



APTITUD COMBINATORIA PARA RENDIMIENTO DE GRANO Y PUDRICIÓN DE TALLO Y MAZORCA EN MAÍZ

COMBINING ABILITY FOR GRAIN YIELD AND STALK AND EAR ROT IN MAIZE

Alfonso Peña-Ramos^{1*}, Omar I. Santana¹, José L. Ramírez-Díaz² y Alejandro Ledesma-Miramontes²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Pabellón, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. ²INIFAP, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia (pena.alfonso@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La identificación de germoplasma con alto rendimiento y resistente a enfermedades es una prioridad en los programas de mejoramiento genético de maíz en México, especialmente ante los desafíos que representa el *Fusarium* spp. en la pudrición de tallo (PT) y mazorca (PMZ), enfermedades que causan pérdidas en la producción. Los objetivos del estudio fueron determinar la aptitud combinatoria de líneas, probadores y sus cruza, e identificar las mejores para rendimiento de grano (REND) y menor incidencia de PT y PMZ. Ocho líneas derivadas de tres poblaciones se cruzaron con tres probadores seleccionados por tolerancia a PT y PMZ. Las 24 cruza y un testigo comercial se evaluaron en riego en 2023, en un lote con alta prevalencia de *Fusarium* spp. en dos fechas de siembra, utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$ o $P \leq 0.01$) en fechas de siembra (FS), cruza, FS $\times$ cruza, líneas, probadores y líneas $\times$ probadores para REND, PT y PMZ; además, se detectaron interacciones significativas FS $\times$ línea y FS $\times$ probador solo para REND. Las cruza 1 $\times$ 3, 2 $\times$ 3 3 $\times$ 2, 3 $\times$ 3, 3 $\times$ 4, 3 $\times$ 5 y el testigo destacaron con rendimientos superiores ($P \leq 0.05$) y menor incidencia de PT y PMZ, pero solo 3 $\times$ 1, 3 $\times$ 2 y 3 $\times$ 4 tuvieron ACE significativas para REND con valores de 1.21, 1.12 y 1.26, respectivamente. La cruza 3 $\times$ 2 destacó adicionalmente por menor incidencia de PMZ, con una ACE de -5.03. El probador 3 y la línea 3 fueron la mejor fuente de alelos para las características estudiadas, aunque solo la línea 3 presentó ACG significativa para REND, PMZ y PT, con valores de 2.49, -6.19 y -4.59, respectivamente. Se concluye que la línea 3 y el probador 3 son candidatos prometedores para generar híbridos con alto rendimiento y menor incidencia de *Fusarium* spp.

Palabras clave: *Zea mays* L., línea $\times$ probador, pudrición de mazorca, pudrición de tallo, rendimiento de grano.

SUMMARY

The identification of high-yielding, disease-resistant germplasm is a priority in maize breeding programs in Mexico, particularly in response to the challenges posed by *Fusarium* spp. in the stalk rot (SR) and ear rot (ER), which severely affect crop production. The objectives of this study were to determine the combining ability of lines, testers, and their crosses, and to identify the best ones for grain yield (GY) and lower incidence of SR and ER. Eight lines derived from three populations were crossed with three testers previously selected for SR and ER tolerance. The 24 hybrids and one commercial check

were evaluated under irrigation in 2023, in a field with high *Fusarium* spp. prevalence, across two planting dates, using a randomized complete block design with three replications. Results showed significant differences ($P \leq 0.05$ or $P \leq 0.01$) for planting date (PD), hybrids, PD $\times$ hybrids, lines, testers, and line $\times$ tester interactions for GY, SR and ER; in addition, significant PD $\times$ line and PD $\times$ tester interactions were detected for GY only. Crosses 1 $\times$ 3, 2 $\times$ 3, 3 $\times$ 2, 3 $\times$ 3, 3 $\times$ 4, 3 $\times$ 5, and the commercial check exhibited superior yields ($P \leq 0.05$) and lower incidence of SR and ER; however, only crosses 3 $\times$ 1, 3 $\times$ 2 and 3 $\times$ 4 showed significant specific combining ability (SCA) for GY, with values of 1.21, 1.12 and 1.26, respectively. Cross 3 $\times$ 2 also stood out for lower ER incidence, with an SCA of -5.03. Tester 3 and line 3 were the best sources of alleles for the studied traits; although only line 3 showed significant general combining ability for GY, ER and SR, with values of 2.49, -6.19 and -4.59, respectively. In conclusion, line 3 and tester 3 are promising candidates for developing hybrids with high yield and reduced incidence of *Fusarium* spp.

Index words: *Zea mays* L., ear rot, grain yield, line $\times$ tester, stem rot.

INTRODUCCIÓN

En México se producen cerca de 27 millones de toneladas de maíz al año para consumo humano, pecuario e industrial, producción que es insuficiente para cubrir la demanda, por lo que en 2024 se importaron 23.1 millones de toneladas (DGSIA, 2025), lo cual indica que en México se requiere tecnología y mucho esfuerzo para disminuir la dependencia en maíz.

El mejoramiento genético, manejo agronómico, y sobre todo, la tolerancia a factores adversos, son esenciales para elevar la productividad y reducir pérdidas del cultivo (Aswini et al., 2023). Lo anterior tiene relevancia en México si se considera que en los últimos 20 años, la producción nacional de maíz se incrementó en cerca de 9.9 millones de toneladas (SIAP, 2024); sin embargo, el clima adverso, enfermedades, manejo agronómico deficiente y uso de híbridos de bajo rendimiento limitan incrementos mayores en la producción de maíz.

En México, la pudrición de tallo y de mazorca, causada por *Fusarium* spp. constituye una de las principales limitantes fitosanitarias del maíz, pues ocasionan pérdidas en el rendimiento por muerte prematura de plantas y acame (Pfordt *et al.*, 2020); además, las micotoxinas que producen afectan la salud humana y animal (Santiago *et al.*, 2020). En las zonas maiceras de las regiones norte centro y centro occidente de México el patógeno está presente, pero la información de la virulencia de algunas cepas y de la tolerancia de híbridos a la enfermedad es preliminar (Briones *et al.*, 2021). La incidencia de las enfermedades causadas por *Fusarium* es altamente influenciada por condiciones de clima. El clima cálido y seco (28 a 30 °C) en etapas de desarrollo temprano, seguido de alta humedad durante el llenado de grano, favorece la incidencia de la enfermedad (Archana *et al.*, 2019). El número de días con alta precipitación y baja temperatura de floración a cosecha también se han encontrado asociados con la presencia de la enfermedad en varias especies de *Fusarium* (Czembor, *et al.*, 2024). Estas condiciones de clima, con algunas excepciones, son las que prevalecen en la región de estudio, de ahí que la incidencia y daño por *Fusarium* sea muy alta y destaque la importancia de identificar y seleccionar germoplasma de maíz resistente para disminuir los efectos de la enfermedad (Xu *et al.*, 2023) y pérdidas en rendimiento de grano (Aswini *et al.*, 2023).

El análisis de la aptitud combinatoria es esencial en los programas de mejoramiento, para seleccionar líneas superiores que puedan ser usadas en la producción de híbridos con características ventajosas (Khan *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2020). El método línea × probador propuesto por Kempthorne (1957) permite evaluar la habilidad combinatoria general de líneas y probadores y la habilidad combinatoria específica de una línea con un probador en particular. Este método se ha utilizado extensivamente para determinar la acción génica del rendimiento y provitamina A (Tabu *et al.*, 2023), resistencia a pudrición de mazorca por *Fusarium verticillioides* (Tembo *et al.*, 2022) y la marchitez tardía en maíz (Kamara *et al.*, 2021), entre otros.

Para atender el problema de las enfermedades asociadas a *Fusarium* spp., en el Campo Experimental Pabellón del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se está trabajando en un programa de mejoramiento genético de maíz seleccionando líneas por menor incidencia de pudrición del tallo y mazorca causada por *Fusarium* spp. para desarrollar híbridos resistentes al patógeno e incrementar el rendimiento de grano y forraje en las regiones norte centro y centro occidente de México. Actualmente, se tienen varias líneas de diferente tipo de germoplasma que no presentan la enfermedad, pero se

desconoce su capacidad de combinación, lo cual limita su uso en un programa de hibridación.

Los objetivos del presente estudio fueron determinar la aptitud combinatoria de líneas, probadores y sus cruza e identificar las mejores para rendimiento de grano y menor incidencia de pudrición de tallo y de mazorca causada por *Fusarium* spp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en el Campo Experimental Pabellón, localizado entre las coordenadas 22° 10' N y 102° 20' O, y altitud de 1907 msnm. El suelo fue de textura franco-arenosa con pH de 7.9, materia orgánica de 1.4 %, conductividad eléctrica de 1.45 dS m⁻¹ y N-inorgánico de 24 ppm. El suelo se caracterizó por tener alta presión natural de *Fusarium* spp., con incidencia de pudrición de tallo en maíz hasta del 100 % en experimentos de campo (Briones *et al.* (2021).

Material genético

El material genético utilizado consistió en ocho líneas con nivel de endogamia S₃ a S₆ derivadas de las poblaciones PTFN, PTFP y PTFC, y tres probadores de crusa simple generadas con tres líneas hermanas provenientes de la población PTFX. Todas las poblaciones son de origen subtropical desarrolladas en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Campo Experimental Pabellón del INIFAP. Las líneas fueron: 1) PTFN-8-1-1-1-b, 2) PTFN-19-1-5-1, 3) PTFP-9-1-2, 4) PTFP-18-1-1-b, 5) PTFP-34-2-1-b, 6) PTFC-5-1-2-2, 7) PTFC-22-1-1-2, y 8) PTFC-29-1-1-2, y los probadores: 1) PTFX-9-1-6 × PTFX-3-1-3, 2) PTFX-9-1-6 × PTFX-8-3-2 y 3) PTFX-3-1-3 × PTFX-8-3-2. Las ocho líneas y las líneas que forman los probadores fueron seleccionadas por alta producción de grano y baja incidencia de pudrición del tallo y mazorca causada por *Fusarium* spp. En 2022, cada línea se cruzó manualmente con los tres probadores para producir un total de 24 cruza.

Diseño y unidad experimental

Las 24 cruza de prueba más un testigo comercial (Salamandra, Asgrow) se evaluaron en el ciclo agrícola de primavera verano de 2023 en el Campo Experimental Pabellón del INIFAP. El diseño experimental fue bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de dos surcos de 5.0 m de largo y 0.76 m de separación entre surcos. Las plantas se sembraron cada 0.16 m, que equivale a una densidad de población de 82,236 plantas ha⁻¹.

Manejo agronómico

La evaluación se realizó con riego presurizado en dos fechas de siembra: 23 de mayo y 30 de junio de 2023, para ampliar el espacio de exploración de expresión de las enfermedades.

El tratamiento de fertilización fue de 300N-100P-00K, más 20 kg de micro-elementos. En la siembra se aplicaron 100 kg de nitrógeno, todo el fósforo y los micro-elementos y el resto del nitrógeno se aplicó semanalmente a partir de los 30 días después de la siembra mediante fertirrigación. Se realizó control preventivo de malezas y plagas de acuerdo con el paquete tecnológico recomendado por el Campo Experimental Pabellón, de tal manera que el cultivo se desarrolló sin afectaciones.

Variables respuesta

Se midió el rendimiento de grano (REND) en $t\ ha^{-1}$ ajustado al 14% de humedad, incidencia de pudrición de mazorca (PMZ) medida como el número de mazorcas con pudriciones respecto del total de mazorcas por unidad experimental, e incidencia de pudrición de tallo (PT), el cual se midió entre las etapas R4 y R5, antes que iniciara el secamiento natural de la planta por madurez, y se determinó como el número de plantas con secamiento prematuro, respecto del total de plantas por unidad experimental. El secado prematuro se ha encontrado asociado con *Fusarium* spp. en pruebas realizadas en el lote de evaluación (Briones *et al.*, 2021).

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza combinado por fechas de siembra en las tres variables estudiadas mediante el procedimiento PROC GLM del programa SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2013). Las fechas de siembra y repeticiones se consideraron como efectos aleatorios, mientras que las cruza y la interacción fechas de siembra $\times$ cruza como efectos fijos. Se hizo un análisis de varianza adicional donde se excluyó al testigo; en este análisis, las cruza de prueba se dividieron en sus componentes líneas, probadores, líneas $\times$ probador y sus interacciones con fechas de siembra (Kempthorne, 1957). La comparación de medias se realizó mediante el estadístico DMS ($P \leq 0.05$). Los efectos de ACG y ACE, errores estándar y su significancia estadística se estimaron aplicando el procedimiento descrito por Mohammed (2009). También se realizaron correlaciones simples entre REND-FS1 y REND-FS2, PT-FS1 y PT-FS2, REND y PT, y REND y PMZ.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza para cruza

El análisis de varianza detectó diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para las fuentes de variación fecha de siembra (FS) y cruza en las tres variables estudiadas, mientras que para la interacción FS $\times$ cruza, sólo el REND resultó significativo ($P \leq 0.01$) (Cuadro 1). Las diferencias entre fechas de siembra era un resultado esperado, ya que con las fechas se pretendía ampliar el rango exploratorio para determinar su efecto en la incidencia de las enfermedades, lo cual al parecer se logró.

La interacción FS $\times$ cruza para REND sugiere que los híbridos respondieron de manera diferente a través de fechas de siembra; a diferencia de lo observado en PMZ y PT, en los cuales la respuesta de los híbridos fue similar. Los resultados encontrados concuerdan en parte con los obtenidos para rendimiento de grano por Kamara *et al.* (2020) y difieren para pudrición de mazorca con los de Tembo *et al.* (2022), quienes sí encontraron interacción significativa genotipos $\times$ localidades. Este resultado tiene sentido, dado que en el presente trabajo las fechas de siembra se establecieron en el mismo lote con condiciones similares del patógeno; mientras que en el trabajo comparativo puede haber mayor variación en la cantidad de inóculo, tipo de suelo y virulencia del patógeno.

Efecto de fechas de siembra

La FS1, tuvo mayor REND y menor PMZ y PT que la FS2; con diferencias entre fechas de $1.57\ t\ ha^{-1}$, $-9.5\ \%$ y $-4.0\ \%$, respectivamente, atribuibles principalmente a la influencia de la temperatura. La FS1, tuvo alrededor de $30\ ^\circ C$ durante gran parte del ciclo del cultivo, a diferencia de la FS2, que tuvo en promedio $27\ ^\circ C$ y una disminución de la temperatura entre 10 y $22\ ^\circ C$ a partir de la etapa de desarrollo R3, que pudo afectar el llenado del grano y favorecer un incremento de la pudrición del tallo y de mazorca, como se ha encontrado para REND por Zhou *et al.* (2016) y para incidencia de diferentes especies de *Fusarium* spp. por Pfordt *et al.* (2020) y Czembor *et al.* (2024).

Respuesta de cruza

El REND de las cruza, en promedio de fechas de siembra, fue alto y fluctuó entre 11.14 y $16.94\ t\ ha^{-1}$ (Cuadro 2). Ninguna cruza superó al testigo que produjo $17.18\ t\ ha^{-1}$, pero las cruza 1×3 , 2×3 , 3×1 , 3×2 , 3×3 , 3×4 y 3×5 fueron estadísticamente iguales a éste ($P \leq 0.05$), con rendimientos que fluctuaron entre 16.01 y $16.94\ t\ ha^{-1}$; por ello, se consideran competitivas. La superioridad de estas

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para cruzas en las tres variables estudiadas.

Fentes de variación	GL	REND	PMZ	PT
Fechas de siembra (FS)	1	83.90 **	3083.66 **	667.97 **
Rep/FS	4	1.50	144.10	25.80
Cruzas	24	23.22 **	124.50 **	174.90 **
FS × Cruzas	24	3.35 **	40.80 ns	40.60 ns
Error	96	1.59	44.60	45.90
CV (%)		9.1	63.8	84.6

ns, *, **: no significativo y significativo con $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$ de probabilidad, respectivamente, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, REND: rendimiento de grano, PMZ: incidencia de mazorcas podridas y PT: incidencia de pudrición de tallo.

cruzas fue consistente en ambas fechas de siembra (Figura 1), y se soporta, en parte, por la alta correlación del REND entre FS1:FS2 ($r = 0.89$; $P \leq 0.01$). La línea 3 participó en tres de las cruzas sobresalientes (1×3 , 2×3 y 3×3) y en cinco el probador 3 (3×1 , 3×2 , 3×3 , 3×4 y 3×5), indicando que poseen alta ACG para REND. Estos resultados son coincidentes con los de Kamara *et al.* (2020), quienes identificaron cruzas sobresalientes en REND, con una línea en común de alta ACG en tres densidades de población. Otras cruzas disminuyeron significativamente su REND en la FS2 respecto a la FS1.

La incidencia de PMZ y PT fue baja, con valores promedio de 10.5 y 8.0 %, respectivamente (Cuadro 2). Esto puede deberse en parte a que en el lote de evaluación están presentes las mismas variantes de *Fusarium*, donde fueron seleccionadas las líneas, pero también a la efectividad de la selección realizada. La respuesta de las cruzas contrasta con el de evaluaciones realizadas de híbridos comerciales en el mismo lote y año, los cuales tuvieron incidencias de PT que oscilaron de 2 a 96 % (datos no publicados), lo que muestra la virulencia del patógeno presente en el suelo, y la susceptibilidad de algunos híbridos, tal como ha sido descrito por Briones *et al.* (2021).

Catorce cruzas sobresalieron con baja incidencia de pudrición de mazorca (entre 3.4 y 10.6 %) y de tallo (entre 1.1 y 8.7 %) con valores iguales o inferiores ($P \leq 0.05$) al testigo que tuvo 15.4 y 9.4 %, respectivamente. Las cruzas 1×3 , 2×3 , 3×2 , 3×3 , 3×4 y 3×5 coincidieron también con rendimientos superiores (Cuadro 2), por lo que se consideran competitivas para uso comercial y para enriquecer el germoplasma de mejoramiento. Estos resultados son consistentes con lo encontrado para pudrición de mazorca por Tembo *et al.* (2022), y para pudrición de tallo por Mir *et al.* (2018). Por otra parte, Briones-Reyes *et al.* (2015) determinaron bajo condiciones naturales incidencias de pudrición de mazorca entre

22 y 28 % en poblaciones resistentes y entre 30 y 60 % en poblaciones susceptibles, utilizando una escala de severidad de daño.

En general, se espera que la afectación por *Fusarium* de tallo o mazorca se asocie con reducciones en rendimiento (Briones-Reyes *et al.*, 2015, Da Costa *et al.*, 2019). En el presente estudio, se obtuvo una correlación negativa $r = -0.41$, $P \leq 0.05$ entre REND y PT, y $r = -0.54$, $P \leq 0.01$ entre REND y PMZ, confirmando dicha asociación. También hubo correlación positiva ($r = 0.75$, $P \leq 0.01$) entre PT-FS1 y PT-FS2, lo que indica que las cruzas con menor incidencia de PT fueron las mismas en ambas fechas de siembra.

Análisis genético de líneas y probadores

Los cuadrados medios de líneas y probadores fueron significativos ($P \leq 0.01$) para las tres variables de estudio (Cuadro3); este resultado sugiere la existencia de variación genética importante entre probadores y líneas, y presupone la presencia de efectos aditivos en las tres características evaluadas. Resultados similares han sido reportados en diversas fuentes de germoplasma de maíz para estas y otras variables en diferentes condiciones agroecológicas (Archana *et al.*, 2019; Kamara *et al.*, 2021; Mir *et al.*, 2018) La interacción probador × línea, resultó significativa para REND ($P \leq 0.01$) y PMZ ($P \leq 0.05$), indicando que la respuesta de las líneas en cruza varió entre probadores, de donde pueden seleccionarse cruzas con alto REND y baja incidencia de PMZ. Debido a que la interacción línea × probador es una estimación de los efectos de ACE, su significancia también indica que la varianza no aditiva es importante en la expresión de estas variables y que el desarrollo de híbridos puede ser exitoso (Ismail *et al.*, 2023; Tabu *et al.*, 2023). La varianza de probadores y líneas para las tres variables fue superior que la de su interacción, por lo que se deduce que la varianza aditiva fue preponderante y que la selección para

Cuadro 2. Rendimiento de grano y porcentaje de mazorcasy tallos con pudrición de cruzas en promedio de fechas de siembra.

Cruza	REND (t ha ⁻¹)	PMZ (%)	PT (%)	Cruza	REND (t ha ⁻¹)	PMZ (%)	PT (%)
1×1	13.10	10.9 a	1.1 a	2×7	11.88	10.6a	7.7a
1×2	13.24	8.7 a	4.5 a	2×8	11.14	18.3	14.0
1×3	16.28a	4.9 a	2.4 a	3×1	16.94 a	11.3	7.6 a
1×4	11.45	11.7	3.6 a	3×2	16.21 a	4.9 a	4.7 a
1×5	13.71	8.6 a	5.5 a	3×3	16.21 a	3.4 a	3.5 a
1×6	13.80	9.7 a	7.2 a	3×4	16.01 a	6.9 a	7.9 a
1×7	12.66	10.6 a	4.6 a	3×5	16.40 a	8.4 a	7.5 a
1×8	11.39	15.7	15.7	3×6	11.95	17.1	14.1
2×1	13.99	9.7 a	6.8 a	3×7	12.64	7.5 a	9.3
2×2	12.66	22.8	8.5 a	3×8	12.05	11.6	26.3
2×3	16.22 a	4.1a	4.2 a	(T)	17.18 a	15.4	9.4
2×4	13.63	13.9	2.7 a	Media	14.60	10.5	8.0
2×5	14.22	12.8	8.7a	D M S 0 . 0 5 0.05	1.45	7.7	7.8
2×6	12.08	12.6	12.9				

Medias con la literal "a" en cada variable corresponden al grupo estadísticamente superior ($P \leq 0.05$). REND: rendimiento de grano, PMZ: incidencia de mazorcas podridas, PT: incidencia de pudrición de tallo, y T: testigo.

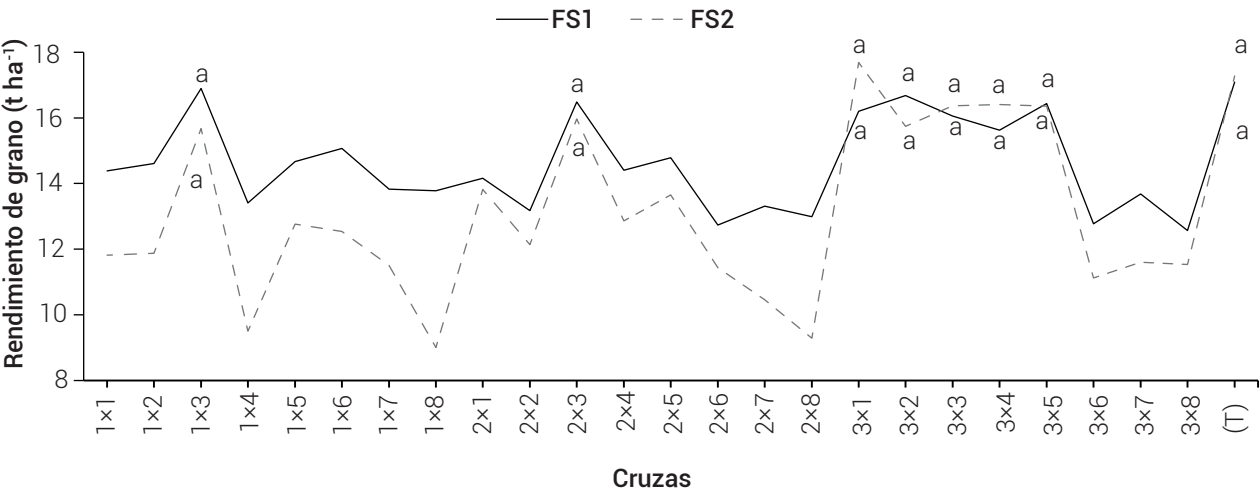


Figura 1. Rendimiento de grano de las cruzas en dos fechas de siembra. Puntos con la literal "a" minúscula corresponden a las medias superiores DMS ($P \leq 0.05$) en cada fecha de siembra. FS1: fecha de siembra uno y FS2: fecha de siembra dos.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para líneas y probadores en las tres variables estudiadas.

Fuente de variación	GL	REND	PMZ	PT
FS	1	88.31 **	3205.4 **	596.3 **
REP/FS	4	1.35	140.5	25.7
Prob	2	40.11 **	246.0 **	250.1 **
Lin	7	41.79 **	164.5 **	439.3 **
Prob × Lin	14	8.32 **	85.2 *	43.5 ns
FS × Prob	2	16.51 **	14.1 ns	14.8 ns
FS × Lin	7	3.87 *	61.2 ns	101.7 ns
FS × Prob × Lin	14	1.14 ns	28.6 ns	15.2 ns
Error	92	1.59	43.8	47.3
CV (%)		9.2	64.5	86.5

ns, *, **: no significativo y significativo con $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, REND: rendimiento de grano, PMZ: incidencia de mazorcas podridas y PT: incidencia de pudrición de tallo.

estos caracteres es recomendable (Kumar *et al.*, 2019, Zebire *et al.* 2020).

Las interacciones FS × probador y FS × línea, resultaron significativas al $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.05$, respectivamente, solamente para REND, indicando que probadores y líneas difirieron en su rendimiento a través de fechas de siembra. Por otra parte, la ausencia de interacción para PMZ y PT significa que las líneas y los probadores presentaron un comportamiento similar a través de fechas de siembra, lo cual sugiere que la resistencia o susceptibilidad es ambientalmente estable. En congruencia con estos resultados, Xu *et al.* (2023) determinaron que líneas de maíz altamente resistentes a pudrición de tallo mantuvieron su resistencia en múltiples localidades y años de evaluación, mientras que Mir *et al.* (2018) obtuvieron valores altos y negativos de ACG en líneas conocidas por su resistencia a PT a través de ambientes.

Efectos genéticos de aptitud combinatoria general (ACG)

Los efectos de ACG miden la capacidad de una línea de transmitir características deseables a su descendencia cuando se cruza con otras líneas (Yadav *et al.*, 2020). Ningún probador presentó significancia estadística favorable de ACG para alguna variable, excepto el probador 2, que presentó ACG positiva y significativa para PMZ ($P \leq 0.05$), indicando que es una línea que genera híbridos con alta incidencia de mazorcas podridas (Cuadro 4).

El probador 3 generó en cruza el mayor REND promedio y menor incidencia de PMZ ($P \leq 0.05$), además de valores de ACG altos, pero no significativos para REND (1.06) y bajo y negativo para PMZ (-2.07) (Cuadro 4), indicando que posee efectos aditivos importantes que pueden aprovecharse en la generación de híbridos de alto rendimiento y de mazorcas sanas, como ha sido sugerido por Zebire *et al.* (2020) en trabajos de resistencia a *Striga hermonthica* en maíz. Contrario a lo encontrado para PMZ, este probador presentó la mayor incidencia de PT con 10.1 % en promedio de cruzas. Como probador esto podría ser favorable para identificar líneas que por su capacidad genética se manifiesten en cruza con baja incidencia de plantas con síntomas de PT, como fue el caso de la línea 3, en cruza con este probador (Cuadro 2).

En el grupo de líneas, la línea 3 destacó por tener una ACG positiva y altamente significativa para REND (2.49) negativa y significativa para PMZ (-6.19) y solo alta y negativa para PT (-4.59) (Cuadro 5), lo que indica que posee efectos aditivos importantes que favorecen el incremento del REND y reducen la PMZ y PT en las cruzas donde participa (Cuadro 4). Comparativamente, Mir *et al.* (2018) determinaron en líneas resistentes a PT valores máximos de ACG de -1.25 y -1.23, mientras que Tembo *et al.* (2022), en dos líneas resistentes a PMZ, obtuvieron valores de ACG de -0.47 y -0.33, los cuales fueron menores que los encontrados en este estudio. Ninguna otra línea presentó efectos de ACG favorables para otra variable.

Cuadro 4. Medias y efectos de aptitud combinatoria general de líneas y probadores para las características evaluadas en promedio de fechas de siembra.

	Medias				ACG		
	REND (t ha ⁻¹)	PMZ (%)	PT (%)		REND (t ha ⁻¹)	PMZ (%)	PT (%)
Probador							
1	13.20 b	9.9 ab	5.6 a		-0.54	-0.36	-2.39
2	13.23 b	12.7 b	8.2 b		-0.52	2.43 *	0.22
3	14.80 a	8.2 a	10.1 c		1.06	-2.07	2.16
DMS 0.05	0.51	2.8	1.8	EE	0.59	0.54	0.55
Línea							
1	14.68 b	10.2 bc	5.2 a		0.93	-0.09	-2.79
2	14.04 bc	12.0 bdc	5.9 a		0.29	1.73	-2.05
3	16.24 a	4.1 a	3.4 a		2.49 **	-6.19 *	-4.59
4	13.70 c	10.7 bc	4.7 a		-0.05	0.45	-3.23
5	14.78 b	9.1 b	7.2 a		1.03	-1.15	-0.72
6	12.61 d	12.6 cd	11.4		-1.13 *	2.30	3.47
7	12.39 d	9.3 b	7.2 a		-1.35 *	-0.93	-0.77
8	11.53 e	14.1 d	18.6 b		-2.22 **	3.88	10.69 **
DMS 0.05	0.84	2.9	3.8	EE	0.46	1.84	2.38

EE: Error estándar, REND: rendimiento de grano, PMZ: incidencia de mazorcas podridas y PT: incidencia de pudrición de tallo. *,** Significativo a $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente. Medias con igual literal en las columnas no son estadísticamente diferentes (DMS, 0.05).

Efectos genéticos de aptitud combinatoria específica (ACE)

Las cruzas 1×6 , 3×1 , 3×2 y 3×4 tuvieron valores de ACE positivos y significativos para REND ($P \leq 0.05$), con valores entre 1.74, 1.12 y 1.26, respectivamente; de éstas, sólo la craza 3×2 se asoció con efectos negativos y significativos para PMZ y solo alta y negativa para PT (Cuadro 5). Cruzas como la 3×2 son deseables en programas de mejoramiento, ya que por su constitución genética contribuyen significativamente a una mayor expresión del REND y a una disminución de PMZ y PT en su conjunto. Los presentes resultados concuerdan con altos valores de ACE obtenidos por Takhur *et al.* (2023) para REND y provitamina A y con los de Kamara *et al.* (2021) para REND y resistencia a marchitez tardía.

Solo tres de las cuatro cruzas con alta ACE, 3×1 , 3×2 y 3×4 exhibieron REND superiores estadísticamente (Cuadro 3). Estas cruzas tienen en común al probador 3, que tuvo

alta ACG para REND (Cuadro 4), indicando la presencia de efectos aditivos $\times$ no aditivos en la expresión del REND, como encontraron en varias cruzas sobresalientes Takhur *et al.* (2023). Debido a la alta y positiva ACE de estas cruzas, podrían seleccionarse para continuar su evaluación para uso comercial y enriquecimiento de programas de mejoramiento.

No obstante que la craza 3×3 exhibió una alta y negativa ACE para REND (-1.09), esta fue de las más productivas, con baja incidencia de PT y PMZ (Cuadro 2). El alto desempeño de la craza proviene de los efectos aditivos de los padres, ya que ambos progenitores tuvieron ACG alta y positiva para REND y alta y negativa para PMZ (Cuadro 4). Al respecto, Kumar *et al.* (2019) señalaron que cruzas con alta $\times$ alta ACG pueden generar heterosis óptima en la expresión de caracteres. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Kamara *et al.* (2021) en cruzas de maíz evaluadas para REND y resistencia a marchitez tardía. Caso contrario ocurrió con la craza 2×8 , la cual presentó

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria específica para rendimiento de grano, pudriciones de tallo y mazorca de 24 cruza. Promedio de fechas de siembra.

Cruza	REND	PMZ	PT	Cruza	REND	PMZ	PT
1 × 1	-1.04 *	1.53	-1.72	2 × 5	-0.04	0.15	1.21
1 × 2	-0.26	-2.79	0.93	2 × 6	-0.01	-3.19	1.25
1 × 3	0.58	1.29	1.43	2 × 7	0.01	-1.31	0.25
1 × 4	-1.71 **	1.56	1.24	2 × 8	0.13	1.59	-4.89 **
1 × 5	-0.52	-0.49	0.68	3 × 1	1.21 *	2.02	0.32
1 × 6	1.74 **	-2.61	-1.82	3 × 2	1.12 *	-5.30 *	-3.32
1 × 7	0.81	1.30	-0.17	3 × 3	-1.09 *	1.26	-2.06
1 × 8	0.40	0.21	-0.57	3 × 4	1.26 *	-2.33	1.00
2 × 1	-0.17	-3.55	1.40	3 × 5	0.57	0.34	-1.89
2 × 2	-0.86	8.09 **	2.39	3 × 6	-1.72 **	5.80 *	0.57
2 × 3	0.50	-2.56	0.62	3 × 7	-0.81	0.01	-0.08
2 × 4	0.45	0.77	-2.24	3 × 8	-0.53	-1.80	5.46 **
EE	0.44	2.18	1.59	EE	0.44	2.18	1.59

*, ** Significativo al $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente. EE: error estándar, REND: rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$), PMZ: incidencia de mazorcas podridas, PT: incidencia de pudrición de tallo.

efectos negativos significativos ($P \leq 0.01$) de ACE para pudrición de tallo; sin embargo, este valor se manifestó con un valor alto de PT (14.0 %), influenciado quizás por la mayor incidencia de PT de la línea 8 en sus cruza (Cuadro 2). Otras cruza como 1 × 1, 1 × 4 y 3 × 6 se caracterizaron por una alta y negativa ACE para REND y alta y positiva para PMZ y PT, lo cual sugiere que poseen reducido valor genético.

CONCLUSIONES

La variación genética en rendimiento de grano e incidencia de pudrición de tallo y mazorca entre líneas y probadores hizo posible la selección de híbridos más sanos y productivos. Las cruza 1 × 3, 2 × 3 3 × 2, 3 × 3, 3 × 4 y 3 × 5 destacaron con rendimientos superiores e incidencias bajas de pudrición de tallo y de mazorca, pero solo las cruza 3 × 1, 3 × 2 y 3 × 4 presentaron las mejores combinaciones genéticas para rendimiento, pues tuvieron la ACE más alta. El probador 3 y la línea 3 fueron las mejores fuentes de alelos para las características estudiadas; especialmente la línea 3, pues tuvo la ACG más alta

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por el apoyo financiero recibido al proyecto de investigación SIGI: 1565935830. También a los trabajadores de campo Sr. Rogelio Molina López y Eduardo Puentes Robles por su apoyo en la conducción de los experimentos.

BIBLIOGRAFÍA

Archana R., H. C. Lohithaswa, M. S. Uma, K. V. Shivakumar, V. B. Sanathkumar and R. Pavan (2019) Genetic analysis of *Fusarium* stalk rot resistance in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* SP1:58-61.

Aswini M. S., Kiran, B. Lenka, Y. A. Shaniware, P. Pandey, A. P. Dash and S. W. Haokip (2023) The role of genetics and plant breeding for crop improvement: current progress and future prospects. *International Journal of Plant & Soil Science* 35:190-202, <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/V35I203798>

Briones R. D., A. Peña R. y L. A. Díaz G. (2021) Virulencia de aislamientos de *Fusarium* spp., asociados a la pudrición de tallo de maíz (*Zea mays* L.), en Aguascalientes, Méx. In: XI Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria. J. Uresti G. y L. Reyes M. (comps). Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México, México. pp:476-479. http://reunionescientificas2021.inifap.gob.mx/_media/CONVOCATORIAS/MEMORIA_AGR%C3%8DCOLA.pdf

- Briones-Reyes D., F. Castillo-González, J. L. Chávez-Servia, V. H. Aguilar-Rincón, C. de León García-de Alba y A. Ramírez H. (2015) Respuesta del maíz nativo del altiplano mexicano a pudrición de mazorca, bajo infección natural. *Agronomía Mesoamericana* 26:73-85, <https://doi.org/10.15517/am.v26i1.16922>
- Czembor E., S. Frasiński, M. Urbaniak, A. Waskiewicz, J. H. Czembor and L. Stepień (2024) *Fusarium* species shifts in maize grain as a response to climatic changes in Poland. *Agriculture* 14:1793, <https://doi.org/10.3390/agriculture14101793>
- Da Costa R. V., J. Simon, L. V. Cota, D. D. da Silva, R. E. M. de Almeida, F. E. Lanza, ... and J. E. F. Figueiredo (2019) Yield losses in off-season corn crop due to stalk rot disease. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 54:e00283, <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00283>
- DGSIAP, Dirección General de Información Agroalimentaria y Pesquera (2025) Panorama Agroalimentario 2025. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. 107 p.
- Ismail M. R., A. K. Mostafa, M. A. A. Abd-Elaziz, M. S. Rizk and T. T. El-Mouslhy (2023) Heterotic grouping of maize lines using line $\times$ tester analysis. *Electronic Journal of Plant Breeding* 14:1293-1301, <https://doi.org/10.37992/2023.1404.161>
- Kamara M. M., M. Rehan, K. M. Ibrahim, A. S. Alsohim, M. M. Elsharkawy, A. M. S. Kheir, ... and M. A. El-Esawi (2020) Genetic diversity and combining ability of white maize inbred lines under different plant densities. *Plants* 9:1140, <https://doi.org/10.3390/plants9091140>
- Kamara M. M., N. A. Ghazy, E. Mansour, M. M. Elsharkawy, A. M. S. Kheir and K. M. Ibrahim (2021) Molecular genetic diversity and line $\times$ tester analysis for resistance to late wilt disease and grain yield in maize. *Agronomy* 11:898, <https://doi.org/10.3390/agronomy11050898>
- Khan A., H. Ur-Rahman, A. Ahmad, M. Iqbal, S. Kamal, S. Khan and J. Bu (2020) Combining ability analysis in sweet corn (*Zea mays saccharata* L.) using line by tester design. *Advances in Food Technology and Nutritional Science Open Journal* 6:47-52, <https://doi.org/10.17140/AFTNSOJ-6-168>
- Kempthorne O. (1957) An Introduction to Genetic Statistics. John Wiley and Sons. New York, USA. 545 p.
- Kumar N. K. L., D. Rajasekhar, V. Bharali, H. Vardhan, R. Jamedar and S. Sugumar (2019) Decoding the phenomenon of combining ability for yield and related traits with reference to maize. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 8:2428-2431.
- Mir Z. R., P. K. Singh, P. H. Zaidi, M. T. Vinayan, S. S. Sharma, M. K. Krishna, ... and S. K. Nair (2018) Genetic analysis of resistance to post flowering stalk rot in tropical germplasm of maize (*Zea mays* L.). *Crop Protection* 106:42-49, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.12.004>
- Mohammed M. I. (2009) Line $\times$ tester analysis across locations and year in Sudanese $\times$ exotic lines of forage sorghum. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 1:311-319.
- Pfordt A., L. R. Romero, S. Schiwek, P. Karlovsky and A. von Tiedemann (2020) Impact of environmental conditions and agronomic practices on the prevalence of *Fusarium* species associated with ear- and stalk rot in maize. *Pathogens* 9:236, <https://doi.org/10.3390/pathogens9030236>
- Santiago R., A. Cao, R. A. Malvar and A. Butrón (2020) Genomics of maize resistance to *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination. *Toxins* 12:431, <https://doi.org/10.3390/toxins12070431>
- SAS Institute (2013) SAS/STAT® 9.4 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ (Septiembre 2025).
- Tabu I., K. Lubobo, K. Mbuya and N. Kimuni (2023) Heterosis and line-by-tester combining ability analysis for grain yield and provitamin A in maize. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 55:697-707, <http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.3.8>
- Tembo E., A. Minnaar-Ontong, A. Menkir, G. Marais, C. Magorokosho and M. T. Labuschagne (2022) Inheritance of resistance to *Fusarium verticillioides* ear rot in maize inbred lines of Southern, West and Central Africa origin. *Crop Science* 62:1818-1833, <https://doi.org/10.1002/csc2.20776>
- Thakur D. K., S. K. Sinha, V. K. Sandilya, S. P. Patil and D. Nirala (2023) Studies of combining ability in maize (*Zea mays* L.) hybrids using line $\times$ tester analysis. *The Pharma Innovation-Journal* 12:1774-1778.
- Xu Y., Z. Zhang, P. Lu, R. Li, P. Ma, J. Wu, ... and H. Zhang (2023) Increasing *Fusarium verticillioides* resistance in maize by genomics-assisted breeding: methods, progress, and prospects. *The Crop Journal* 11:1626-1641, <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.07.004>
- Yadav N. K., S. K. Sinha, J. K. Tiwari and D. K. Thakur (2020) Line $\times$ tester model for evaluating the combining ability of some new white maize inbred lines. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* Special Issue 10:483-499.
- Zebire D., A. Menkir, V. Adetimirin, W. Mengesha, S. Meseke and M. Gedil (2020) Effectiveness of yellow maize testers with varying resistance reactions to *Striga hermonthica* for evaluating the combining ability of maize inbred lines. *Agronomy* 10:1276, <https://doi.org/10.3390/agronomy10091276>
- Zhou B., Y. Yue, X. Sun, X. Wang, Z. Wang, W. Ma and M. Zhao (2016). Maize grain yield and dry matter production responses to variations in weather conditions. *Agronomy Journal* 108:196-204, <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0196>

