PG osciló de -9 a 39 % y la heterobeltiosis de -20 a 27 %; así como la heterosis del NG de -42 a 107 % y la heterobeltiosis de -44 a 91 % (León, 2007). Al comparar la heterosis y

the GY correlated with its heterosis ($R = 0.39^{**}$) and this in turn with heterobeltiosis ($R = 0.91^{**}$). It is therefore inferred that as the GY of the hybrid increased, the heterosis also increased and when it increased, its heterobeltiosis also did, which would mean a positive relation between the three estimators, as a result of a good conjugation of additive genes from the corresponding parental lines. In most cases, the yield of 2nd generation hybrids outperformed the best parent, and in 7 out of the twelve 1st generation hybrids and 72 out of the 74 second generation, the best parent was the restorer line. Therefore, the negative heterobeltiosis found in the 2nd generation is due to R- lines whose GY outperformed that of their hybrids; such is the case of Line 22 (53.30 g/plant), which León *et al.* (1998) suggest using as an open pollinated under irrigation.

Rain fed experiments

Because of the lack of information for two out of the three 1st generation B- lines, only the results regarding 64 out of the 80 second generation hybrids are discussed (Table 5). Heterosis of these hybrids varied from -41 to 148 % and heterobeltiosis from -44 to 146 %. In the statistically superior group for GY (22 hybrids), heterosis oscillated from 51 to 148 % and heterobeltiosis from 38 to 146 %. The amplitude and maximum value of heterosis and heterobeltiosis was superior to what occurred in the irrigated experiments. The hybrids 2×20 (148 and 146 %), 6×20 (133 and 109 %), 3×20 (131 and 123 %) and 3×25 (127 and 122%) stand out, which allows inferring that there were additive effects for grain yield of these four hybrids, for the B- lines 6, 2, and 3 were not statistically different and the R- lines 20 and 25 belonged to the first statistical group for grain yield under rain fed (Table 3). The amplitude for heterosis of GY of the 2nd generation hybrids was similar to those published by Orozco and Mendoza (1983) and Osuna-Ortega *et al.* (2001), but the broader amplitude and the higher value of heterobeltiosis stand out.

With regards to the yield components, heterosis for SW oscillated from -9 to 39 % and heterobeltiosis from -20 to 27 %; while heterosis of SN from -42 to 107 % and heterobeltiosis from -44 to 91 % (León, 2007). When comparing heterosis and heterobeltiosis for GY, SW and SN, a similar tendency to the one presented under irrigation was observed; that is, there was also greater variation in GY and SN under this environmental condition. In addition, heterosis of GY was correlated with that of SW ($R = 0.58^{**}$) and SN ($R = 0.90^{**}$), and those of both components

Cuadro 5. Heterosis y heterobeltiosis para rendimiento de grano de las dos generaciones de híbridos de sorgo. Promedios de dos experimentos de secano.**Table 5. Heterosis and heterobeltiosis for grain yield of two generations of sorghum hybrids. Averages over two rain fed experiments.**

Híbrido	RG (g/planta)	H (%)	HB (%)	Híbrido	RG (g/planta)	H (%)	HB (%)
Primera generación				Segunda generación (continuación)			
29×31	11.2 a	134	102	5×25	12.79	76	71
29×32	8.28 a	75	50	7×22	12.56	31	15
29×33	7.91 a	66	43	7×14	12.47	37	26
29×34	7.29 a	75	32	9×22	12.24	37	13
Media	8.67	88	57	6×15	12.21	40	34
DSH	4.77			5×23	12.14	80	62
				3×15	12.08	61	46
				6×23	11.80	56	29
Segunda generación							
6×20	19.11 a	133	109	1×23	11.53	80	70
6×22	18.49 a	85	70	7×23	11.49	61	39
2×20	17.83 a	148	146	9×16	11.12	29	9
5×16	17.62 a	99	73	1×15	11.10	47	34
1×16	17.14 a	102	68	7×16	11.09	20	9
3×22	16.87 a	91	55	7×15	10.89	31	31
5×22	16.42 a	79	51	6×21	10.86	23	19
1×22	16.27 a	84	50	5×21	10.74	35	27
3×20	16.20 a	131	123	2×15	10.60	37	28
5×20	16.06 a	118	115	9×15	10.51	37	27
3×25	15.67 a	127	122	11×16	10.22	13	0
6×16	15.38 a	59	51	3×21	9.68	27	14
2×22	15.04 a	67	38	11×22	9.27	-1	-15
7×20	14.97 a	93	81	2×23	9.24	40	30
1×20	14.89 a	112	105	2×25	9.10	28	28
2×16	14.72 a	70	44	7×21	9.08	9	7
2×14	14.70 a	72	48	9×23	9.06	39	29
6×14	14.42 a	51	45	2×21	8.91	14	5
11×14	14.28 a	61	44	11×15	8.51	6	3
5×14	14.28 a	64	44	9×25	8.32	18	18
3×14	14.08 a	69	42	1×21	8.20	8	-3
7×25	14.04 a	83	70	1×25	7.87	14	11
6×25	13.99	73	53	11×20	6.73	-11	-14
9×14	13.78	63	39	11×23	6.61	-5	-16
1×14	13.74	65	39	9×21	5.84	-24	-31
3×16	13.55	60	33	11×21	5.15	-37	-39
3×23	13.54	112	101	11×25	4.39	-41	-44
9×20	13.29	86	83	Media	12.31	54	40
5×15	12.86	63	55	DSH	5.1		

RG, rendimiento de grano por planta; H, heterosis; y HB, heterobeltiosis. Valores con diferentes letras en la columna de cada generación son diferentes ($p \leq 0.05$). DSH, diferencia significativa honesta dentro de cada generación.

heterobeltiosis para RG, PG y NG, se observó una tendencia similar a la presentada en riego; es decir, también hubo mayor variación en RG y NG en esta condición ambiental. Además, la heterosis del RG correlacionó con la del PG ($R = 0.58^{**}$) y NG ($R = 0.90^{**}$), y las de ambos componentes correlacionaron en forma positiva aunque no significativa ($R = 0.21$). Asimismo, las heterobeltiosis de los dos componentes correlacionaron con la del RG en diferente grado ($R = 0.27^*$; $R = 0.81^{**}$). Estos resultados ratifican lo observado en riego, con respecto a que el NG es el componente que más contribuyó a la heterosis y heterobeltiosis del RG en la 2ª generación de híbridos.

correlated positively although not significantly ($R = 0.21$). Likewise, heterobeltiosis of the two grain yield components correlated to that of GY to a different degree ($R = 0.27^*$; $R = 0.81^{**}$). These results ratified what was observed under irrigation in terms of the SN being the component that contributed most to heterosis and heterobeltiosis of GY in 2nd generation hybrids.

Some top yielder hybrids also expressed greater heterosis and heterobeltiosis values. In addition, there was a linear relation between GY and heterosis ($R = 0.90^{**}$), between GY and heterobeltiosis ($R = 0.83^{**}$), as well as between heterosis and heterobeltiosis ($R = 0.97^{**}$); this is similar to what was observed

Algunos híbridos de mayor RG también expresaron los mayores valores de heterosis y heterobeltiosis. Además, hubo relación lineal entre RG y heterosis ($R = 0.90^{**}$), entre RG y heterobeltiosis ($R = 0.83^{**}$), así como entre heterosis y heterobeltiosis ($R = 0.97^{**}$); en forma similar a lo observado en riego, por lo que se confirma la relación positiva entre rendimiento de grano, heterosis y heterobeltiosis de los híbridos, en seco.

CONCLUSIONES

La ACG para rendimiento y peso de grano de las líneas B y R de sorgo tolerantes al frío de 2^a generación fue superior a las de la 1^a generación, tanto en riego como en seco. La mejor ACG para rendimiento de grano fue de las líneas B (9, 11, 1 y 7) y R (22, 17 y 19), en riego, y en seco de las líneas B (6, 3, 5 y 1) y R (20, 22, 14 y 16). En riego, el rendimiento *per se* de las líneas B y R fue un buen estimador de la ACG. Los híbridos de 2^a generación presentaron más amplia heterosis y heterobeltiosis para rendimiento, peso y número de granos, en ambas condiciones de humedad. Hubo relación positiva entre rendimiento de grano, heterosis y heterobeltiosis en los híbridos de 2^a generación en ambas condiciones. En riego, los híbridos con mayor rendimiento, heterosis y heterobeltiosis fueron: 1×17 (53.36 g/planta, 91 y 66 %), 11×17 (56.85 g/planta, 85 y 77 %), 1×19 (58.11 g/planta, 83 y 47 %) y 9×17 (56.96 g/planta, 80 y 77 %). En seco: 2×20 (17.83 g/planta, 148 y 146 %), 6×20 (19.11 g/planta, 133 y 109 %), 3×20 (16.20 g/planta, 131 y 123 %) y 3×25 (15.67 g/planta, 127 y 122 %).

LITERATURA CITADA

- Ángeles A., H. H. 1968. El maíz y el sorgo y sus programas de mejoramiento genético en México. *In*: Memorias del Tercer Congreso Nacional de Fitogenética. SOMEFI. Chapingo, México. pp: 425-446.
- 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 verticillioides* (Sacc.) Nirenberg effects on seed yield and its components under field conditions. *Agrociencia* 41: 283-294.
- Estrada G., A., y H. H. Ángeles A. 1975. Estimación de la aptitud combinatoria de líneas A y R de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Agrociencia* 21: 77-90.
- Falconer, D. S. 1970. Introducción a la Genética Cuantitativa. Fidel Márquez Sánchez (trad.). Ed. CECSA. México. pp: 303-313.
- Fonseca, S., and F. L. Patterson. 1968. Hybrid vigor in a seven-parent diallel crosses in common winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Sci.* 8: 85-88.
- Goldman, I. L. 1999. Inbreeding and outbreeding in the development of a modern heterosis concept. *In*: Coors, J. G., and S. Pandey

under irrigation, thus confirming the positive relation between grain yield, heterosis and heterobeltiosis in these sorghum hybrids, under rain fed conditions.

CONCLUSIONS

The GCA of grain yield and seed weight for the 2nd generation of cold tolerant sorghum B- and R-lines was superior to that of the 1st generation, both under irrigated and rain fed conditions. The best GCA of grain yield was that of B- lines numbers 9, 11, 1 and 7; and R- lines numbers 22, 17 and 19, under irrigation. In the rain fed experiments, B- lines 6, 3, 5 and 1, and R- lines 20, 22, 14 and 16. Under irrigation, the grain yield *per se* of B- and R- lines was a good estimator of the GCA. The 2nd generation hybrids showed broader heterosis and heterobeltiosis for grain yield, seed weight and seed number, under both moisture conditions. There was a positive relation between grain yield, heterosis and heterobeltiosis in the 2nd generation hybrids under both conditions. Under irrigation, the hybrids with greatest yield, heterosis and heterobeltiosis were: 1×17 (53.36 g/plant, 91 and 66 %), 11×17 (56.85 g/plant, 85 and 77 %), 1×19 (58.11 g/plant, 83 and 47 %) and 9×17 (56.96 g/plant, 80 and 77 %). Under rain fed: 2×20 (17.83 g/plant, 148 and 146 %), 6×20 (19.11 g/plant, 133 and 109 %), 3×20 (16.20 g/plant, 131 and 123 %) and 3×25 (15.67 g/plant, 127 and 122 %).

—End of the English version—



- (eds). The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. ASA. CSSA. Madison, WI. USA. pp: 7-18.
- 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.
- León V., Humberto. 2007. Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. Tesis Doctoral. Genética. Campus Montecillo. pp: 14-34.
- León V., H., L. E. Mendoza O., M. Livera M., and J. A. Estrada G. 1998. Phenology, seed yield and seed quality of cold tolerant sorghum restorer lines. *Agrociencia* 32: 339-347.
- León-Velasco, H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana, y Ángel Martínez-Garza. 2009. Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. I. Variabilidad genética y adaptabilidad. *Agrociencia* 43(5): 483-496.
- Livera M., M. y A, Carballo C. 1976-1977. Mejoramiento genético del sorgo *Sorghum bicolor* L. Moench por tolerancia al frío. Adaptación de genotipos tolerantes. *Agric. Téc. Méx.* 4(1): 77-99.
- Maman, N., S. C. Mason, D. J. Lyon, and P. Dhungana. 2004. Yield components of pearl millet and grain sorghum across environments in the Central Great Plains. *Crop Sci.* 44: 2138-2145.
- Mendoza O., L. E. 1983. Estudios fisiotécnicos de sorgo realizados en el Colegio de Postgraduados (México). *Fitotecnia* 5: 108-138.

- Mendoza O., L. E. 1988. Formación de híbridos de sorgo para grano. II. Comportamiento *per se* de las líneas y su aptitud combinatoria general. *Rev. Fitotec. Mex.* 11: 39-47.
- Mendoza-Onofre, L. E. 1992. Grain yield of the first cold tolerant sorghum hybrids developed in México. *Sorghum Newsletter* 33: 62.
- Orozco M., F. J., y L. E. Mendoza O. 1983. Comparación de híbridos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] y algunos de sus progenitores. *Agrociencia* 53: 87-98.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, V. A. González-Hernández, M. del C. Mendoza-Castillo, H. Williams-Alanís, and M. Hernández-Martínez. 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.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, F. Castillo-González, M. del C. Mendoza-Castillo, and H. Williams-Alanís. 2000. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México: I. High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.
- Peña R., A., S. D. Kachman, J. D. Eastin y D. J. Andrews. 2004. Herencia del rendimiento, número y tamaño del grano en sorgo. *Rev. Fitotec. Mex.* 27: 149-156.
- Romo C., E. 1981. Sorgo. *In: Logros y Aportaciones de la Investigación Agrícola en el Área de Influencia del CAEVAMEX. INIA-SARH.* Chapingo, Estado de México. pp: 48-51.
- SAS (Statistical Analysis System). 1999-2000. SAS® Proprietary Software Release 8.1 (TS1M0). SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.
- Serrano C., L. M., L. E. Mendoza O., y F. Castillo G. 1994. Formación de híbridos de sorgo para grano. IV. Estimación de parámetros genéticos mediante diseños de apareamiento incompletos. *Rev. Fitotec. Mex.* 17: 20-30.
- Solanki, B. G., D. M. Patel, P. B. Patel, and R. T. Desai. 2007. Combining ability in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] for yield and its attributing traits (II). *Crop Res. (Hisar)*: 187-191.
- Sprague, G. F., and L. A. Tatum. 1942. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *J. Amer. Soc. Agron.* 34: 923-932.
- Tüsüz, M. A. 1997. Heterosis in sorghum. *In: Book of Abstracts. The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops; an International Symposium.* CIMMYT. México. pp: 326-327.
- Yu, J., and M. R. Tuinstra. 2001. Genetic analysis of seedling growth under cold temperature stress in grain sorghum. *Crop Sci.* 41: 1438-1443.