



## ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SEMILLA DE PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE MAÍZ DE VALLES ALTOS

### SEED YIELD STABILITY OF PARENTS OF HIGH-VALLEY MAIZE HYBRIDS

Rocío E. Hernández-Caldera<sup>1</sup>, Gabino García-De los Santos<sup>2</sup>, Rosalba Zepeda-Bautista<sup>3</sup>, José Luis Arellano-Vázquez<sup>4</sup>, Alfredo J. Gámez-Vázquez<sup>1</sup> y Miguel A. Avila-Perches<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. <sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. <sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Ciudad de México, México. <sup>4</sup>INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (perches.miguel@inifap.gob.mx)

<sup>†</sup>In memoriam del MC Juan Virgen Vargas, destacado investigador del INIFAP en tecnología de semillas

#### RESUMEN

En los programas de mejoramiento genético y multiplicación de semilla es importante identificar ambientes adecuados de producción, así como el rendimiento, estabilidad, adaptabilidad e interacción genotipo-ambiente adecuadas en los progenitores de híbridos comerciales; sin embargo, en valles altos de la Mesa Central de México existe poca información de los progenitores de híbridos de maíz. El objetivo de esta investigación fue conocer la estabilidad del rendimiento de semilla de nueve líneas endogámicas y tres cruza simples progenitoras de tres híbridos de maíz adaptados a valles altos de México. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones en cinco ambientes. Las variables evaluadas fueron rendimiento de semilla, días a floración masculina y altura de planta. El análisis estadístico incluyó análisis de varianza combinado, comparación múltiple de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) y para la interacción genotipo-ambiente se utilizó el modelo SREG. Los progenitores M-43×M-44, M-55, M-52, M-54 y el híbrido H-66 fueron los más estables en rendimiento. La línea M-48 mostró adaptación específica en el ambiente Celaya (CEL) y la cruza M-47×M-46 en San Luis de la Paz (SLP). Estos resultados indican que SLP y CEL pueden ser localidades alternativas a Coatlinchán, Estado de México, con características aptas para la producción de semilla de progenitores de híbridos de maíz de valles altos de México.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., ambientes, genotipos, IGA.

#### SUMMARY

In breeding and seed multiplication programs, it is important to identify suitable production environments, as well as adequate yield, stability, adaptability and genotype-environment interaction in commercial hybrid parents; nevertheless, in the high valleys of the Central Plateau of Mexico, there is little information on the parents of maize hybrids. The aim of this research was to know the seed yield stability of nine inbred lines and three single crosses progenitors of three maize hybrids adapted to the high valleys of Mexico. The experimental design was randomized complete blocks with three replications in five environments. The evaluated traits were seed yield, days to male flowering and plant height. Statistical analysis included combined analysis of variance, multiple comparison of means (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) and for the genotype-environment interaction the SREG model was used. Progenitors M-43×M-44, M-55, M-52, M-54 and hybrid H-66 were the most stable in yield. The M-48 line showed specific adaptation in the Celaya environment (CEL)

and the M-47×M-46 cross was specific to San Luis de la Paz (SLP). Results indicate that SLP and CEL can be alternative locations to Coatlinchán, State of Mexico with suitable characteristics for seed production of parents of maize hybrids from high valleys of Mexico.

**Index words:** *Zea mays* L., environments, genotypes, GEL.

#### INTRODUCCIÓN

La producción de maíz (*Zea mays* L.) es crucial en la alimentación (FAO, 2019) porque proporciona más del 70 % de la ingesta calórica para humanos y animales (Setimela *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2016). Para mejorar la producción de esta especie es importante el uso de semillas de genotipos mejorados. En la actualidad, la producción de semilla a nivel mundial es un factor importante para satisfacer la demanda anual de este grano, convirtiéndose en una de las actividades más rentables en el campo de la agricultura (Milošević *et al.*, 2010). El maíz es la especie más importante en la venta de semillas en el mundo, con volúmenes de 7.5 millones de toneladas (FAO, 2019).

En México, el maíz es la base de la alimentación de la población y se cultiva desde 0 hasta 2700 metros sobre el nivel del mar (msnm). Las zonas agroecológicas para su producción son los valles altos (2200-2700 msnm), zonas de transición (1800-2200 msnm), Bajío (1200-1800 msnm), trópico húmedo y cálido seco (0-1200 msnm) (Arellano *et al.*, 2010).

En México se tiene un déficit en la producción de maíz. En 2019 se importaron 16 millones de t, que representaron el 58 % de la producción (SIAP, 2020). Una alternativa para incrementar la producción de grano es el uso de semilla certificada, con características agronómicas y productividad sobresaliente en cada

región (Virgen-Vargas *et al.*, 2016a). Durante 2019, en México se produjeron 53,238 t de semilla, cantidad que se utilizó para sembrar 2, 661,917 ha, que equivale al 36 % de la superficie sembrada con maíz (SIAP, 2020).

El éxito productivo de un genotipo depende no sólo de su buen comportamiento en rendimiento y tolerancia a las principales plagas, sino también de la dirección y magnitud de la interacción genotipo-ambiente en los diferentes ambientes donde éste se prueba (Ambika *et al.*, 2014; García *et al.*, 2009). Al respecto, se han realizado investigaciones para evaluar el rendimiento de progenitores de híbridos, así como la calidad genética, física y fisiológica de semilla y se han identificado sitios de producción adecuados (Virgen-Vargas *et al.*, 2016a). La interacción genotipo-ambiente (IGA) es uno de los aspectos importantes para la generación de tecnología adecuada para la producción de semilla de maíz en nuevas áreas, que permitan el aumento en la rentabilidad del cultivo. La estabilidad se ha evaluado en híbridos (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015), variedades (Setimela *et al.*, 2007) y poblaciones de maíz (Martínez-Sánchez *et al.*, 2016), para la selección de genotipos con rendimiento uniforme; sin embargo, la información sobre rendimiento, adaptabilidad y estabilidad de híbridos de valles altos no se ha actualizado y es limitada (Espinosa y Carballo, 1988); por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue conocer la estabilidad del rendimiento

de semilla de líneas endogámicas y cruzas simples que intervienen en la formación de materiales comercializados en el Altiplano Central de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Germoplasma

Durante 2014 y 2015 se evaluaron nueve líneas y tres cruzas simples progenitoras de tres híbridos trilineales, que fueron usados como testigos (Cuadro 1).

Ambientes de evaluación

Los ensayos se realizaron en las localidades de Coatlinchán (COA), Estado de México, San Luis de la Paz (SLP) y Celaya (CEL), Guanajuato, México, aunque en Celaya la evaluación se realizó únicamente en 2014, por lo que se consideraron cinco ambientes en total (Cuadro 2).

Condiciones climáticas de los ambientes de prueba

Las principales diferencias entre los ambientes de evaluación fueron la altitud, con un intervalo de variación de 485 m entre valles altos y Bajío, tipo de suelo y precipitación, que varió de 461 a 834 mm (CNA, 2015). La precipitación en COA fue 70 % mayor que en SLP y CEL (Cuadro 3).

Cuadro 1. Genotipos de maíz evaluados en cinco ambientes en el Estado de México y Guanajuato, México.

Genotipos	Genealogía	Tipo
M-55 <sup>+</sup>	Tlax 151 SFC1-11-2-2-2	Línea ♀ ♀ H-70
M-54 <sup>+</sup>	Mich 21 Comp.I-7-2-14-1-3	Línea ♂ ♀ H-70
M-55xM-54 <sup>+</sup>	(Tlax 151 SFC1-11-2-2-2) (Mich 21 Comp I-7-2-14-1-3)	CS♀ H-70
CML-242 <sup>++</sup>	Bat 8785 MH 10-1-1-2TL-1-3TL-3-1TL-b	Línea ♂ H-70
H-70 <sup>+</sup>	(M-54xM-55) x CML-242 (Testigo)	Híbrido trilineal
M-43 <sup>+</sup>	Mich 21-181-14-1-16-5	Línea ♀ ♀ H-66
M-44 <sup>+</sup>	Mich21 Comp I-7-2-11-9	Línea ♂ ♀ H-66
M-43xM-44 <sup>+</sup>	(Mich 21-181-14-1-16-5) (Mich21 Comp I-7-2-11-9)	CS♀ H-66
M-52 <sup>++</sup>	CML 169 BPVC-159-B-1-1-1-2-BTL	Línea ♂ H-66
H-66 <sup>+</sup>	(M-43xM-44) x M-52 (Testigo)	Híbrido trilineal
M-47 <sup>+</sup>	Tlax 151 SFC1-77-2-1-2	Línea ♀ ♀ H-44
M-46 <sup>+</sup>	Mich 21-Comp I-7-2-14-5	Línea ♂ ♀ H-44
M-47xM-46 <sup>++</sup>	(Tlax 77-2-1-2) x (Mich 21-Comp I-7-2-14-5)	CS♀ H-44
M-48 <sup>+</sup>	Pob87xSIB/-1-4-3	Línea ♂ H-44
H-44 <sup>+</sup>	(M-46xM-47) x M-48 (Testigo)	Híbrido trilineal

<sup>+</sup>Líneas obtenidas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), <sup>++</sup>líneas obtenidas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

El intervalo de variación de la temperatura máxima, media y mínima entre ambientes varió entre 5, 8 y 3 °C, respectivamente (Cuadro 3). La temperatura máxima y mínima fueron similares entre todos los ambientes, excepto en CEL 2014, donde se registraron las mayores temperaturas y menor altitud.

### Manejo agronómico

La densidad de población fue de 65,000 plantas por ha y se fertilizó con la fórmula 150-70-00 (NPK), de acuerdo con las recomendaciones del INIFAP. El desarrollo del cultivo fue en condiciones de riego.

### Diseño y unidad experimental

En cada ambiente se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de cuatro surcos de 5 m de largo y 0.86 m de distancia entre surcos. La parcela útil se conformó de los dos surcos centrales.

### Variables evaluadas

Los caracteres evaluados fueron: 1) rendimiento de

semilla (RS) en t ha<sup>-1</sup> al 14 % de humedad, que se calculó con la fórmula:  $RS = [PC \times \% MS \times \% G \times FC] / 8600$ , donde PC: peso de campo de mazorca en t ha<sup>-1</sup>, % MS: porcentaje de materia seca (100 - % humedad de semilla), % G: porcentaje de semilla, como promedio de la relación entre el peso de semilla y el peso de mazorca sin brácteas, multiplicado por 100, FC: factor de corrección (10000 m<sup>2</sup>/ la superficie útil de la parcela), 8600: valor constante, 2) días a floración masculina (DFM), para lo cual se cuantificaron los días a partir de la fecha de siembra hasta que el 50 % de las plantas de la unidad experimental derramaron polen, 3) altura de planta (AP), que se midió en m desde la base del tallo hasta el inicio de la espiga.

### Análisis estadístico

Se aplicó análisis de varianza combinado de los cinco ambientes (A), donde éstos se consideraron como efectos aleatorios y los genotipos (G) como efectos fijos. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Para el análisis de la interacción genotipo-ambiente (IGA) se utilizó el modelo SREG, mediante el programa GEA-R (Pacheco *et al.*, 2015). En el modelo SREG, el efecto principal de G más la IGA se asumen como términos lineales-bilineales (Burgueño *et al.*, 2001; Crossa y Cornelius, 2002).

**Cuadro 2. Localidades de evaluación, localización geográfica y fechas de siembra de progenitores e híbridos trilineales de maíz en el Estado de México y Guanajuato, México.**

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha de siembra		Tipo de suelo
				2014	2015	
COA	19° 29' 05"	98° 53' 11"	2250	08 mayo	07 mayo	Franco arenoso
SLP	21° 13' 11"	100° 29' 41"	2004	21 mayo	22 junio	Franco arenoso
CEL	20° 34' 40"	100° 49' 37"	1765	15 mayo	---	Franco arcilloso

COA: Coatlinchán, CEL: Celaya, SLP: San Luis de la Paz, msnm: metros sobre el nivel del mar.

**Cuadro 3. Temperatura y precipitación pluvial registradas durante el ciclo del crecimiento del cultivo en el Estado de México y dos localidades de Guanajuato, México.**

Localidades	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)		
		Máxima	Mínima	Media
COA-14	834	24	10	17
SLP-14	476	24	10	17
CEL-14	461	29	13	21
COA-15	752	25	10	13
SLP-15	417	25	11	18

COA: Coatlinchán, Estado de México; CEL: Celaya, Guanajuato; SLP: San Luis de la Paz, Guanajuato.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza combinado y comparación de medias

El análisis de varianza combinado (Cuadro 4) para rendimiento de semilla (RS), días a floración masculina (DFM) y altura de planta (AP) mostró diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) entre ambientes (A), genotipos (G) (progenitores e híbridos) y en la interacción genotipo-ambiente (IGA). Con base en la magnitud de los cuadrados medios, la fuente de variación de mayor importancia fue A, seguida de G y de la IGA. De la varianza total para la expresión del RS, el factor A aportó el 59 %, seguido por el efecto del factor G con 39 % y la IGA de 2 %. En la expresión de los DFM, el factor A determinó el 78 % de la varianza total, seguido del factor G con 21 % y la IGA influyó en sólo el 1 % de la variación total. Para la expresión de la AP, el factor A influyó 80 %, el G 19 % y la IGA el 1 % de la variación total. Los ambientes fueron la principal causa de variación para las variables en el modelo fenotípico. Estos resultados coinciden con los reportados por Gauch y Zobel (1997), quienes mencionaron que el ambiente representa aproximadamente el 80 % del total de la variación en los ensayos multiambientes. La diferencia significativa en la IGA justifica el análisis de dicha interacción, así como el de estabilidad de los genotipos en la expresión del rendimiento.

Ambientes

Entre los ambientes, el mayor RS se obtuvo en COA 2014, que presentó las menores temperaturas y las mayores precipitaciones, en contraste con CEL y SLP. En general, los ambientes de valles altos presentaron mejores condiciones para la expresión del rendimiento de semilla, lo cual se explica porque los progenitores fueron seleccionados y

evaluados en esta mega región y están localmente mejor adaptados (Setimela *et al.*, 2007). No obstante que los experimentos se condujeron en condiciones de riego, se observó que a mayor precipitación se produjo mayor rendimiento y AP, lo que coincide con lo reportado por Zepeda-Bautista *et al.* (2021).

En la localidad de Coatlinchán se observó el mayor número de días a FM, seguido por San Luis de la Paz, mientras que en Celaya se registraron los menores valores (Cuadro 5), debido a los efectos de las temperaturas mínimas mensuales en valles altos (Coatlinchán) y zonas de transición (San Luis de la Paz), además de las temperaturas máximas mensuales en Celaya (Cuadro 3). Los días a floración son influenciados por el ambiente en función de la temperatura, pues en lugares cálidos se reducen los días a floración, lo que acelera las fases fenológicas del cultivo y reduce los rendimientos (Virgen-Vargas *et al.*, 2014). La variación del RS ( $3.9 \text{ t ha}^{-1}$ ), DFM (11.5 días) y AP (1.1 m), explicada por los ambientes, indica que los entornos ecológicos fueron diversos (Cuadro 5).

Genotipos

Entre las líneas endogámicas hembra (Cuadro 6), las de mayor RS fueron M-47 y M55, progenitores femeninos de las cruza simples (CS) de H-44 y H-70, respectivamente, en comparación con M-43, progenitor hembra de la CS del H-66. De las seis líneas macho de los híbridos, la de mayor RS fue M-48, progenitor de H-44, seguida de M-52 y M-46, mientras que las líneas M-54, CML-242 y M-44 fueron consistentes con el menor RS. La cruza simple hembra (M-46  $\times$  M-47) del H-44 superó en RS a sus similares del H-66 y H-70; esta misma cruza, al igual que su similar de H-70, fue más precoz que la cruza simple hembra del H-66. Entre híbridos, el H-70 rindió en promedio 1000 y 900  $\text{kg ha}^{-1}$  más que H66 y H-44, respectivamente (Cuadro 6), y

Cuadro 4. Cuadrados medios de variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en el Estado de México y Guanajuato, México.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Rendimiento de semilla ( $\text{t ha}^{-1}$ )		Floración masculina (días)		Altura de planta (m)	
Ambiente (A)	4	110.04	**	878.01	**	9.2	**
Genotipo (G)	14	72.63	**	237.94	**	2.2	**
G $\times$ A	56	4.13	**	3.78	**	0.07	**
Error	140	0.43		0.77		0.01	
R <sup>2</sup>		0.97		0.99		0.98	
CV (%)		16.14		1.12		5.12	

\*\* : Significativo con  $P \leq 0.01$ , C.V.: coeficiente de variación.

se ubicó en el segundo grupo estadístico por sus DFM. La línea M-43 y la cruza simple M-43×M-44 fueron las de mayor altura de planta. Los rendimientos del H-70 fueron similares a los reportados por Arellano *et al.* (2011). El mayor RS de los híbridos se asoció con la combinación de progenitores derivados de diferente origen geográfico. En este sentido, el H-70 y H44 tienen progenitores de tres orígenes, mientras que el H-66 solamente tiene progenitores de dos (Arellano *et al.*, 2010), por lo que probablemente la heterosis sea de máxima importancia en la expresión del rendimiento (Tollenaar *et al.*, 2004). En un trabajo afín, al evaluar líneas progenitoras de híbridos en tres ciclos agrícolas en dos densidades de población, se reportó rendimiento de 7.7 t ha<sup>-1</sup> en M-48 (Virgen-Vargas *et al.*, 2014), el cual está asociado con su origen, ya que se formó con germoplasma de clima templado, subtropical y de valles altos, así como con su nivel de endogamia ( $S_3$ ), lo que le permitió amortiguar los diferentes cambios de temperatura y humedad.

Las líneas M-54 y M-46 fueron las más tardías. Cabe destacar que ambas, junto con M-43, se derivaron de la fuente Mich-21. Las líneas M-47 y M-55 se ubicaron entre las precoces, coincidiendo con lo reportado por Zepeda-Bautista *et al.* (2021). Los resultados anteriores se asocian con la sensibilidad de los genotipos ocasionada por el fotoperiodo y temperaturas templadas de los ambientes de evaluación COA y SLP, que alargan las etapas de desarrollo y floración, a diferencia de la temperatura de 20 °C de su lugar de origen (Craufurd y Wheeler, 2009). Las cruza simples, M-47×M-46 y M-55×M-54 presentaron los mismos días a FM, mientras que M-43×M-44 fue ligeramente más tardía, resultados similares a los reportados por Virgen-Vargas *et al.* (2016b).

### Estabilidad e interacción genotipo-ambiente

En el Cuadro 7 se muestra la prueba de Gollob, donde el análisis SREG indicó que los cinco componentes fueron significativos ( $P \leq 0.01$ ). Los dos primeros explicaron el 94 % de la variación total, por la interacción presente en la variable rendimiento. Resultados similares fueron obtenidos por Kandus *et al.* (2010) al evaluar el rendimiento en líneas BLS (Sistema Letales Equilibrados) en cinco ambientes, y mediante el modelo SREG obtuvieron porcentajes de variación total de 93 %. Setimela *et al.* (2010) reportaron valores de 83 % de la variación total del rendimiento de híbridos y materiales élite evaluados en diferentes condiciones de fertilización, estrés por sequía y pH; por su parte, Ahmadi *et al.* (2012) reportaron valores de 57 % al evaluar líneas avanzadas y variedades de trigo en multiambientes.

En la Figura 1 se observa el comportamiento de A, G, IGA y la estabilidad, donde se destaca la ubicación de los cinco ambientes en dos sectores. La mejor expresión del rendimiento fue en COA por la longitud del vector, seguido de SLP, por lo que la localidad de CEL fue la de menor rendimiento por estar ubicada en un mega ambiente diferente en altitud, temperatura y precipitación.

En la misma figura se aprecian tres grandes grupos de clasificación de genotipos, las cruza simples progenitoras (M-47×M-46, M-43×M-44 y M-55×M-54), ubicadas en los cuadrantes I y IV, cuyo rendimiento fue superior al de las líneas endogámicas, ubicadas en los cuadrantes II y III, además de los híbridos trilineales testigos (H-70, H-44 y H-66). Esta respuesta se ha asociado con el fenómeno de heterosis, que se define como la superioridad en el rendimiento, crecimiento y vigor del híbrido sobre cualquiera de sus progenitores (Tollenaar *et al.*, 2004). La línea M-48 es la excepción, debido a su vigor, producto de derivar líneas de la cruza entre genotipos con diferente origen geográfico (valles altos × clima templado y subtropical). Los híbridos trilineales y cruza simples destacaron por sus mayores rendimientos en los ambientes COA y SLP, independientemente del año de evaluación, lo que se observa en el polígono, ya que se ubican en los vértices en los cuadrantes I y IV.

Con respecto a las líneas, en COA 2014 las líneas M-48 y M-55 presentaron el mayor rendimiento y M-54 el menor valor; en SLP el mayor rendimiento fue para M-47 y el menor para M-44. Cabe señalar que M-47 no presentó una producción destacada en COA, lo cual resalta la importancia del ambiente en la producción de semilla (Virgen-Vargas *et al.*, 2016b). La respuesta de las cruza simples (M-43×M-44, M-47×M-46 y M-55×M-54) progenitoras hembra coincide con el comportamiento de cada uno de sus híbridos trilineales testigos. Las líneas con comportamiento estable fueron M-55, M-52 y M-54, mientras que M-46, CML-242, M-43, M-44 y M-48 mostraron menor estabilidad, en tanto que M-47 se clasificó como inestable. Con estos resultados, es evidente que el modelo SREG permitió una diferenciación clara entre los genotipos con respecto a su rendimiento y estabilidad (Ahmadi *et al.*, 2012; Kandus *et al.*, 2010). De acuerdo con los resultados, la producción de semilla de las cruza simples y de los híbridos trilineales se puede realizar en las localidades de Coatlinchán y San Luis de la Paz. De ser necesario, la multiplicación de semilla del M-48 sería factible realizarla en Celaya.

**Cuadro 5. Prueba de medias de variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en el Estado de México y Guanajuato, México.**

Ambiente	Rendimiento de semilla (t ha <sup>-1</sup> )	Floración masculina (días)	Altura de planta (m)
COA 2014	5.7 a	79.0 b	2.5 a
COA 2015	4.9 b	80.9 a	1.9 c
SLP 2014	3.9 c	77.7 c	1.4 d
SLP 2015	2.8 d	77.3 c	1.4 d
CEL 2014	1.8 e	69.4 d	2.0 b
DSH 0.05	0.37	0.50	0.06

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

**Cuadro 6. Comparación de variables agronómicas de progenitores e híbridos de maíz evaluados en el Estado de México y Guanajuato, México.**

Genotipo	Rendimiento de semilla (t ha <sup>-1</sup> )	Floración masculina (días)	Altura de planta (m)
M-43	2.4 h	80.9 b	2.1 d
M-47	2.8 g	75.3 e	1.9 e
M-55	2.7 g	74.6 f	1.7 g
M-48	5.0 f	74.4 g	2.0 e
M-46	1.7 j	83.2 a	1.5 h
M-54	0.9 l	83.6 a	1.3 i
M-52	2.2 i	77.0 c	1.3 i
M-44	1.6 k	83.5 a	1.5 h
CML-242	1.5 k	77.4 c	1.2 j
M-47×M-46	5.8 d	73.8 h	2.3 b
M-43×M-44	5.2 e	75.7 d	2.4 a
M-55×M-54	4.4 f	73.7 h	1.8 f
H-70	7.6 a	73.5 i	2.2 c
H-66	6.6 c	73.6 h	2.1 d
H-44	6.7 b	72.4 j	2.2 c
DSH 0.05	0.81	1.08	0.13

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

CONCLUSIONES

La producción de semilla de las cruzas simples progenitoras hembra M-47×M-46 y M-43×M-44 destacaron por su rendimiento. Las líneas con mayor estabilidad fueron M-55, M-52 y M-54. Las líneas endogámicas femeninas M-47, M55 y M- 43 se agruparon con un rendimiento de semilla similar. La línea macho M-48 fue la de mayor rendimiento. Los mejores ambientes

de producción de semilla fueron de valles altos, seguidos por los de transición.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmadi J., A. Mohammadi and T. N. Mirak (2012) Targeting promising bread wheat (*Triticum aestivum* L.) lines for cold climate growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14:645-657.

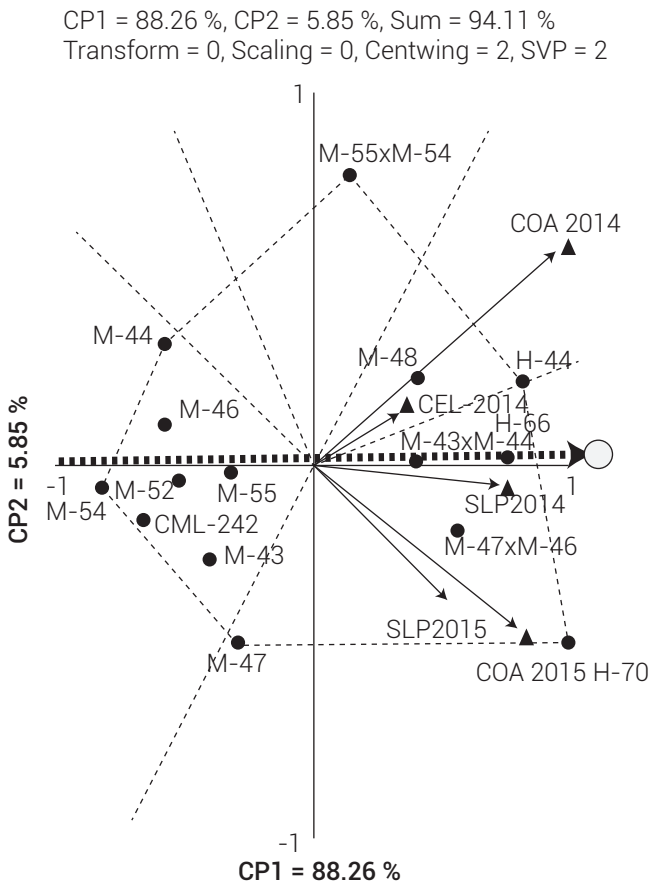
Ambika S., V. Manonmani and G. Somasundaram (2014) Review on effect of



**Cuadro 7. Prueba de Gollob del modelo SREG para el rendimiento de progenitores e híbridos evaluados en el Estado de México y Guanajuato, México.**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	% Suma de cuadrados	Cuadrados medio
Modelo	74	1717.93		
Ambientes (A)	4	452.39	26.33	113.09**
Genotipos (G)	14	1027.14	59.78	73.36**
G × A	56	238.40	13.89	4.25**
CP1	17	1116.94	88.25	65.70**
CP2	15	73.99	5.84	4.93**
Residuo	33	74.67	5.89	6.65

\*\* : significativo con  $P \leq 0.01$ .



**Figura 1. Biplot de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción representada mediante los dos primeros componentes principales para rendimiento en la producción de semilla en el Estado de México y Guanajuato, México.**

- seed size on seedling vigor and seed yield. *Research Journal of Seed Science* 7:31-38, <https://doi.org/10.3923/rjss.2014.31.38>
- Arellano V. J. L., J. Virgen V. y M. A. Avila P. (2010) H-66 híbrido de maíz para los valles altos de los estados de México y Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:252-267.
- Arellano V. J. L., J. Virgen V., I. Rojas M. y M. A. Avila P. (2011) H-70: híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del altiplano central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:619-626, <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1651>
- Burgueño J., J. Crossa and M. Vargas (2001) SAS Programs for graphing GE and GGE biplot. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit, CIMMYT. Texcoco, Mexico.
- CNA, Comisión Nacional del Agua (2015) Servicio Meteorológico Nacional. <http://www.cna.gob.mx> (Diciembre 2015).
- Craufurd P. Q. and T. R. Wheeler (2009) Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* 60:2529-2539, <https://doi.org/10.1093/jxb/erp196>
- Crossa J. and P. L. Cornelius (2002) Linear-bilinear models for the analysis of genotype environment interaction. In: Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding. M. S. Kang (ed.). CABI Publishing. London, UK. pp:305-322, <https://doi.org/10.1079/9780851996011.0305>
- Espinosa C. A. y A. Carballo C. (1988) Adaptabilidad y rendimiento de semilla de líneas e híbridos de maíz. *Agrociencia* 74:313-322.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019) Production, crops. Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/SCL> (August 2022).
- García M. P. J., S. R. Cabrera P., A. A. Pérez C., R. J. Silva D., R. M. Álvarez P., C. A. Marín R., ... y M. D. Santella Q. (2009) Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y QPM en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Tropical* 59:433-443.
- Gauch H. G. and R. W. Zobel (1997) Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37:311-326, <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x>
- Kandus M., D. Almorza, R. B. Ronceros and J. C. Salerno (2010) Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 79:39-46, <https://doi.org/10.32604/phyton.2010.79.039>
- Lozano-Ramírez A., A. Santacruz-Varela, F. San-Vicente-García, J. Crossa, J. Burgueño y J. D. Molina-Galán (2015) Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:337-347, <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.4.337>
- Martínez-Sánchez J., N. Espinosa P. y Y. Villegas A. (2016) Interacción genotipo-ambiente en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 3:38-48.
- Milošević M., M. Vujaković and D. Karagić (2010) Vigour test as indicators of seed viability. *Genetika* 42:103-118, <https://doi.org/10.2298/GENSR1001103M>
- Pacheco A., M. Vargas, G. Alvarado, F. Rodríguez, J. Crossa and J. Burgueño (2015) GEA-R (Genotype × Environment Analysis with R for Windows) version 2.0. International Maize and Wheat Improvement Center. Mexico City. <http://hdl.handle.net/11529/10203> (August 2022).
- Setimela P. S., B. Vivek, M. Bänziger, J. Crossa and F. Maiden (2007) Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model. *Field Crops Research* 103:161-169, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.05.010>
- Setimela P. S., J. Crossa and M. Bänziger (2010) Targeting of early to intermediate maize hybrids for yield performance and yield stability using SREG model. *South African Journal of Plant and Soil* 27:207-214, <https://doi.org/10.1080/02571862.2010.10639988>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020) Panorama Agroalimentario 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. 200 p.
- Tollenaar M., A. Ahmadzadeh and E. A. Lee (2004) Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Science* 44:2086-2094, <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.2086>
- Virgen-Vargas J., R. Zepeda-Bautista, M. A. Ávila-Perches, A. Espinosa-Calderón, J. L. Arellano-Vázquez y A. J. Gámez-Vázquez (2014) Producción de semilla de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana* 25:323-335, <https://doi.org/10.15517/am.v25i2.15439>
- Virgen-Vargas J., R. Zepeda-Bautista, M. A. Ávila-Perches, A. Espinosa-Calderón, J. L. Arellano-Vázquez y A. J. Gámez-Vázquez (2016a) Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 27:191-206, <https://doi.org/10.15517/am.v27i1.21899>
- Virgen-Vargas J., R. Zepeda-Bautista, M. A. Ávila-Perches, I. Rojas-Martínez, A. Espinosa-Calderón y A. J. Gámez-Vázquez (2016b) Desespigamiento en cruces simples progenitoras de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para Valles Altos de México. *Agrociencia* 50:43-59.
- Wang B., Z. Zhang, Z. Fu, Z. Liu, Y. Hu and J. Tang (2016) Comparative QTL analysis of maize seed artificial aging between an immortalized F<sub>2</sub> population and its corresponding RILs. *The Crop Journal* 4:30-39, <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.07.004>
- Zepeda-Bautista R., J. Virgen-Vargas, F. Suazo-López, J. L. Arellano-Vázquez y M. A. Ávila-Perches (2021) Nitrógeno en fertilización para producir semilla de líneas progenitoras y cruces simples de maíz: dosis y distribución. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:191-200, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.191>