

COMPARACIÓN DE DOS MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO EN GRANO DE SORGO EN EL NORTE DE TAMAULIPAS, MÉXICO

Jorge Elizondo-Barrón¹, Ulises Aranda-Lara¹ y Héctor Williams-Alanís²

RESUMEN

El sorgo grano en México se siembra en 1 427 202 ha anuales; 55,12 % de esta superficie corresponde al estado de Tamaulipas, principalmente bajo condiciones de temporal o seco, con rendimientos de 2 284 kg ha⁻¹. El objetivo de esta investigación fue identificar genotipos de sorgo que presenten alto rendimiento de grano y estabilidad, comparando los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell y el modelo GGE biplot, para definir el modelo que mejor describa la interacción G x A. Este estudio se realizó con cinco genotipos de sorgo en 14 ambientes de prueba: siete en riego y siete en punta de riego (solo riego presiembra) en Río Bravo, Tamaulipas, en 2023. Se analizó el rendimiento de grano kg ha⁻¹ mediante los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell y el modelo GGE biplot. Los resultados muestran que cuando se utilizó el modelo de Eberhart y Russell, se identificó al híbrido P83G19 como genotipo consistente, estable, con un rendimiento grano 1,23 % superior al promedio general y al híbrido ADV-G3247 y la variedad RB-Williams, como genotipos consistentes, que responden mejor en buenos ambientes, con rendimientos grano 7,31 y 0,4 %, superiores al promedio general, respectivamente. Cuando se utilizó el modelo GGE biplot, el híbrido P83G19 exhibió estabilidad y buen rendimiento de grano. Los dos modelos de análisis de estabilidad identificaron consistentemente genotipos estables y rendidores, determinando la precisión de ambos y su utilidad para comprender la interacción genotipo x ambiente (G x A) e identificar genotipos con adaptación amplia o específica.

Palabras clave adicionales: Eberhart y Russell, GGE biplot, interacción genotipo-ambiente, *Sorghum bicolor*

ABSTRACT

Comparison of two stability analysis models for sorghum grain yield in northern Tamaulipas, Mexico

Grain sorghum is planted annually in Mexico on 1 427 202 ha; 55,12 % of this area corresponds to the State of Tamaulipas, mainly under rainfall conditions, with yields of 2 284 kg ha⁻¹. The objective of this research was to identify sorghum genotypes that present high grain yield and stability, comparing the stability parameters of Eberhart and Russell and the GGE biplot model, to define the model that best describes the G x A interaction. This research was carried out with five sorghum genotypes in 14 test environments: seven irrigated and seven only with pre-sowing irrigation in Rio Bravo, Tamaulipas, during 2023. Grain yield kg·ha⁻¹ was analyzed using the Eberhart and Russell stability parameters and the GGE biplot model. The results show that when the Eberhart and Russell model was used, the P83G19 hybrid was identified as a consistent, stable genotype, with a grain yield 1.23 % higher than the general average, and the ADV-G3247 hybrid and the RB-Williams variety were identified as consistent genotypes, which respond better in good environments, with grain yields 7.31 and 0.4 % higher than the general average, respectively. When the GGE biplot model was used, the P83G19 hybrid exhibited stability and good grain yield. The two stability analysis models consistently identified stable and high-yielding genotypes, determining the accuracy of both methods and their usefulness in understanding the Genotype x Environment (G x E) interaction to identify genotypes with broad or specific adaptation.

Additional Keywords: Eberhart and Russell, Genotype-environment interaction, GGE biplot, *Sorghum bicolor*

Editor Asociado: Dra. Marina García

INTRODUCCIÓN

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), en México se siembra en una superficie anual de 1 427 202 ha (promedio de los años 2017-2023),

con un rendimiento de 3 442 kg·ha⁻¹. En el estado de Tamaulipas la superficie sembrada con sorgo es de 786 758 ha (55,12 % de la superficie nacional), con un rendimiento de 2 585·kg·ha⁻¹; de esta superficie, 621 396 ha (78,98 %) se siembra

Recibido: Octubre 5, 2024

Aceptado: Abril 16, 2025

¹INIFAP, Campo Experimental Río Bravo, Carretera Matamoros-Reynosa, Río Bravo, Tamaulipas. México. e-mail: elizondo.jorge@inifap.gob.mx (autor de correspondencia); aranda.ulises@inifap.gob.mx;

²Ex INIFAP, Campo Experimental Río Bravo. Tamaulipas. México. e-mail: hectorwilliamsa@yahoo.com.mx

bajo condiciones de temporal o seco, con rendimientos de 2 284 kg·ha⁻¹ (SIAP, 2024).

El sorgo grano se cultiva en Tamaulipas principalmente bajo condiciones de temporal o seco, en áreas donde la escasez de humedad es un fenómeno común, las precipitaciones pluviales son impredecibles y el suelo está sujeto a períodos prolongados de sequía. Bajo estas condiciones marginales, el rendimiento potencial de los cultivos se ve opacado por el efecto de la interacción genotipo x ambiente (Cooper y DeLacy, 1994; Sodhaparmar *et al.*, 2023). La inestabilidad e incertidumbre en el rendimiento debido a la interacción genotipo x ambiente es el principal obstáculo en la identificación de genotipos superiores. Por lo tanto, se requiere identificar genotipos estables con una mayor adaptabilidad en diferentes ambientes (Crossa *et al.*, 2006; Ajmera *et al.*, 2017; Inabangan *et al.*, 2019).

Entre las metodologías para el estudio de la estabilidad de los cultivos, destaca el modelo de Eberhart y Russell (1966), que utiliza la media aritmética y señala que el coeficiente de la regresión de los efectos ambientales sobre los efectos fenotípicos puede usarse como estimador para medir la respuesta de cada genotipo a los índices ambientales. La estabilidad del rendimiento es posible medirla por la magnitud de la desviación a partir de la regresión lineal, por medio del cuadrado medio de la desviación de regresión (Kumar *et al.*, 2016). Otra metodología desarrollada para el análisis de la interacción G x A es el GGE biplot, que proporciona una herramienta gráfica para la evaluación de los genotipos (rendimiento promedio y estabilidad) y el análisis de ambientes (Crossa *et al.*, 2002; Dias *et al.*, 2016). En ese sentido, para definir el modelo que mejor describa la interacción G x A, el objetivo de esta investigación fue identificar los genotipos de sorgo que presenten alto rendimiento de grano y estabilidad, comparando los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell y el modelo GGE biplot.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el ciclo agrícola otoño-invierno 2022/2023, en los terrenos del Campo Experimental Río Bravo, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas

y Pecuarias (INIFAP), localizado en las coordenadas 25° 57' 54" latitud norte y 98° 01' 03" longitud oeste y altitud 50 msnm (Salinas *et al.*, 2006); con 669.7 mm de precipitación pluvial y 23.8 °C de temperatura media anual (Weslaco, Lower Rio Grande Valley, Texas Daily Weather Summaries: 2014-2024). El experimento fue establecido con cinco genotipos de sorgo grano: RB-Norteño (1) y RB-Williams (2), (híbrido comercial y variedad de polinización libre, respectivamente, ambos generados por el programa de mejoramiento genético de sorgo grano del INIFAP, Campo Experimental de Río Bravo); DKS-821 (3), P83G19 (4) y ADV-G3247 (5), los híbridos comerciales más sembrados en el norte de Tamaulipas. Tres de ciclo precoz, RB-Norteño (1), DKS 821 (3) y P83G19 (4) y dos de ciclo intermedio, RB-Williams (2) y ADV-G3247 (5).

Los genotipos fueron sembrados en dos condiciones de humedad del suelo (riego y punta de riego), en siete fechas de siembra espaciadas cada 15 días, a partir del 01 de enero de 2023 (01 enero, 16 enero, 01 febrero, 16 febrero, 01 marzo, 16 marzo y 01 abril). Cada una de las fechas de siembra, se estableció en riego y punta de riego, y se consideró como ambiente: siete ambientes en riego (01 ene AMB1, 16 ene AMB2, 01 feb AMB3, 16 feb AMB4, 01 mar AMB5, 16 mar AMB6, 01 abr AMB7), más siete ambientes en punta de riego (01 ene AMB8, 16 ene AMB9, 01 feb AMB10, 16 feb AMB11, 01 mar AMB12, 16 mar AMB13, 01 abr AMB14). Al respecto, Eberhart y Russell (1966), recomendaron utilizar fechas de siembra para obtener una mayor diversidad de condiciones ambientales.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones, donde los 14 ambientes fueron la parcela grande y los cinco genotipos la parcela chica. Se realizó un análisis de varianza combinado (ANOVA) para los efectos principales del genotipo (G) y el ambiente (A) utilizando el siguiente modelo: $Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + (GA)_{ij} + B_k + (Aj)_j + E_{ijk}$; donde: Y_{ijk} es el rendimiento promedio del i-ésimo genotipo obtenido en el j-ésimo ambiente y k-ésimo bloque, μ es el efecto de la media global, G_i es el efecto del i-ésimo genotipo, A_j es el efecto del j-ésimo ambiente, $(GA)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente, $B_k(A_j)$ es el efecto del k-ésimo bloque en el j-

ésimo ambiente, E_{ijk} es el efecto del error aleatorio asociado al i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente y k -ésimo bloque. La densidad de población utilizada fue de 250.000 plantas ha^{-1} . La parcela experimental fue de tres surcos de 5 m de largo y 0,8 m de separación. La parcela útil fue un surco central de 3 m de largo (se eliminó un metro en cada extremo del surco), la variable de estudio fue rendimiento en $kg\ ha^{-1}$. Para el manejo del cultivo se utilizó el paquete tecnológico recomendado por el INIFAP para el cultivo de sorgo grano en el norte de Tamaulipas (INIFAP, 2017).

Para el establecimiento de cada una de las fechas de siembra, en ambas condiciones de humedad del suelo (riego y punta de riego), se aplicó el riego de asiento o presiembrado (consistente en una lámina de 15 cm de agua). En la condición de riego se aplicó al inicio de floración, un riego de auxilio consistente en una lámina de agua de 12 cm; mientras que, en la condición de punta de riego, no se aplicó riego de auxilio. Durante el desarrollo del cultivo se presentó la siguiente precipitación pluvial: marzo, 33,2 mm; abril, 88,0 mm; mayo, 71,4 mm; y junio, 22,8 mm para un total acumulado de 215,4 mm. El rendimiento de grano se analizó mediante el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute, 2016), bajo el modelo estadístico (Steel y Torrie, 1980). Se realizaron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey al 5 %.

El análisis combinado se realizó principalmente para identificar la existencia o no de la interacción genotipo x ambiente. Una vez que se encontró una interacción $G \times A$ en la variable de respuesta, se recurrió al análisis de estabilidad propuesto por Eberhart y Russell (1966). Este modelo estadístico permite estimar los parámetros de estabilidad para cada genotipo a partir del siguiente modelo de regresión lineal: $Y_{ij} = \mu_i + B_{ij} + I_j + \xi_{ij}$; donde Y_{ij} es el promedio del genotipo i -ésimo en el j -ésimo ambiente; μ_i corresponde al promedio del i -ésimo genotipo sobre todos los ambientes; B_i es el coeficiente de regresión que mide la respuesta del i -ésimo genotipo en varios ambientes; I_j corresponde al índice ambiental que se obtiene a partir de la diferencia del promedio del j -ésimo ambiente con el correspondiente promedio general; ξ_{ij} es la desviación de regresión lineal del i -ésimo

genotipo en el j -ésimo ambiente. Para cada genotipo se realizó un análisis de regresión, utilizando el índice ambiental como la variable independiente y el rendimiento de grano como la variable dependiente (Rana *et al.*, 2021; Vásquez *et al.*, 2021; Herrera *et al.*, 2023).

Para definir la estabilidad y la consistencia de los genotipos de sorgo, se utilizó la clasificación propuesta por Carballo y Márquez (1970) y Vásquez *et al.* (2019). Esta información señala que un coeficiente de regresión de $b = 1$ corresponde con un genotipo estable, en tanto que valores mayores ($b > 1$) corresponden a genotipos que responden mejor a ambientes buenos, y valores menores ($b < 1$) indican a los materiales que funcionan mejor en ambientes desfavorables.

Para el análisis de la relación entre el genotipo y el ambiente, se usó el modelo GGE biplot mediante el programa GEA-R descrito por Angela y Vargas (2015). El modelo para el GGE biplot (Yan, 2002), está basado en la descomposición de los valores de los dos primeros componentes principales: $Y_{ij} - Y_j = \bar{e}_1 \hat{f}_{i1} \zeta_{j1} + \bar{e}_2 \hat{f}_{i2} \zeta_{j2} + \epsilon_{ij}$; donde Y_{ij} es el promedio del genotipo i en el ambiente j ; Y_j es el promedio de todos los genotipos en el ambiente j ; $\bar{e}_1$ y $\bar{e}_2$ son los valores para el primer y segundo componente principal, respectivamente; $\hat{f}_{i1}$ y $\hat{f}_{i2}$ son las calificaciones del genotipo i para el primer y segundo componente principal, respectivamente; ζ_{j1} and ζ_{j2} son las calificaciones del genotipo j para el primer y segundo componente principal, respectivamente; ϵ_{ij} es el residuo del modelo asociado con el genotipo i en el ambiente j .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de Eberhart y Russell. En el análisis de varianza combinado para rendimiento de grano de cinco genotipos en 14 ambientes, se obtuvo un coeficiente de variación de 9,92 % e identificó la existencia de la interacción $G \times A$ (Cuadro 1). Esto debido a las variaciones en condiciones climáticas y de humedad del suelo (siete fechas de siembra, cada una en condición de riego y punta de riego). Resultados similares fueron los de Faria *et al.* (2017) y Aranda *et al.* (2024), quienes al evaluar la adaptación y estabilidad de híbridos de maíz, observaron diferencias significativas para la interacción $G \times A$.

Cuadro 1. Análisis de varianza para rendimiento de grano de cinco genotipos de sorgo, en 14 ambientes, en Río Bravo, Tam., ciclo O-I 2022-2023

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Repetición	2	245 776,0	
Ambiente	13	13 678 566,3	52,51**
RepeticiónxAmbiente	26	400 235,4	
Genotipo	4	9 277 816,0	35,62**
GenotipoxAmbiente	52	647 209,5	2,48**

** Diferencia estadística significativa (Tukey; $p \leq 0,01$)

$R^2 = 0,8989$; coeficiente de variación = 9,9 % ; Media de rendimiento de grano = 5 140 kg·ha⁻¹

En el Cuadro 2, se presenta el análisis de varianza para rendimiento de grano de acuerdo con el modelo de Eberhart y Russell (1966). Los resultados mostraron diferencia estadística significativa ($p \leq 0,05$) para ambientes, genotipos y

para la interacción G x A. Estos resultados sugieren la existencia de variación entre genotipos y entre ambientes; similarmente a lo observado por Solomon y Yohans (2021) en el cultivo de mijo perla.

Cuadro 2. Análisis de varianza de acuerdo con el modelo de Eberhart y Russell 1966 para rendimiento de grano de cinco genotipos de sorgo, en 14 ambientes, en Río Bravo, Tam., ciclo O-I 2022-2023

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Total	69		
Genotipo	4	3 092 622,46	19,99*
GenotipoxAmbiente	65	1 084 493,62	7,01*
Ambiente Lineal	1		
GenotipoxAmbiente Lineal	4	484 891,99	3,13*
Desviaciones ponderadas	60	154 645,50	
RB-Norteño	12	210 124,65	2,26*
RB-Williams	12	97 771,40	1,05
DKS-821	12	217 324,5	2,34*
P83G19	12	108 711,25	1,17
ADV-G3247	12	141 545,75	1,52
Error Ponderado	112	92 702,59	

* Diferencia estadística significativa ($p \leq 0,05$)

En el Cuadro 3, se muestra el rendimiento de grano promedio y los parámetros de estabilidad (coeficiente de regresión b_i , desviación de regresión s^2_{di}). De acuerdo con b_i , se determinó que los híbridos DKS-821, P83G19 y RB-Norteño, no fueron estadísticamente diferentes de 1.0; por su parte, el híbrido ADV-G3247 y la variedad RB-Williams, fueron estadísticamente mayores a 1.0. La variación en los valores de los coeficientes de regresión, indica las diferencias en las respuestas de los genotipos a las fluctuaciones ambientales (Nur *et al.*, 2018).

Además, basados en la prueba de desviaciones de regresión, los híbridos DKS-821 y RB-Norteño, mostraron s^2_{di} estadísticamente mayores de cero; mientras que, los híbridos ADV-G3247, P83G19 y la variedad RB-Williams resultaron en s^2_{di} estadísticamente iguales a cero. Por lo anterior, de acuerdo con la clasificación de Carballo y Márquez (1970), el híbrido P83G19 se define como genotipo consistente, estable, con un rendimiento de grano 1,23 % superior al promedio general. El híbrido ADV-G3247 y la variedad RB-Williams, se definen como genotipos consistentes, que responden mejor en buenos ambientes, con

rendimientos de grano 7,31 y 0,4 %, superiores al promedio general, respectivamente. Los híbridos DKS-821 y RB-Norteño, se definen como genotipos con buena respuesta en todos los ambientes, pero inconsistentes (sus rendimientos

no son predecibles). Resultados similares obtuvieron Patel *et al.* (2019), quienes al evaluar mijo perla observaron genotipos con alto valor de desviación de regresión los cuales se consideraron como inestables.

Cuadro 3. Rendimiento promedio (kg ha^{-1}) y parámetros de estabilidad (bi , s^2di) de cinco genotipos de sorgo evaluados en 14 ambientes, en Río Bravo, Tam., ciclo O-I 2022-2023.

Genotipo	Rendimiento kg ha^{-1}	Coefficiente de regresión bi	Desviación de regresión s^2di	Clasificación de acuerdo con Carballo y Márquez (1970)
ADV-G3247	5 516,01 a*	1,11	48 843	Responde mejor en buenos ambientes, consistente
DKS-821	5 471,53 ab	0,99	124 621	Buena respuesta en todos los ambientes, inconsistente
P83G19	5 203,85 bc	0,92	16 008	Estable, consistente
RB-Williams	5 162,23 c	1,24	5 068	Responde mejor en buenos ambientes, consistente
RB-Norteño	4 347,70 d	0,71	117 422	Buena respuesta en todos los ambientes, inconsistente

*Letras diferentes en misma columna, indican diferencia estadística significativa (Tukey; $p \leq 0,01$)

Modelo GGE biplot. En el análisis GGE biplot, el modelo utilizado explicó 86,76 % de la variabilidad total ($PC1 = 73,3$ % y $PC2 = 13,46$ %), (Figuras 1, 2, 3 y 4). En la Figura 1, se presenta el plano del genotipo y genotipo x ambiente que indica la representatividad de 14 ambientes de evaluación de estabilidad de cinco genotipos de sorgo. Se observan los puntos de dispersión de ambientes y genotipos, cada ambiente se identifica como AMB mas el número de ambiente que le corresponde y cada genotipo se identifica con el número que le corresponde. Además, se presenta una flecha dibujada en un ambiente calculado cuyos puntos se obtienen con la media de los valores promedio de genotipos y de ambientes para ambos componentes principales; la dirección que indica la flecha es hacia donde se ubican los mejores genotipos (Yang y Kang, 2003), por lo que este eje permite definir sus comportamientos. Al tomar como referencia el eje de las abscisas (X) del ambiente medio, se infiere que el mejor genotipo fue ADV-G3247 (5), seguido de DKS-821 (3) y P83G19 (4).

Para la interpretación de los genotipos el patrón de respuesta de la Figura 2, es el que permite identificar cuál genotipo obtuvo el mayor rendimiento y en cuál ambiente (Yan y Rajcan, 2002). Este concepto tiene como base el hecho de

que los genotipos con los vectores con mayor rendimiento son los que se ubican a mayor distancia del origen del biplot, de forma que, al unir estos genotipos con una línea recta, se forma un polígono que identifica la adaptación de los genotipos a los ambientes (Yan y Tinker, 2006; Rad, *et al.*, 2013). Con estos datos el polígono muestra los genotipos de mejor comportamiento en cada ambiente. Para el cuadrante I, se precisa que, entre los ambientes AMB8, AMB4, AMB12, AMB9, AMB7, AMB14, los genotipos que mayor rendimiento presentaron fueron DKS-821 (3) y P83G19 (4). Para el cuadrante IV, se precisa que, entre los ambientes AMB1, AMB3, AMB5, AMB13, AMB11, AMB6, AMB2, AMB10, los genotipos que mayor rendimiento presentaron fueron ADV-G3247 (5) y RB-Williams (2). Por su parte, RB-Norteño (1) ubicado en el cuadrante II, donde no se observó ningún ambiente, se interpreta como un genotipo que presentó bajo rendimiento y no sobresalió en ningún ambiente. Resultados similares son los de Adham *et al.* (2022), en maíz.

El GGE biplot ayudó a reconocer patrones de la interacción $G \times A$, ofreciendo una comprensión clara de qué genotipo se desempeñó bien en ambientes específicos, facilitando la discriminación de mega ambientes (Blanche y Myers, 2006; Yan y Tinker, 2006). En este caso se

identificaron dos mega ambientes: un primer mega ambiente formado por AMB8, AMB4, AMB12, AMB9, AMB7 y AMB14 (ambientes bajo condiciones de punta de riego, excepto AMB4), en el cual se ubicaron los híbridos DKS-821(3) y P83G19 (4); el segundo mega ambiente formado por AMB1, AMB3, AMB5, AMB13, AMB11, AMB6, AMB2 y AMB10 (ambientes bajo condiciones de riego, excepto AMB13, AMB11 y AMB10), en el cual se identificó al híbrido ADV-G3247 (5) y la variedad RB-Williams (2). Este patrón se alinea con lo reportado por Bilate *et al.* (2023), quienes informaron sobre la división de ambientes de prueba en varios mega ambientes con diferente número de genotipos de cassava.

En la Figura 3, se observan los puntos de dispersión de ambientes y genotipos; además de una flecha en un eje calculado cuyos puntos se obtienen con la media de los valores promedio de genotipos y de ambientes para ambos componentes principales. Al unir ambos puntos (genotipos y ambientes) con una recta permite

ubicar el ambiente teórico promedio; la dirección que indica la flecha es hacia donde se ubican los mejores genotipos, por lo que se infiere que el mejor genotipo fue DKS 821 (3) seguido por ADV-G3247 (5), RB-Williams (2) y P83G19 (4); mientras que, el genotipo de menor rendimiento de grano fue RB-Norteño (1). El eje de las ordenadas, permite ubicar el grado de interacción entre cada genotipo y el ambiente medio; así RB-Norteño (1) mostró la mayor estabilidad, P83G19 (4) exhibió estabilidad promedio y RB-Williams (2) fue el genotipo de menor estabilidad. Williams *et al.* (2021) usaron GGE biplot en sorgo blanco y reportaron que el método generó amplia información en la evaluación de genotipos y ambientes. Yihunie y Gesesse (2018) utilizando el análisis biplot GGE, identificaron el genotipo de chícharo más estable y de mayor rendimiento. Así mismo, Ruswandi *et al.* (2022), reportaron que el análisis GGE biplot fue efectivo para seleccionar híbridos de maíz con rendimientos altos y estables.

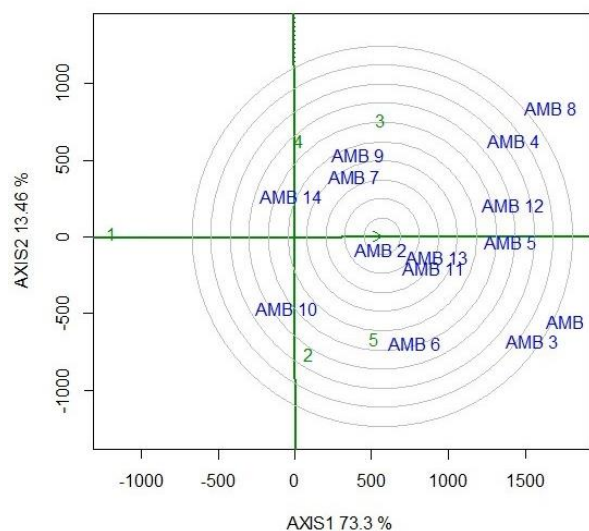


Figura 1. Plano de Genotipo y Genotipo x Ambiente (GGE biplot) que indica la representatividad de 14 ambientes de evaluación de estabilidad de cinco genotipos de sorgo.

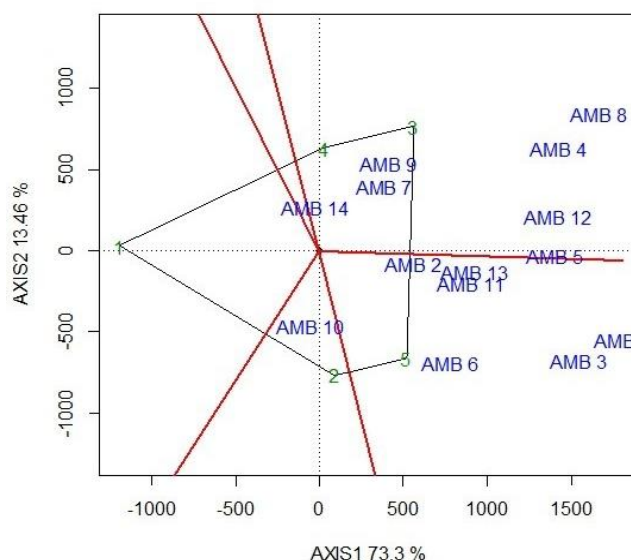


Figura 2. Ambiente de evaluación de estabilidad y adaptabilidad de cinco genotipos de sorgo evaluados en 14 ambientes, representados en el Plano de Genotipo y Genotipo x Ambiente (GG biplot).

Respecto a la clasificación de ambientes, según Ruswandi *et al.* (2021), el ambiente ideal es el que tiene la distancia más cercana al punto ideal indicado con la flecha. En la Figura 4, se observa que los mejores rendimientos del sorgo ocurrieron en los siguientes ambientes: AMB12, AMB5,

AMB1, AMB3, AMB4, AMB8, AMB13, AMB11. Al separarlos de acuerdo con la condición de humedad del suelo, se observa que en condiciones de punta de riego los mejores ambientes fueron: AMB12 (01 marzo), AMB8 (01 enero), AMB13 (16 marzo), AMB11 (16 febrero).

Mientras que en condiciones de riego los mejores ambientes fueron: AMB5 (01 marzo), AMB1 (01 enero), AMB3 (01 febrero), AMB4 (16 febrero).

Comparación de los dos modelos. Para definir la mejor metodología para caracterizar a los genotipos más estables y los ambientes donde los genotipos presentan una mejor respuesta en rendimiento de grano, se compararon los valores correspondientes a los parámetros de estabilidad y los de GGE biplot. El modelo GGE biplot, identificó como ambientes con mejor respuesta por parte de los genotipos para rendimiento en riego a: AMB5, AMB1, AMB3, AMB4; y para punta de riego a: AMB12, AMB8, AMB13,

AMB11. Por su parte, el modelo de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell, identificó como los mejores ambientes por los valores de sus índices ambientales positivos (datos no mostrados), para rendimiento en riego a: AMB3, AMB5, AMB2, AMB4, AMB1; y para punta de riego a: AMB12, AMB11, AMB10, AMB9. La correspondencia que existió entre ambos modelos fue de 75 % coincidiendo al determinar todos los mejores ambientes en riego, mientras en punta de riego coincidieron ambos modelos en determinar dos de los cuatro mejores ambientes (50% de correspondencia entre modelos).

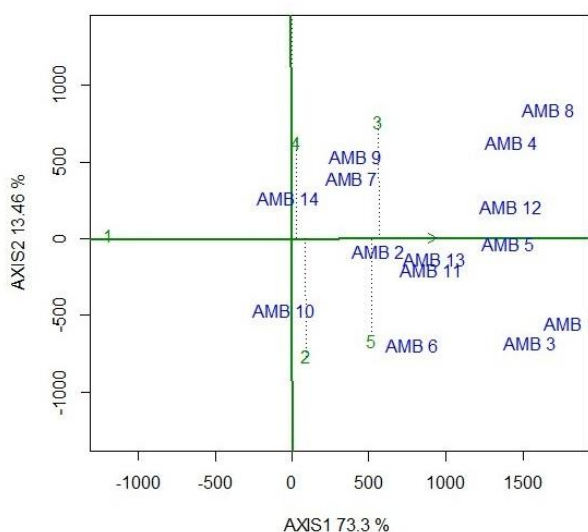


Figura 3. Estabilidad de cinco genotipos de sorgo blanco evaluados en 14 ambientes, representados en el Plano de Genotipo y Genotipo x Ambiente (GGE biplot), indicando el ordenamiento de genotipos basados en el rendimiento medio y estabilidad obtenido para cada ambiente.

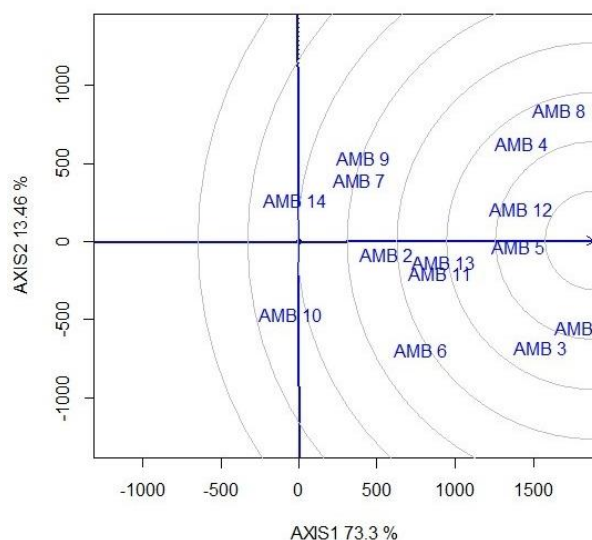


Figura 4. Plano de Ambiente (GGE biplot) que indica la representatividad de 14 ambientes de evaluación

En la comparación del modelo GGE biplot con Eberhart y Russell para identificar los genotipos más estables y rendidores se encontró que con el modelo GGE biplot, RB-Norteño (1) fue un genotipo estable pero el de menor rendimiento de grano, y P83G19 (4) exhibió estabilidad promedio y buen rendimiento de grano. Con el modelo de los parámetros de estabilidad, el genotipo estable y rendidor fue P83G19 (4). Por tal motivo, la correspondencia entre ambos modelos fue 50 %. Además, el modelo de parámetros de estabilidad, identificó a ADV-G3247 (5) y RB-Williams (2), como genotipos consistentes que responden mejor en buenos ambientes (bajo condiciones de riego); así mismo, GGE biplot ubicó en el mega ambiente

(condición de riego), a los genotipos ADV-G3247 y RB-Williams, por lo que se observó 100 % de correspondencia entre ambos modelos.

CONCLUSIONES

Los dos modelos de análisis de estabilidad del rendimiento de grano de sorgo (parámetros de estabilidad y GGE biplot), identificaron consistentemente al híbrido P83G19 como un genotipo estable y rendidor. Esto indica la precisión de ambos métodos y su utilidad para comprender la interacción GxE para rendimiento de grano e identificar genotipos con adaptación

amplia o específica. Los ambientes con mejor respuesta de los genotipos en rendimiento de grano bajo condiciones de riego fueron AMB1, AMB3, AMB4, AMB5 (fechas de siembra comprendidas entre el 01 de enero al 01 de marzo); y, bajo condiciones de punta de riego fueron AMB8, AMB11, AMB12, AMB13 (fechas de siembra comprendidas entre el 01 de enero al 16 de marzo).

LITERATURA CITADA

1. Adham, A., M.B.A. Ghaffar, A.M. Ikmal y N.A.A. Shamsudin. 2022. Genotype × environment interaction and stability analysis of commercial hybrid grain corn genotypes in different environments. *Life* 12(11): 1773.
2. Ajmera, S., S.S. Kumar y V. Ravindrababu. 2017. Genotype x environment interactions and stability analysis for grain iron and zinc concentrations in rice *Oryza sativa* L., genotypes. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 6: 1902-1913.
3. Angela, P. y M. Vargas. 2015. GEA-R (genotype x environment analysis with R for windows) version 2.0. International Maize and Wheat Improvement Center 36. <https://gea-r.software.informer.com/>
4. Aranda-Lara, U., L. Ledesma-Ramírez, R. Hernández-Martínez, S. Ruiz-Ramírez, O. Gayosso-Barragán, J. Cid-Río y H. Flores-Gallardo. 2024. Genotype by Environment Interaction of Maize (*Zea mays* L.) Hybrid Yield in Guanajuato, Mexico. *Agro Productividad* 17(9): 15-26.
5. Bilate, D.B., Y.D. Belew, B.T. Muluaem y A.W. Gebreselassie. 2023. AMMI and GGE Biplot analyses for mega environment identification and selection of some high-yielding cassava genotypes for multiple environments. *International Journal of Agronomy* 1: 1-13.
6. Blanche, S.B. y G.O. Myers. 2006. Identifying discriminating locations for cultivar selection in Louisiana. *Crop Science* 46: 946-949.
7. Carballo, C. y S. Márquez. 1970. Comparación de variedades de maíz del Bajío y de la Mesa Central por su rendimiento y estabilidad. *Agrociencia* 1(5): 129-146.
8. Cooper, M. e I.H. DeLacy. 1994. Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype by environment interaction in plant breeding multi environment experiments. *Theoretical and Applied Genetics* 88: 561-572.
9. Crossa, J., J. Burgueño, P.L. Cornelius, G. McLaren, R. Trethowan y A. Krishnamachari. 2006. Modeling genotype x environment interaction using additive genetic covariances of relatives for predicting breeding values of wheat genotypes. *Crop Science* 46: 1722-1733.
10. Crossa, J., P.L. Cornelius y W. Yan. 2002. Biplot of linear-bilinear models for studying crossover genotype x environment interaction. *Crop Science* 42: 619-633.
11. Dias, C., C. Santos y J.T. Mexia. 2023. Genotype x Environment interaction: A comparison between joint regression analysis and weighted Biplot models. *WSEAS Transactions on Environment and Development*.
12. Eberhart, S.A. y W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40.
13. Faria, S.V., L.S. Luz, M.C. Rodrigues, C.J.E. de Souza, P.C.S. Carneiro y L.R. Oliveira. 2017. Adaptability and stability in comercial maize hybrids in the southeast of the State of Minas Gerais, Brasil. *Agronomic Science Magazine* 48(2): 347-357.
14. Herrera-Portilla, D.M, O.E. Checa-Coral y D.M. Rodríguez-Rodríguez. 2023. Adaptabilidad y estabilidad fenotípica para el rendimiento en vaina verde de 20 líneas de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) con gen afila. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 21: 73-84.
15. Inabangan-Asilo, M.A., B.P.M. Swamy, A.F. Amparado, G.I. Descalsota-Empelo, E.C. Arocena y R. Reinke. 2019. Stability and G x E analysis of zinc-biofortified rice genotypes evaluated in diverse environments. *Euphytica* 215: 61.
16. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y

- Pecuarias. 2017. Agenda Técnica Agrícola Tamaulipas. 409 p.
17. Kumar, V., A.S. Kharub, R.P.S. Verma y A. Verma. 2016. Applicability of joint regression and biplot models for stability analysis in multi environment barley *Hordeum vulgare* trials. Indian Journal of Agricultural Sciences 86(11): 1443-8.
 18. Nur, A., K. Syahrudin, M. Azrai y M. Farid. 2018. Genetic by environment interactions and stability of tropical wheat lines in Indonesian medium-plains. IOP Conference Series Earth Environmental Science 157: 012049.
 19. Patel, J.M., M.S. Patel, H.N. Patel, N.V. Soni y N.N. Prajapati. 2019. Stability analysis in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). International Journal of Chemical Studies 7(4): 2371-2375.
 20. Rad, M.N., M.A. Kadir, M.Y. Rafii, H.Z. Jaafar, M.R. Naghav y F. Ahmadi. 2013. Genotype environment interaction by AMMI and GGE biplot analysis in three consecutive generations of wheat (*Triticum aestivum*) under normal and drought stress conditions. Australian Journal of Crop Science 7(7): 956-961.
 21. Rana, C., A. Sharma, K.C. Sharma, P. Mittal, B.N. Sinha, V.K. Sharma *et al.* 2021. Stability analysis of garden pea (*Pisum sativum* L.) genotypes under North Western Himalayas using joint regression analysis and GGE biplots. Genetic Resources and Crop Evolution 68: 999-1010.
 22. Ruswandi, D., M. Syafii, H. Maulana, M. Ariyanti, N.P. Indriani y Y. Yuwariah. 2021. GGE biplot analysis for stability and adaptability of maize hybrids in western region of Indonesia. International Journal of Agronomy 5: 1-9.
 23. Ruswandi, D., M. Syafii, N. Wicaksana, H. Maulana, M. Ariyanti, N.P. Indriani *et al.* 2022. Evaluation of high yielding maize hybrids based on combined stability analysis, sustainability index, and GGE biplot. BioMed Research International 1: 1-12.
 24. Salinas-García, J.R., M. Alvarado-Carrillo y R. Sánchez-de la Cruz. 2006. Suelo y Agua. En: LA. Rodríguez-del Bosque (ed.). Campo Experimental Río Bravo: 50 años de investigación agropecuaria en el norte de Tamaulipas Historia, logros y retos. Libro técnico No. 1. INIFAP, Campo Experimental Río Bravo. Río Bravo, Tamaulipas, México. pp. 147-162.
 25. SAS Institute. 2016. SAS/STAT® 9.1 User'S Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
 26. SIAP. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. 2024. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
 27. Sodhaparmar, M.K., M.S. Patel, R.A. Gami, S.D. Solanki, N.N. Prajapati y R.L. Visakh. 2023. Stability analysis in pearl millet *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. Frontiers in Crop Improvement 11(1): 21-26.
 28. Solomon, H. y A.G. Yohans. 2021. GGE biplot analysis of yield performance and stability of pearl millet genotypes (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) across different environments in Ethiopia. Advances in Crop Science and Technology 9: 8.
 29. Steel, R.G.D. y J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 3rd ed. McGraw-Hill. New York, N.Y.
 30. Vásquez, A.V., H.H.A. Cabrera, D.L. Jiménez y A. Colunche. 2019. Estabilidad del rendimiento de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.). Ecología Aplicada 18(1).
 31. Vásquez, A.V., H.A. Medina, H.H.A. Cabrera y D.L. Jiménez. 2021. Estabilidad del rendimiento en maíz morado de Perú utilizando los modelos de Eberhart-Russell y Lin-Binns. Agronomía Tropical 71: 1-10.
 32. Williams, A.H., U. Aranda, G. Arcos, F. Zavala, M. Rodríguez y E. Olivares. 2021. Potencial productivo de variedades experimentales de sorgo blanco para el sur de Tamaulipas. Nova Scientia 13(2): 1-19.
 33. Yan, W. 2002. Singular-value partitioning in biplot analysis of multienvironment trial data. Agronomy Journal 94: 990-996.
 34. Yan, W. e I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. Crop Science 42(1):11-20.

35. Yan, W. y N.A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. Canadian Journal of Plant Sciences 86: 623-645.
36. Yang, W. y M.S. Kang. 2003. GEE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. CRC press: Boca Raton, FL. 271 p.
37. Yihunie, T.A. y C.A. Gesesse. 2018. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes in Northwestern Ethiopia. Journal of Crop Science and Biotechnology 21: 67-74.