

Evaluación de 28 híbridos experimentales de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) en condiciones áridas del Valle de Mexicali

Evaluation of 28 experimental hybrids of grain sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) under arid conditions of the Mexicali Valley

Marisol Galicia-Juárez^{1*}, Ulises Aranda-Lara², Vielka. J. Castañeda-Bustos¹, Héctor Williams-Alanís², Jimena Achiquen-Millán¹, Blanca M. Montiel-Batalla¹, Francisco J. Castañeda-Trujano¹, Juan A. Espinoza-Alonso¹, Luis R. Ramírez-Cervantes¹

¹ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Mexicali, Baja California, México. marisol.galicia.juarez@uabc.edu.mx; vielka.castaeda@uabc.edu.mx; jimena.achiquen@uabc.edu.mx; blanca.montiel@uabc.edu.mx; francisco.castaneda27@uabc.edu.mx; juan.espinoza.alonso@uabc.edu.mx; luis.roberto.ramirez.cervantes@uabc.edu.mx.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Río Bravo, Tamaulipas, México. CP. 88900. aranda.ulises@inifap.gob.mx; hectorwilliamsa@yahoo.com.mx.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Clorofila; NDVI;
rendimiento grano;
sorgo.

El cambio climático y la necesidad de diversificar cultivos en regiones áridas motivan la evaluación de nuevos híbridos de sorgo. Se evaluaron 28 híbridos experimentales (H1–H28) provenientes del noreste de México y cuatro híbridos comerciales (T29–T32), durante el ciclo primavera-verano 2021, bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Se analizaron variables agronómicas, fisiológicas y de rendimiento. El análisis de varianza reveló diferencias significativas en seis de siete variables agronómicas, destacando la longitud de la excursión. En variables fisiológicas, el índice de vegetación (NDVI) y el contenido de clorofila en hoja mostraron diferencias significativas. Algunos de los híbridos superaron en rendimiento a los testigos comerciales, lo que sugiere su viabilidad para ser introducidos en el Valle de Mexicali. Las correlaciones identificadas entre variables agronómicas y fisiológicas con el rendimiento sugieren su utilidad como indicadores tempranos para predecir el desempeño del cultivo durante las primeras fases fenológicas.

Abstract

Keywords:

Chlorophyll; NDVI;
grain yield; sorghum.

Climate change and the need to diversify crops in arid regions are driving the evaluation of new sorghum hybrids. In this study, 28 experimental hybrids (H1–H28) from northeastern Mexico and four commercial hybrids (T29–T32) were evaluated during the 2021 spring-summer growing season using a completely randomized design with three replicates. Agronomic, physiological, and yield variables were analyzed. Analysis of variance revealed significant differences in six of the seven agronomic variables, notably in exertion length. Among physiological variables, the normalized difference vegetation index (NDVI) and leaf chlorophyll content showed significant differences. Some hybrids outperformed the commercial controls in yield, suggesting their viability to be introduced in the Mexicali Valley. The correlations identified between agronomic and physiological variables and yield suggest their usefulness as early indicators for predicting crop performance during the initial phenological stages.

Recibido: 20 de noviembre de 2025

Aceptado: 11 de febrero de 2026

Publicado: 23 de septiembre de 2026

Cómo citar: Galicia-Juárez, M.; Aranda-Lara, U.; Castañeda-Bustos, V. J.; Williams-Alanís, H.; Achiquen-Millán, J.; Montiel-Batalla, B. M.; Castañeda-Trujano, F. J.; Espinoza-Alonso, J. A.; & Ramírez-Cervantes, L. R. (2026). Evaluación de 28 híbridos experimentales de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) en condiciones áridas del Valle de Mexicali. *Acta Universitaria*, 36(NE-1), e4959. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4959>

Introducción

México ocupa el cuarto lugar en la producción de sorgo para grano (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) a nivel mundial con 5.7 millones de toneladas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024). En el estado de Baja California se estimó una producción de sorgo para grano de 818 ton, donde el municipio de Mexicali es el único productor de este cereal. Además, Baja California es el mayor productor de carne de bovino con 108 123 ton de carne en canal (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023), por lo que es de suma importancia poner a la disposición del agricultor diferentes opciones para la alimentación del ganado.

El principal uso que se le da al sorgo en el continente americano es como alimento para animales, aunque también se usa en la producción de alimentos, como forrajes, y en la producción de etanol, entre otros usos (Uñate-Fraga *et al.*, 2022). El sorgo tiene como centro de origen al norte de África, lo que le confiere la capacidad de adaptarse a zonas agroecológicas cálidas, secas y de alta salinidad (Cuevas-Reyes *et al.*, 2021). Respecto a la calidad del grano, en comparación con el trigo y el maíz, el sorgo aporta cantidades similares de proteína; así mismo, su valor alimenticio se relaciona con las condiciones de crecimiento y la variedad (Karaye *et al.*, 2023). La mejora genética y la selección de mejores variedades han disminuido la producción de taninos y han mejorado los niveles de energía y proteína (Ronda *et al.*, 2019).

El sorgo en grano puede servir como ingrediente principal de cereales en las dietas, o bien, puede ser procesado y mezclado con otros ingredientes para ser usado como alimento en los diferentes sistemas de producción y convertirse en una fuente de energía y proteínas (McCuistion *et al.*, 2018). Bajo un régimen climático cambiante, el sorgo tendría importancia como cultivo alimentario e industrial bajo ambientes restrictivos para otros cultivos, como el maíz (Hariprasanna & Rakshit, 2016).

Por lo anterior, esta investigación tiene como finalidad sentar las bases en la introducción de nuevos híbridos de sorgo mediante la evaluación de la respuesta agronómica y fisiológica de híbridos experimentales de sorgo provenientes del noreste de México, y así tener más alternativas de alimentación para ganado, derivado de la demanda en la producción de carne que caracteriza al Valle de Mexicali en Baja California y de sus características agroecológicas, lo que le confiere su competitividad.

Materiales y métodos

El ensayo se realizó en el Campo Experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado a 50 km al sur de Mexicali, Baja California, México (32° 24'44, 16° N; 115° 11'56, 87° O), y a una altitud de 12 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.). El tipo de suelo es vertisol, con textura arcillosa de color café con tonalidades grisáceas, y el clima es tipo desértico (García, 1970). Las temperaturas medias que se observan en la Figura 1 son de la época de crecimiento del cultivo; los datos se tomaron del Sistema de Información para el Manejo de Agua de Riego en Baja California (SIMARBC, 2025).

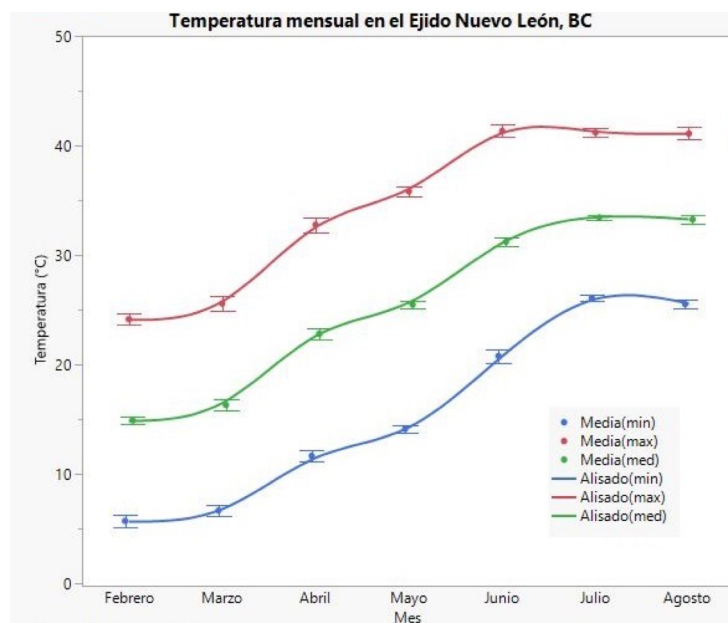


Figura 1. Temperaturas mínima, media y máxima mensual en el 2021 en el Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California.

Se utilizaron 28 híbridos experimentales (H1-H28) donados por el Centro de Investigación Regional Noreste (CIRNE) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y cuatro híbridos comerciales (T29-T32) utilizados en el Valle de Mexicali. Los genotipos se establecieron en el ciclo agrícola primavera-verano 2021, bajo un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. La parcela experimental fue de dos surcos de 5 m de largo, con una separación entre surcos de 1 m y una distancia entre plantas de 0.15 m. En cada parcela se seleccionaron 10 plantas al azar y con competencia completa, para medir las siguientes variables agronómicas:

- Altura de la planta (AP, cm): Se midió desde la base del suelo hasta el ápice de la panoja;
- Diámetro de tallo (DT, cm): Se registró el diámetro del tallo en el primer tercio de su longitud, comprendido entre la base y el ápice de la panoja (mm);
- Largo y ancho de la hoja bandera (LHB y AnHB, cm): Se midió el largo de la hoja bandera desde la lígula hasta el ápice de la hoja, y el ancho en la parte más ancha de la hoja;
- Longitud, ancho y longitud de la excursión de la panoja (LP, APn y LE, cm): Se midió la longitud desde la base al ápice de la panoja, el ancho en la parte más ancha de la panoja y la longitud de la excursión, que es una prolongación del tallo que va desde encima de la hoja bandera y se extiende hasta la primera espiguilla de la panoja.

Las variables de rendimiento se evaluaron una semana después de la madurez fisiológica (presencia de la "capa negra") (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006) en 10 panojas por UE, las cuales se describen enseguida:

- Peso de grano por panoja (PGP, g): Se realizó registrando el peso de grano por panoja;
- Peso de 100 granos (PCG, g): Se realizó el conteo de 100 granos mediante las reglas del ISTA;
- Número de granos por panoja (NGP): Se determinó mediante la siguiente fórmula: $[NGP = 100 \times (PGP / PCG)]$.

Las variables fisiológicas se determinaron en época de antesis en tres plantas por parcela, y el porcentaje de daño a la membrana celular se registró a 45 °C (DMC 45) y 50 °C (DMC 50), mediante la prueba de termo estabilidad de la membrana celular (Blum & Ebercon, 1981). El contenido relativo del agua en hoja se estimó mediante la adaptación de la técnica utilizada por Sade *et al.* (2015). El Contenido de clorofila en hoja (CCH) se determinó con el medidor portátil de clorofila Minolta SPAD-502. Para ello, se tomó una lectura promedio de cinco mediciones en la hoja bandera de manera consistente entre la tercera parte y la mitad del largo de la hoja a partir de su inserción en el tallo, con la superficie adaxial (superior) hacia arriba y se evitó colocar en la nervadura, venas principales o partes gruesas de la hoja en la cámara de medida. La medición de la variable del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se cuantificó mediante un GreenSeeker Trimble®, a los 60 cm por encima de la altura de la planta, registrando el promedio de cinco plantas con competencia completa por parcela.

Se obtuvieron los estadísticos descriptivos para todas las variables del estudio. Para evaluar el efecto del genotipo en las variables de estudio se empleó un modelo lineal de efectos fijos; posteriormente, se realizó una prueba de comparación de medias por el método de Tukey, considerando diferencias significativas a un nivel de $\alpha = 0.05$. Asimismo, se realizó un análisis de correlación para determinar la asociación entre las variables evaluadas. El análisis estadístico se llevó a cabo empleando el paquete estadístico JMP versión 17.0.0. SAS Institute Inc. (2023).

Resultados

Variables agronómicas

Los resultados del análisis de la varianza mostraron que hubo un efecto significativo de los genotipos en seis de las siete variables morfológicas de importancia agronómica; no se observó efecto del ancho de la hoja bandera.

La variable altura de planta (Tabla 1) fluctuó con valores de media entre 1.03 m-1.25 m, siendo los híbridos 24 y 27 los de mayor altura de planta, sin diferencias estadísticas entre ambos. En cuanto a la longitud de panoja, el híbrido 22 resultó con el valor de media más alto (28.83 cm) y el híbrido 10 presentó la media más alta para ancho de panoja (11.65 cm). En la variable diámetro de tallo, el híbrido 1 presentó el valor de media más alto (27.97 mm); en longitud de la hoja bandera, el híbrido 11 presentó la media con el valor más alto (67 cm). Por su parte, el ancho de la hoja bandera no presentó diferencias estadísticas en los valores de media.

Tabla 1. Prueba de medias Tukey ($p < 0.05$) de las variables agronómicas.

Variables agronómicas							
Híbridos	AP (cm)	LP (cm)	AnP (cm)	LE (cm)	DT (mm)	LHB (cm)	AnHB (cm)
H1	1.05 bc	24.76 ce	7.20 hi	14.76 be	27.97 a	52.43 ab	6.93 a
H2	1.07 bc	24.86 ce	5.31 l	15.53 bd	20.90 ch	50.83 ab	7.00 a
H3	1.19 ab	26.87 ac	7.37 gh	14.75 be	18.00 gj	25.67 b	5.40 a
H4	1.11 ac	25.44 ce	9.23 e	17.38 ab	22.90 bg	49.67 ab	6.40 a
H5	1.19 ac	23.74 df	6.48 j	10.95 eh	16.48 hj	41.00 ab	6.57 a
H6	1.13 ac	25.92 ad	9.18 e	16.57 ac	15.07 j	35.67 ab	4.90 a
H7	1.10 ac	25.12 ce	9.38 e	2.64 kl	22.20 bg	33.67 ab	5.50 a
H8	1.15 ac	25.75 bd	4.77 mn	1.70 l	27.09 ab	41.33 ab	5.77 a
H9	1.15 ac	27.32 ac	10.97 b	12.96 cf	15.94 hj	32.00 ab	5.30 a
H10	1.19 ac	26.58 ad	11.65 a	20.08 a	16.53 hj	31.67 ab	6.50 a
H11	1.08 ac	28.77 ab	4.37 np	6.53 gl	22.62 ai	67.00 a	6.53 a
H12	1.12 ac	27.20 ad	6.59 j	13.46 ce	15.59 ij	40.00 ab	8.50 a
H13	1.11 ac	27.23 ac	6.31 jk	5.67 ik	25.58 ac	41.67 ab	5.83 a
H14	1.12 ac	27.18 ac	8.46 f	3.93 jl	18.17 gj	45.67 ab	7.43 a
H15	1.19 ab	27.59 ac	7.52 g	8.84 gi	19.04 ej	34.00 ab	5.77 a
H16	1.13 ac	27.52 ac	5.43 l	11.78 dg	19.88 dj	48.33 ab	4.73 a
H17	1.18 ac	27.23 ac	9.8 d	14.57 be	20.26 di	38.00 ab	6.33 a
H18	1.13 ac	27.12 ac	7.51 gh	18.12 ab	24.89 ad	39.33 ab	5.23 a
H19	1.13 ac	26.74 ad	5.56 l	20.41 a	23.30 af	43.67 ab	5.73 a
H20	1.17 ac	27.54 ac	10.00 d	14.74 be	24.63 ad	46.50 ab	6.93 a
H21	1.17 ac	26.46 ad	10.41 c	7.70 hj	22.40 bg	45.00 ab	5.90 a
H22	1.16 ac	28.83 a	9.46 e	17.67 ab	23.99 ae	48.83 ab	6.17 a
H23	1.10 ac	26.73 ad	6.00 k	8.80 gi	20.74 ci	36.33 ab	6.43 a
H24	1.25 a	26.26 ad	7.02 i	9.10 fi	18.56 fj	36.67 ab	4.93 a
H25	1.20 ab	27.11 ac	9.41 e	20.22 a	18.46 fj	32.67 ab	5.33 a
H26	1.18 ac	26.36 ad	10.81 b	11.79 dg	20.96 ch	36.00 ab	5.00 a
H27	1.23 a	26.60 ad	6.32 jk	17.96 ab	21.94 cg	45.33 ab	5.53 a
H28	1.13 ac	25.92 ad	7.30 gi	2.42 kl	22.20 bg	51.00 ab	7.50 a
T29	1.17 ac	26.01 ad	4.97 m	6.16 ik	19.06 ej	45.67 ab	7.95 a
T30	1.07 bc	22.48 ef	3.94 pq	2.28 kl	25.30 ac	54.00 a	6.77 a
T31	1.14 ac	21.48 f	4.39 o	3.81 jl	17.90 gj	45.00 ab	6.33 a
T32	1.03 c	22.55 ef	3.89 q	4.71 jl	22.41 bg	48.67 ab	5.67 a

Nota. H: Híbridos; T: Sorgo comercial; AP: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AnP: Ancho de la panoja; LE: Longitud de la excursión; DT: Diámetro del tallo; LHB: Longitud de la hoja bandera; AnHB: Ancho de la hoja bandera. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Variables fisiológicas

Las variables fisiológicas (Tabla 2) presentaron diferencias significativas solo para las variables índice de vegetación de diferencia normalizada y contenido de clorofila en hoja. La variable índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) destaca dos híbridos con los valores de media más altos y sin diferencias estadísticas entre ellos (H30 y H20). La variable de contenido de clorofila en hoja presentó diferencias estadísticas en los valores de media, en un rango de valores de 33.85% a 54.76%. El contenido relativo de agua no presentó diferencias estadísticas en la prueba de medias; se reportan valores en un rango de 58.80% a 79.75%. Las variables evaluadas de DMC a 45 °C y 50 °C no presentaron diferencias estadísticas en los valores de medias.

Tabla 2. Prueba de medias Tukey ($p < 0.05$) de las variables fisiológicas.

Híbridos	NDVI	CCH	Variables fisiológicas		
			CRA (%)	DMC 45 (%)	DMC 50 (%)
H1	0.61 ad	36.03 gi	79.75 a	29.94 a	71.94 a
H2	0.57 ad	50.14 af	65.93 a	52.19 a	58.96 a
H3	0.55 bd	51.13 ae	72.06 a	43.77 a	69.81 a
H4	0.60 ad	40.19 ci	77.2 a	33.65 a	70.60 a
H5	0.55 bd	45.68 ai	75.52 a	50.86 a	71.47 a
H6	0.55 bd	43.36 ai	63.49 a	29.04 a	29.76 a
H7	0.54 cd	47.59 ah	61.06 a	20.49 a	36.88 a
H8	0.59 ad	39.75 di	71.12 a	32.79 a	69.14 a
H9	0.59 ad	39.05 ei	65.40 a	30.91 a	51.87 a
H10	0.60 ad	46.57 ai	63.97 a	43.75 a	57.09 a
H11	0.59 ad	41.27 bi	72.54 a	8.87 a	36.21 a
H12	0.58 ad	45.62 ai	62.10 a	28.48 a	70.78 a
H13	0.60 ad	35.57 hi	79.37 a	16.30 a	77.44 a
H14	0.54 d	49.12 af	67.44 a	18.00 a	48.47 a
H15	0.58 ad	50.09 af	60.70 a	46.44 a	59.98 a
H16	0.58 ad	50.24 af	73.07 a	50.61 a	53.36 a
H17	0.60 ad	51.2 ae	63.86 a	18.42 a	55.84 a
H18	0.62 ad	43.21 ai	66.57 a	8.70 a	51.71 a
H19	0.62 ad	40.94 ci	76.78 a	21.18 a	78.07 a
H20	0.64 a	43.96 ai	79.25 a	25.27 a	79.20 a
H21	0.57 ad	52.6 ac	67.15 a	12.17 a	68.99 a
H22	0.60 ad	33.85 i	74.88 a	19.81 a	65.78 a
H23	0.57 ad	50.05 af	69.30 a	22.02 a	58.14 a
H24	0.61 ad	47.64 ah	59.68 a	28.46 a	57.06 a
H25	0.61 ad	48.73 ag	70.59 a	51.40 a	58.47 a
H26	0.58 ad	53.97 ab	72.13 a	55.25 a	88.15 a
H27	0.61 ad	50.37 af	61.29 a	29.80 a	64.97 a
H28	0.56 ad	54.76 a	58.80 a	55.4 a	70.11 a
T29	0.59 ad	38.33 fi	75.71 a	12.17 a	63.56 a
T30	0.63 ac	52.24 ad	68.40 a	47.43 a	73.01 a
T31	0.63 ab	49.61 af	65.87 a	23.03 a	61.55 a
T32	0.65 a	43.80 ai	66.40 a	39.90 a	73.85 a

Nota. H: Híbridos; T: Sorgo comercial; NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada; CCH: Contenido de clorofila en hoja; CRA: Contenido relativo de agua; DMC 45: Daño a la membrana celular a 45 °C; DMC 50: Daño a la membrana celular a 50 °C. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Variables de rendimiento

Los híbridos presentaron diferencias significativas en las tres variables de rendimiento: peso de 100 semillas, peso de grano por panoja y número de granos por panoja (Tabla 3). La variable de peso de 100 semillas fue mayor en el híbrido 15. Para las variables peso de grano por panoja y número de granos por panoja, el híbrido 21 resultó tener el mayor valor de media.

Tabla 3. Prueba de medias Tukey ($p < 0.05$) de las variables de rendimiento.

Híbridos	Variables de rendimiento		
	PCS (g)	PGP (g)	NGP (g)
H1	2.15 ag	50.00 af	2326 ad
H2	2.12 ag	26.25 cf	1238 cd
H3	2.19 ae	28.75 cf	1327 d
H5	2.09 cf	37.08 bf	1756 bd
H6	2.22 ae	32.92 cf	1471 cd
H7	2.38 ac	38.33 bf	1634 cd
H9	2.55 ab	48.75 ac	1860 bd
H10	2.41 ac	57.50 ab	2552 ab
H11	-	-	-
H12	2.25 ae	37.50 bf	1631 cd
H14	2.36 ad	45.83 ad	1911 bd
H15	2.63 a	33.75 cf	1226 d
H16	2.13 be	40.42 bf	1911 bd
H17	2.00 cg	46.25 ae	2215 ad
H18	1.65 fg	29.17 cf	1733 bd
H19	1.80 eg	25.00 cf	1397 cd
H20	2.01 cg	38.75 bf	2029 ad
H21	2.17 be	65.00 a	2975 a
H22	1.72 dg	20.00 cf	1163 cd
H23	2.04 cf	38.59 bf	1887 bd
H24	1.56 g	21.67 f	1386 d
H25	2.03 cg	38.13 bf	1867 bd
H26	2.45 ac	57.08 ab	2327 ac
H27	2.03 cf	39.58 bf	1944 bd
H28	2.08 cf	42.92 bf	2052 bd
T29	1.69 eg	18.75 cf	1109 cd
T30	1.56 g	24.17 ef	1538 cd
T31	2.15 af	46.25 ae	2153 ad
T32	1.92 dg	25.42 df	1310 d

Nota. H: Híbridos; T: Sorgo comercial; PCS: Peso de cien semillas; PGP: Peso de grano por panoja; NGP: Número de granos por panoja. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Asociación entre variables

La Tabla 4 presenta los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas. Se observaron asociaciones significativas ($p < 0.05$) entre algunas de las variables agronómicas y fisiológicas evaluadas con el rendimiento. La mayor correlación ($r = 0.9187$) se observó entre las variables peso de grano por panoja y número de granos por panoja.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables evaluadas.

	PCS	PGP	NUM GP	AP	LP	ANP	LE	DT	LHB	AHB	NDVI	CCH	CRA	DMC 45	DMC 50
PCS	1	0.5462	0.1868	0.0139	0.2163	0.4168	0.0253	-0.2813	-0.2183	-0.0877	-0.2831	0.0846	-0.0996	0.1744	0.0076
PGP	<.0001	1	0.9187	0.0351	0.2893	0.4584	-0.0735	-0.0231	-0.0105	0.0267	0.0081	0.2787	0.0805	-0.0018	0.1757
NUMGP	0.0064	<.0001	1	0.0354	0.2414	0.3475	-0.0929	0.1027	0.0905	0.0872	0.1282	0.2881	0.1409	-0.0718	0.1988
AP	0.8409	0.6117	0.6079	1	0.4445	0.2033	0.1331	-0.0827	-0.1547	-0.0959	0.1335	0.1558	-0.1591	-0.0243	-0.0949
LP	0.0015	<.0001	0.0004	<.0001	1	0.4153	0.2127	0.0131	-0.1625	-0.0051	-0.0528	-0.0462	-0.0081	-0.169	-0.0183
ANP	<.0001	<.0001	<.0001	0.0006	<.0001	1	0.4094	-0.182	-0.3496	-0.2366	-0.1787	0.0336	-0.0598	-0.0282	-0.0775
LE	0.7144	0.2869	0.178	0.0257	0.0003	<.0001	1	-0.1229	-0.1118	0.0006	0.0854	-0.1762	0.1206	0.0464	-0.0568
DT	<.0001	0.7384	0.1359	0.1666	0.8269	0.0022	0.0396	1	0.4092	0.3345	0.259	-0.2113	0.315	-0.1239	0.2102
LHB	0.0715	0.932	0.4594	0.141	0.1217	0.0006	0.2885	<.0001	1	0.6991	0.1879	-0.1359	0.2299	-0.0174	0.1847
AHB	0.4737	0.8275	0.4763	0.3631	q	0.0232	0.9954	0.0011	<.0001	1	0.1272	-0.1494	0.2694	0.0681	0.2575
NDVI	<.0001	0.9065	0.0625	0.0252	0.3778	0.0026	0.1536	<.0001	0.0729	0.2268	1	-0.1577	0.1407	0.0159	0.2196
CCH	0.2197	<.0001	<.0001	0.0089	0.4401	0.575	0.003	0.0004	0.1964	0.1552	0.0078	1	-0.2997	0.2446	-0.1273
CRA	0.1483	0.2433	0.0405	0.0075	0.893	0.3179	0.0434	<.0001	0.0275	0.0094	0.0177	<.0001	1	-0.0499	0.2393
DMC 45	0.011	0.979	0.2981	0.6853	0.0045	0.6376	0.4381	0.038	0.8694	0.5187	0.7894	<.0001	0.4022	1	0.2184
DMC 50	0.9123	0.0104	0.0037	0.1124	0.7601	0.1951	0.3427	0.0004	0.078	0.0132	0.0002	0.0319	<.0001	0.0002	1

Nota. PCS: Peso de cien semillas; PGP: Peso de grano por panoja; NGP: Número de granos por panoja; AP: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; ANP: Ancho de la panoja; LE: Longitud de la excursión; DT: Diámetro del tallo; LHB: Longitud de la hoja bandera; AHB: Ancho de la hoja bandera; NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada; CCH: Contenido de clorofila en hoja; CRA: Contenido relativo de agua; DMC 45: Daño a la membrana celular a 45 °C; DMC 50: Daño a la membrana celular a 50 °C. Correlaciones arriba de la diagonal; probabilidades debajo de la diagonal.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Variables agronómicas

Se hizo evidente la diferenciación entre híbridos en las variables de ancho de panoja y longitud de la excursión, pudiendo observar de mejor manera el agrupamiento de híbridos para estas variables. La variable longitud de la excursión es de relevancia, ya que, mientras mayor es la longitud de excursión, menor es el daño por plagas y enfermedades en la parte inferior de la panoja, puesto que los granos quedan fuera de la hoja bandera (Villeda, 2014).

Los valores de ancho de panoja contrastan con los reportados por Galicia-Juárez *et al.* (2019), quienes reportan valores de media en un rango de 11.5 cm y 15.5 cm. Esto se debe, probablemente, a la introducción de estas variedades a las condiciones climatológicas del Valle de Mexicali. Así también, el híbrido 10 presentó la media más alta de longitud de excursión (20.08 cm), mientras que Williams-Alanís *et al.* (2022) presentaron valores de media para esta variable en un rango de 9 cm y 16 cm. Este resultado destaca su relevancia agronómica, ya que una mayor longitud de excursión permite que los granos queden expuestos fuera de la hoja bandera, lo que reduce significativamente el daño causado por plagas y enfermedades en la parte inferior de la panoja (Villeda, 2014). Finalmente, el híbrido 10 destacó por presentar la mayor media en longitud de excursión (20.08 cm), superando los rangos reportados por Williams-Alanís *et al.* (2022), quienes documentaron valores entre 9 cm y 16 cm. Este resultado refuerza la importancia de esta variable como criterio de selección en programas de mejoramiento genético, especialmente en regiones donde la presión de plagas y enfermedades es elevada.

En cuanto a la altura de planta, los valores reportados por Williams-Alanís *et al.* (2022) oscilaron entre 1.55 m y 2.25 m. Es notable que el valor más bajo registrado en su estudio supera la media del híbrido más alto evaluado en el presente trabajo, lo que sugiere diferencias genotípicas importantes entre los materiales analizados. Williams-Alanís *et al.* (2022) encontraron valores de altura de planta que fluctuaron en rangos de media de 1.55 m y 2.25 m; es decir, el valor más bajo obtenido por uno de los híbridos del estudio antes mencionado fue superior a la media del híbrido más alto reportado en este estudio.

Para la variable de longitud de panoja, resultados similares fueron encontrados por otros autores en híbridos de sorgo con valores de media en un rango de 24 cm a 30 cm en el estado de Tamaulipas (Williams-Alanís *et al.*, 2022) y en el Estado de México (Galicia-Juárez *et al.*, 2019). Asimismo, respecto a la longitud de panoja, se observaron resultados consistentes con los reportados por Williams-Alanís *et al.* (2022), en el estado de Tamaulipas, y por Galicia-Juárez *et al.* (2019), en el Estado de México, quienes documentaron rangos de media entre 24 cm y 30 cm en híbridos de sorgo. Estos hallazgos respaldan la estabilidad de esta característica morfológica en diferentes condiciones agroecológicas.

En contraste, los valores de ancho de panoja obtenidos difieren de los reportados por Galicia-Juárez *et al.* (2019), quienes encontraron medias entre 11.5 cm y 15.5 cm. Esta discrepancia podría atribuirse a la adaptación de los híbridos a las condiciones climáticas particulares del Valle de Mexicali, lo que sugiere una posible plasticidad fenotípica en respuesta al ambiente.

En la variable diámetro de tallo, el híbrido 1 presentó el valor de media más alto, lo que sugiere una mayor robustez estructural. Este atributo ha sido asociado con una mejor capacidad de sostén y resistencia al acame; además, se encuentra una posible relación con la eficiencia en el transporte de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos (Zhao *et al.*, 2020).

Respecto a la longitud de la hoja bandera, el híbrido 11 mostró la media más elevada, lo cual podría implicar una mayor superficie fotosintética disponible durante la etapa de llenado de grano. La hoja bandera en sorgo cumple una función crítica en la captación de luz y en la provisión de energía para el desarrollo de los granos, especialmente bajo condiciones de estrés térmico o hídrico. Por otro lado, en la variable ancho de la hoja bandera no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los híbridos evaluados. Este resultado indica que, aunque existen variaciones morfológicas en longitud y diámetro de tallo, el ancho foliar se mantiene relativamente constante entre genotipos, lo cual podría estar determinado por factores genéticos más conservadores o por una menor plasticidad fenotípica en esta característica. Estos hallazgos son relevantes para la selección de híbridos con potencial agronómico, especialmente en regiones como Baja California, donde el sorgo se cultiva en condiciones de alta radiación solar y limitación hídrica y donde la eficiencia estructural y fotosintética puede impactar directamente en el rendimiento y la calidad del forraje destinado a la alimentación bovina.

Variables fisiológicas

Los valores de NDVI más altos los obtuvieron el H20 y H30; sin embargo, estos no fueron los híbridos con mayor rendimiento de grano, lo que contradice a Raun *et al.* (2001), quienes mencionan que esta medición ha sido utilizada para predecir el rendimiento de diferentes especies de grano, como la soya y el trigo, además de múltiples localidades, donde el NDVI fue capaz de explicar el 50%-65% de las variaciones del rendimiento del trigo.

El CCH fue diferente a lo reportado por Rangel-Lucio *et al.* (2002), quienes midieron esta variable en dos variedades de sorgo en cuatro etapas de desarrollo (macollamiento, anthesis, llenado de grano y cosecha) con valores promedio que fluctuaron de 44 a 47 unidades SPAD.

El contenido relativo de agua fluctuó en un rango de 58.80% a 79.75%, estos resultados coinciden con los reportados de sorgo en condiciones de macetas bajo estrés hídrico con un valor de media 67.6% y en riego de 88.6% (Galicia-Juárez *et al.*, 2020). La disminución de CRA es uno de los primeros síntomas de deficiencia de agua en los tejidos vegetales, aunque la hoja también se considera el índice más significativo para identificar especies con diferencias contrastantes en la tolerancia a la deshidratación (Agami *et al.*, 2018; Sinclair & Ludlow, 1986). La reducción en el CRA bajo estrés hídrico es provocada por el agotamiento del agua del suelo, el sistema de raíces no puede compensar la pérdida de agua durante el proceso de fotosíntesis a través de la conductancia estomática, y la tasa de asimilación del agua se ve afectada negativamente durante el estrés por sequía (Sepanlo *et al.*, 2014).

Las variables evaluadas de DMC a 45 °C y 50 °C no presentaron diferencias estadísticas en los valores de medias; sin embargo, podrían utilizarse para seleccionar aquellos híbridos con valores más bajos de DMC, ya que el daño se asocia a la tolerancia de estrés a sequía y altas temperatura.

Variables de rendimiento

Galicia-Juárez *et al.* (2019) reportaron resultados similares en el rendimiento de híbridos simples respecto a la variable de peso de 100 semillas, con valores en el rango de 2.2 g a 2.9 g, así como para el peso de grano por panoja, con valores de 25.8 g a 50.5 g. Sin embargo, las diferencias fueron notorias en la variable número de granos por panoja, cuyo rango de medias se reportó entre 1027 y 1712.

La magnitud de las pérdidas en el rendimiento de grano debido al estrés por sequía depende de la etapa fenológica del cultivo, así como del momento, la duración y la intensidad del estrés. Se ha observado variabilidad en la respuesta de tolerancia a sequía, la cual se ha determinado como heredable (Nagy *et al.*, 1995). El mejoramiento genético del sorgo para tolerancia a sequía permitiría estabilizar la productividad y contribuir a la sostenibilidad de los sistemas de producción en ambientes propensos a este tipo de estrés.

Asociación entre variables

El análisis de correlación permitió identificar variables agronómicas y fisiológicas que presentan una asociación estadísticamente significativa con el rendimiento del cultivo. Este resultado sugiere la viabilidad de realizar estimaciones indirectas del rendimiento durante etapas tempranas del desarrollo fenológico, lo cual podría facilitar la toma de decisiones agronómicas anticipadas. Además, el reconocimiento de estas asociaciones ofrece una base para implementar estrategias de manejo orientadas a mejorar aquellas variables que inciden significativamente en el rendimiento, contribuyendo así a su optimización de manera indirecta.

Se observó una correlación positiva altamente significativa entre el PGP y el NGP ($r = 0.9187$; $p < 0.0001$), lo que indica que el incremento en el número de granos está directamente asociado con un mayor peso total de grano por panoja. Esta relación se complementa con la correlación positiva entre el PCS y el AnP ($r = 0.4168$; $p < 0.0001$), sugiriendo que estructuras reproductivas más anchas favorecen el llenado de grano.

Por otro lado, se identificaron correlaciones negativas y altamente significativas entre PCS y DT ($r = -0.2813$; $p < 0.0001$), lo cual podría indicar que un mayor desarrollo vegetativo no se traduce en mayor peso individual de semilla, posiblemente por competencia interna por asimilados. Asimismo, el NDVI mostró una correlación negativa con el CCH ($r = -0.1577$; $p < 0.0001$), lo que sugiere que un dosel más denso no implica mayor concentración de pigmentos fotosintéticos.

El CCH presentó una correlación negativa con el CRA ($r = -0.2997$; $p < 0.0001$), lo que podría reflejar una respuesta fisiológica al estrés hídrico, donde una mayor concentración de clorofila se asocia con menor contenido relativo de agua. En contraste, el NDVI se correlacionó positivamente con el AnHB ($r = 0.2268$; $p < 0.0001$), indicando que hojas más anchas contribuyen a una mayor reflectancia del dosel, reflejando un mayor vigor vegetativo.

Respecto a las variables de tolerancia térmica, el DMC 50 mostró correlaciones positivas con NGP ($r = 0.1988$; $p = 0.0037$) y con AnHB ($r = 0.2575$; $p = 0.0132$), lo que sugiere que estructuras foliares más desarrolladas podrían estar asociadas con una mayor susceptibilidad al daño térmico. En cambio, el DMC 45 presentó correlaciones débiles o no significativas con la mayoría de las variables evaluadas.

Finalmente, variables estructurales como la LP y el AnP mostraron correlaciones positivas con PGP y NGP, aunque de menor magnitud, lo que indica que su influencia sobre el rendimiento es moderada pero relevante en el contexto del desarrollo reproductivo.

Conclusiones

La presente investigación permite identificar a los híbridos experimentales de sorgo granífero H1, H9, H10, H15, H21 y H26 con potencial para ser introducidos en la región del Valle de Mexicali y obtener rendimientos de grano que incluso superan a los híbridos comerciales utilizados en la región.

Los resultados del análisis de correlación evidencian que ciertas variables agronómicas y fisiológicas presentan una asociación significativa con el rendimiento del cultivo. Esta relación permite considerar dichas variables como indicadores potenciales para estimar el rendimiento en etapas tempranas del desarrollo fenológico. Asimismo, su identificación proporciona una base sólida para el diseño de estrategias de manejo agronómico enfocadas en optimizar estos factores, lo que podría traducirse en mejoras indirectas, pero efectivas, del rendimiento final del cultivo.

Agradecimientos

A CONAHCYT por la beca de estudios de Maestría otorgada a Luis Roberto Cervantes Ramírez. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Al Campo Experimental Rio Bravo, por la donación de los híbridos experimentales evaluados en la presente investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses.

Referencias

- Agami, R. A., Alamri, S. A. M., Abd El-Mageed, T. A., Abousekken, M. S. M., & Hashem, M. (2018). Role of exogenous nitrogen supply in alleviating the deficit irrigation stress in wheat plants. *Agricultural Water Management*, 210, 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.034>
- Blum, A., & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*, 21(1), 43–47. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010013x>
- Cuevas-Reyes, V., Sánchez, B. I., Servín, R., Reyes, J. E., Loaiza, A., & Moreno, T. (2021). Determining factors for the use of sorghum as fodder for bovines in Northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(4), 1113–1125. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11I4.5292>
- Galicia-Juárez, M., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Cisneros-López, M. E., Benítez-Riquelme, I., & Córdova-Téllez, L. (2019). Grain yield traits of single and three-way sorghum hybrids and its parental lines. *Agrociencia*, 53(6), 855–867. https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A16%3A158656/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A139042583&crl=c&link_origin=scholar.google.com
- Galicia-Juárez, M., Sinagawa-García, S., Gutiérrez-Diez, A., Williams-Alanís, H., & Zavala-García, F. (2020). Termotolerancia en líneas de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para grano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 221–227. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1945>
- García, E. (1970). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Hariprasanna, K., & Rakshit, S. (2016). Economic importance of sorghum. En S. Rakshit & Y. Wang (eds.), *The sorghum genome* (pp. 1–25). https://doi.org/10.1007/978-3-319-47789-3_1
- Karaye, I. U., Maishanu, S. M., Lawal, M. H., Adili, I. S., Shehu, A., & Gatawa, N. S. (2023). Comparative nutritional and phytochemical composition of *Sorghum Bicolor* (L.) Moench and *Zea Mays* L. *Journal of Plant Development*, 30, 129–135. <https://doi.org/10.47743/jpd.2023.30.1.932>
- McCustion, K. C., Selle, P. H., Liu, S. Y., & Goodband, R. D. (2018). Sorghum as a feed grain for animal production. En J. R. N. Taylor & K. G. Duodu (eds.), *Sorghum and millets: chemistry, technology, and nutritional attributes* (pp. 355–391). AACCI. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00012-5>
- Nagy, Z., Tuba, Z., Zsoldos, F., & Erdei, L. (1995). CO₂-Exchange and water relation responses of sorghum and maize during water and salt stress. *Journal of Plant Physiology*, 145(4), 539–544. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81785-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81785-2)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/>

- Rangel-Lucio, J. A., Alcántar, G., Castellanos, J. Z., García-Moya, E., Trejo, C., & Vaquera, H. (2002). Comparison of two tests for nitrogen diagnostic in sorghum. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 383–390. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20023194723>
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., & Schepers, J. S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131–138. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131x>
- Ronda, V., Aruna, C., Visarada, K. B. R. S., & Bhat, B. V. (2019). Sorghum for animal feed. En C. Aruna, K. B. R. S. Visarada, & V. A. Tonapi (eds.), *Breeding sorghum for diverse end uses* (pp. 229–238). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00014-0>
- Sade, N., Galkin, E., & Moshelion, M. (2015). Measuring arabidopsis, tomato and barley leaf relative water content (RWC). *Bio-protocol*, 8(5), 1–4. <https://bio-protocol.org/pdf/bio-protocol1451.pdf>
- SAS Institute Inc. (2023). *JMP, Versión 17.0.0* [Software de computadora]. <https://support.sas.com/downloads/browse.htm?fil=&cat=38>
- Sepanlo, N., Talebi, R., Rokhzadi, A., & Mohammadi, H. (2014). Morphological and physiological behavior in soybean (*Glycine max*) genotypes to drought stress implemented at pre- and post-anthesis stages. *Acta Biologica Szegediensis*, 58(2), 109–113. <https://www.abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2825>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Producción agropecuaria por entidad federativa: Baja California*. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>
- Sinclair, T. R., & Ludlow, M. M. (1986). Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(3), 329–341. <https://doi.org/10.1071/PP9860329>
- Sistema de Información para el Manejo de Agua de Riego de Baja California (SIMARBC). (2025). <https://www.simarbc.gob.mx/>
- Uñate-Fraga, S., García-López, J. I., Flores-Naveda, A., Ruiz-Torres, N., Ramírez-Barrón, S., Hernández-Juárez, A., Lozano-del Río, A., & Tafolla-Arellano, J. C. (2022). Grain yield, nutritional, polyphenols and antioxidant capacity in accessions of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1), 1–20. <https://doi.org/10.15835/nbha50112637>
- Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Vaquera-Huerta, H., Córdoba-Téllez, L., Mendoza-Castillo, M. C., & García-de los Santos, G. (2006). Raleo de flores, rendimiento de semilla y distribución de materia seca post-antesis en sorgo. *Agrociencia*, 40(3), 303–314. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30240303.pdf>
- Villeda, D. A. (2014). *Caracterización morfoagronómica de 15 accesiones de sorgo (Sorghum bicolor L Moench) con bajo contenido de lignina* [Tesis de Maestría]. Universidad de El Salvador.
- Williams-Alanis, H., Aranda, U., Árcos, G., Zavala-García, F., Galicia-Juárez, M., Rodríguez-Vázquez, M. C., & Elizondo-Barrón, J. (2022). Line x tester analysis to estimate combining ability in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 54(2), 12–21. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/5677>
- Zhao, J., Xin, Z., & Velten, J. (2020). Genetic variation for stalk strength in sorghum and its association with lodging resistance. *Crop Science*, 60(2), 693–705. <https://doi.org/10.1002/csc2.20034>