

Respuesta ambiental de poblaciones nativas de maíz del sureste de Coahuila,

México

**Environmental response of native maize populations of the southeast of
Coahuila, Mexico**

Lino César Espinosa Tamayo¹

Froylán Rincón Sánchez²

Norma Angélica Ruíz Torres³

Juan Manuel Martínez Reyna²

Adalberto Benavides Mendoza⁴

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Fitomejoramiento

³ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Centro de Capacitación y Desarrollo de Tecnología de Semillas

⁴ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura

Autor para correspondencia: Froylán Rincón Sánchez, E-mail: frincon@uaaan.edu.mx

Resumen

Introducción: Las consecuencias del cambio climático se manifiestan en la modificación de las condiciones del ambiente (temperatura, precipitación, heladas, sequía, salinización de los suelos), por lo que se sugiere el estudio de la diversidad genética del maíz y su interacción con factores del ambiente. Los objetivos del presente trabajo fueron evaluar el rendimiento, así como la respuesta a diferentes ambientes de 63 poblaciones nativas de maíz representativas de la variación genética en el sureste de Coahuila, México.

Método: La evaluación agronómica de las poblaciones nativas de maíz de ocho grupos raciales se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano de 2013 en dos localidades contrastantes y

representativas de las condiciones ambientales del sureste de Coahuila. En cada localidad se establecieron los experimentos separando los bloques en áreas independientes, y en una localidad, en fechas de siembra diferentes. Las combinaciones de localidades \times bloques fueron considerados como ambientes diferentes para explorar e interpretar la interacción genotipo \times ambiente. En el presente documento se analiza la respuesta al ambiente de evaluación con base en el rendimiento de grano y los días a floración masculina.

Resultados: Se identificaron ocho poblaciones con un potencial de rendimiento promedio sobresaliente a través de ambientes, con valores entre 7.4 y 8.5 t ha⁻¹, representativas principalmente de las razas Tuxpeño, Ratón y Tuxpeño Norteño. Las poblaciones adaptadas a las áreas de transición-altura tuvieron un abatimiento promedio de 4.1 t ha⁻¹ (55.0 %) en el rendimiento al ser expuestas a condiciones ambientales de altitud intermedia.

Discusión o Conclusión: La interpretación gráfica de la interacción genotipo \times ambiente permitió identificar y agrupar a los genotipos con adaptación específica en los ambientes de evaluación, así como aquellos con un comportamiento promedio a través de ambientes. Se identificaron y agruparon 22 poblaciones con adaptación a las condiciones de transición-altura, 14 a áreas de altitud intermedia y 27 poblaciones con un comportamiento promedio a través de ambientes.

Palabras clave: *Zea mays* L.; diversidad genética; interacción genotipo \times ambiente; evaluación de germoplasma

Abstract

Introduction: The climate change consequences have been manifested on the environmental condition's changes (temperature, rainfall, frost, drought, and soil salinity), then, the analysis of maize genetic diversity and their environment interaction is suggested. The objectives of this research were to determine the yield potential, the response to different environments of 63 maize landrace populations representative of the genetic variation in the southeast of Coahuila, Mexico.

Method: The agronomic evaluation of native maize populations of eight racial groups was carried out in the spring-summer cycle in 2013 in two contrasted and representative locations of the environmental conditions in the southeast of Coahuila. Blocks were established independently within each location, and, in one location, blocks were different planting date. The blocks \times location combinations were considered different environments to explore and make an

interpretation of the genotype by environment interaction. In this paper, the response to the environment is analyzed based on grain yield and days to male flowering.

Results: Eight populations were identified with an outstanding average yielding potential across environments, with values between 7.4 and 8.5 t ha⁻¹, mainly representative from the Tuxpeño, Raton and Tuxpeño Norteño races. Populations adapted to transition-high altitude areas had an average yield reduction of 4.1 t ha⁻¹ (55.0 %) after been exposed to intermediate altitude conditions.

Discussion or Conclusion: The graphic interpretation of the genotype x environment interaction allowed to identify and to group the genotypes with specific adaptation in the environments of evaluation, as well as the ones with an average performance across environments. Twenty-two populations were identified with adaptation to transition- high altitude conditions, 14 to intermediate altitude areas and 27 populations with an average performance across environments.

Keywords: *Zea mays* L.; genetic diversity; genotype by environment interaction; germplasm evaluation.

Recibido en: 28/03/2019

Aceptado en: 02/07/2019

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo agrícola más importante de México, por ser la fuente principal de alimentación humana y animal, así como en la elaboración de múltiples productos para la industria; se siembra en la mayoría de los estados en una amplia gama de condiciones climáticas (SIAP, 2017).

En el estado de Coahuila, en 2017 se sembraron 30,728 ha de maíz para grano, de las cuales, en el sureste del estado se sembraron 27,061 (88.1 %) y de estas, el 95.4 % fue bajo condiciones de temporal (SIAP, 2017), principalmente con poblaciones nativas. Las poblaciones nativas están estrechamente relacionadas con las condiciones del ambiente de producción y

adaptación (temperatura, precipitación, altitud) y a los usos, principalmente del grano (Wellhausen *et al.*, 1951; Ruiz *et al.*, 2008). En el sureste del estado de Coahuila, se han identificado ocho grupos raciales de maíz: Celaya, Cónico Norteño, Elotes Cónicos, Elotes Occidentales, Olotillo, Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño en una amplitud de altitudes entre los 887 a 2557 m (Wellhausen *et al.*, 1951; Rincón *et al.*, 2010; Rincón y Ruiz, 2015).

Las consecuencias del cambio climático conllevan modificaciones de las condiciones del ambiente, determinada por los cambios en la temperatura, ocurrencia errática de la precipitación, presencia de heladas y etapas prolongadas de sequía. En México, producción de maíz en áreas agrícolas de temporal está expuesta a un alto riesgo debido al incremento de las temperaturas y a la reducción de la precipitación como consecuencia del cambio climático (Hellin *et al.*, 2014). En un análisis de los efectos del cambio climático, Ruiz *et al.* (2011), para el periodo 2051-2060 proyectan un incremento promedio en la temperatura de 1.9 °C en las regiones productoras de maíz en México, lo que repercutirá en la disponibilidad del área cultivable, una reducción del ciclo de madurez en el cultivo y por lo tanto una reducción en el rendimiento de grano. Ureta *et al.* (2012) enfatizan en la influencia del cambio climático en los patrones de distribución de cultivos, particularmente en los sistemas de agricultura tradicional y perciben una reducción del 30 % en las áreas apropiadas para siembra de maíz.

Los efectos en la agricultura se manifiestan en bajos rendimientos en la producción de alimentos, así como en la erosión genética, causada por la pérdida de materiales genéticos debido a los periodos prolongados de condiciones que limitan la productividad. La presión ambiental por efectos del cambio climático sugiere el análisis de la diversidad genética y su interacción con las modificaciones ambientales, como alternativa para identificar alelos con potencial para mejorar poblaciones locales o para ampliar tolerancia a factores de estrés biótico y abióticos (Hellin *et al.*, 2014). Mercer y Perales (2010) mencionan a la plasticidad (respuesta adaptativa a diferentes condiciones ambientales), la selección (variación intrínseca de alelos favorables) y el flujo genético (infiltración génica) como mecanismos de respuesta de las poblaciones nativas a los cambios ambientales. El conocimiento de la diversidad del maíz en un ámbito regional permite definir estrategias para su conservación, determinar su potencial genético con el propósito de ser incorporados a esquemas de selección *per se* o en combinaciones genéticas, pero también, la respuesta y adaptación a las condiciones del cambio climático. Debido a la importancia de las siembras de temporal, la diversidad genética de maíces existentes en el sureste de Coahuila, y la

presión por efecto del cambio climático, se realizó el presente estudio con la finalidad de conocer el potencial de rendimiento y la respuesta a factores del ambiente de 63 poblaciones nativas de maíz representativas de la variación en el sureste de Coahuila. Lo anterior se basa en el supuesto de que la evaluación agronómica en ambientes representativos y contrastantes de la región de estudio permitirá determinar el potencial genético de poblaciones dentro de grupos raciales, que, de acuerdo con su área de adaptación, puedan ser incluidas como material base para el desarrollo de germoplasma capaz de responder a las modificaciones ambientales.

Método

El material genético estuvo constituido por 63 poblaciones nativas de maíz adaptadas al sureste de Coahuila, clasificadas en ocho grupos raciales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación racial y área de adaptación de 63 poblaciones nativas de los maíces del Sureste de Coahuila.

Clasificación racial †	Bajo (B) (< 1000)	Intermedio (I) (1001 – 1800)	Transición (T) (1801 – 2000)	Altura (A) (> 2000)	Total
Celaya		3			3
Cónico Norteño			5	17	22
Cónico Norteño _ Chalqueño				1	1
Cónico Norteño _ Elotes Cónicos				2	2
Cónico Norteño _ Ratón				1	1
Elotes Cónicos		1	1	1	3
Elotes Cónicos _ Ratón		1			1
Elotes Occidentales		1			1
Olotillo		1			1
Olotillo _ Ratón		2			2
Ratón	3	9	1		13
Ratón _ Elotes Cónicos		1			1
Ratón _ Tuxpeño		2			2
Tuxpeño		3			3

Tuxpeño Norteño		3		1		4
Tuxpeño _ Celaya		2				2
Tuxpeño _ Ratón		1				1
	Total	3	30	8	22	63

† El símbolo “_” entre los grupos raciales indica algún grado de combinación genética o formas intermedias entre razas.

Un grupo de las poblaciones evaluadas fueron recolectadas y descritas como parte del estudio y distribución de los maíces nativos de Coahuila (Rincón *et al.*, 2010); el resto de las poblaciones fueron obtenidas y descritas en colectas posteriores (datos no publicados). Las poblaciones nativas provienen de áreas ecológicas del sureste de Coahuila, que oscilan entre 887 y 2557 m. Con propósitos de interpretación de la respuesta a los ambientes, las poblaciones fueron agrupadas de acuerdo con el área de adaptación: Bajo (≤ 1000 m), Intermedio (1001 – 1800 m), Transición (1801 - 2000 m) y Altura (> 2000 m), en referencia a la clasificación que se propone para la descripción varietal de maíz (SNICS, 2005), así como en grupos raciales de acuerdo con la clasificación propuesta por Wellhausen *et al.* (1951) (Cuadro 1). En el estudio se incluyeron siete genotipos como testigos, variables en madurez y tipo de grano: una variedad experimental (POBAM), dos variedades mejoradas (VAN210 y JAGUAN) y cuatro variedades sintéticas proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (6221, 6222, Pool31 y Pool32).

La evaluación agronómica de las 63 poblaciones y los siete testigos se llevó a cabo en el ciclo agrícola primavera-verano de 2013, en dos localidades contrastantes y representativas de las condiciones ambientales de la región en el sureste del estado de Coahuila: El Mezquite, Galeana, N. L., localizada a 10 km de los límites de Arteaga, Coah. ($25^{\circ} 05' 22''$ N; $100^{\circ} 42' 31''$ O; temperatura media anual de 16.3° C; precipitación anual 372.8 mm; altitud de 1910 m); y General Cepeda, Coah. ($25^{\circ} 23' 00.91''$ N; $101^{\circ} 27' 15.3''$ O; temperatura media anual de 18.4° C; precipitación anual 414.6 mm; altitud de 1457 m), bajo condiciones de riego en las dos localidades de estudio.

Los genotipos fueron establecidos en un diseño experimental de bloques incompletos 7×10 , con arreglo α -látice (0,1), con dos repeticiones (bloques) por localidad. La siembra en la localidad, El Mezquite fue el 11 de mayo de 2013, en donde se estableció cada bloque en área independiente dentro del mismo predio (MEZ1 y MEZ2, respectivamente); en General Cepeda,

cada repetición fue establecida en diferente área y fecha de siembra; la primera, el 25 de Mayo y la segunda, el 15 de Junio de 2013 (GC1 y GC2, respectivamente). De esta manera, los bloques representan un muestreo de las condiciones del ambiente diferentes dentro de cada localidad y, por lo tanto, se consideran ambientes diferentes, particularmente en la localidad de General Cepeda, donde la primera fecha fue afectada por el periodo de la canícula. La unidad experimental consistió en dos surcos de 4 m de largo, con una distancia entre plantas de 0.2 m y distancia entre surcos de 0.85 m en General Cepeda, Coah., y 0.92 m en El Mezquite, Galeana, N. L.

La respuesta ambiental se analizó con base en el rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) al 15 % de humedad y los días a floración masculina. Se realizó un análisis de varianza de acuerdo con el diseño experimental (SAS Institute, 2004) para probar los efectos de los genotipos y la interacción con las dos localidades de evaluación.

Los genotipos y las localidades fueron considerados efectos fijos y el resto de los efectos en el modelo, aleatorios. Se realizó la descomposición de la suma de cuadrados para probar los efectos de las poblaciones nativas, los testigos y la interacción de ambos con las localidades. Para identificar genotipos sobresalientes, en cada una de las variables en estudio se calculó un valor de decisión determinado por la media más uno y dos veces el error estándar de la media ($\mu + EE$; $\mu + 2EE$). Las combinaciones de localidades \times bloques (MEZ1, MEZ2, GC1 y GC2) fueron consideradas como ambientes diferentes y utilizados para realizar una interpretación de la interacción genotipo \times ambiente mediante el análisis de dispersión gráfica basado en el análisis de componentes principales (CP) con el modelo GGEbiplot (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003; Yan, 2012). GGEbiplot es un diagrama de dispersión bi-espacial que permite visualizar las relaciones entre factores; en este caso, de gran utilidad para interpretar la interacción genotipo \times ambiente, el cual se basa en el siguiente modelo: $Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$ (Yan y Kang, 2003); donde: Y_{ij} , es el rendimiento promedio del genotipo i en el ambiente j ; \bar{Y}_j , rendimiento promedio de genotipos en el ambiente j ; λ_1 y λ_2 , valores característicos para los CP1 y CP2, respectivamente; ξ_{i1} y ξ_{i2} , vectores característicos de los CP1 y CP2, respectivamente para el genotipo i ; η_{j1} y η_{j2} , vectores característicos de los CP1 y CP2, respectivamente para el ambiente j ; ε_{ij} , residual del modelo asociado con el genotipo i en el ambiente j .

Resultados

En el análisis de varianza se encontró significancia ($p \leq 0.01$) entre las localidades de evaluación sólo en los días a floración masculina (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza del rendimiento de grano y días a floración de las poblaciones evaluadas en 2013.

FV	GL	Rendimiento de grano (t ha⁻¹)	Floración masculina (d)
Localidades (Loc)	1	673.546	44,201.16 **
Bloques (Blo) / Loc	2	116.889 **	548.61 **
Blo incompletos / Loc × Blo	24	2.267	12.17 **
Genotipos (Gen)	69	5.074 **	178.73 **
Poblaciones (Pob)	62	4.362 **	164.42 **
Testigos (Tes)	6	9.782 **	289.77 **
Pob vs Tes	1	15.742 **	191.20 **
Loc × Gen	69	3.251 **	22.80 **
Pob × Loc	62	3.378 **	20.94 **
Tes × Loc	6	1.224	27.45 **
(Pob vs Tes) × Loc	1	6.989 *	101.86 **
Error	113	1.752	6.05
CV (%)		21.819	3.04

* y **=Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad; **FV** = Fuentes de Variación; **GL**=Grados de Libertad.

Las dos localidades son contrastantes en clima y altitud, y también, son representativas de las condiciones ambientales del sureste del estado de Coahuila, consideradas para efectos del estudio en áreas de adaptación intermedia (General Cepeda, Coah.) y de transición (El Mezquite, Galeana, N. L.), respectivamente. Sin embargo, debido a las condiciones del establecimiento del

experimento, como el establecimiento de los bloques en espacios independientes, y en el caso de la localidad de General Cepeda, las dos fechas de siembra, no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento de grano. En los genotipos evaluados se encontró diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) en los dos caracteres en estudio, lo que se explica por la amplia variación entre las poblaciones nativas (Cuadro 1), así como la variación entre los testigos. La interacción poblaciones \times localidades ($p \leq 0.01$), refleja el cambio relativo en la respuesta a las condiciones del ambiente de evaluación, además de la respuesta determinada por la procedencia de las poblaciones nativas asociadas a los diferentes grupos raciales en estudio. En la interacción testigos \times localidades no se encontraron diferencias en el rendimiento de grano, en tanto que en floración masculina la diferencia fue significativa ($p \leq 0.01$). Lo anterior se atribuye a que los testigos han sido expuestos a mejoramiento genético, y, por lo tanto, muestran capacidad de respuesta en el rendimiento de grano en las dos localidades, al ser comparados con las poblaciones nativas, aunque estos, son sensibles a las condiciones ambientales en el ciclo vegetativo y respuesta debido a la procedencia y clasificación racial (Cuadro 1).

Potencial de rendimiento

Con base en el promedio del rendimiento de grano a través de localidades, se identificaron las mejores 20 poblaciones con referencia a los genotipos usados como testigos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Medias de rendimiento de grano y floración masculina de las 20 poblaciones superiores y los testigos en la evaluación agronómica realizada en 2013.

Genotipos	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)			Floración masculina (d)	
	Promedio	MEZ [†]	GC	MEZ	GC
Poblaciones[‡]					
I13R	8.495 *	10.417 **	6.572 *	92	68
I52T_C	8.308 *	11.317 **	5.299	107 **	78 **
I38T	8.222 *	7.682	8.762 **	103 **	71 **
I40R_T	8.190 *	9.455 *	6.925 *	106 **	79 **
I54T_C	7.817 *	10.757 **	4.877	107 **	75 **

I34TN	7.785 *	8.533	7.038 *	100 *	82 **
I49T	7.486 *	7.104	7.867 **	103 **	72 **
I45R	7.388 *	9.381 *	5.395	99 *	69
T17EC	7.349	8.104	6.594 *	94	71 **
I39R_T	7.059	8.077	6.042 *	112 **	79 **
I33EO	6.915	9.619 *	4.211	94	72 **
I18TN	6.859	8.245	5.473	100 *	69
I02R	6.847	7.776	5.918	100 *	72 **
I16T	6.806	6.822	6.789 *	100 *	69
I23C	6.663	8.040	5.285	97	71 **
I59TN	6.565	7.529	5.600	112 **	76 **
T11R	6.530	8.471	4.588	99 *	72 **
B15R	6.386	6.605	6.166 *	101 *	73 **
I01O	6.364	6.817	5.910	95	67
A43CN_EC	6.332	8.870 *	3.794	85	63
Testigos					
Pool31	8.437 *	9.141 *	7.734 **	105 **	72 **
6222	8.333 *	8.888 *	7.777 **	108 **	76 **
6221	8.037 *	8.456	7.619 **	112 **	76 **
POBAM	7.444 *	8.430	6.458 *	96	67
Pool32	7.400 *	9.218 *	5.582	99 *	71 **
JAGUAN	6.154	7.737	4.570	91	65
VAN210	4.159	5.840	2.478	79	58
Media	6.066	7.617	4.515	94	68
Máximo	8.495	11.317	8.762	112	82
Mínimo	3.685	3.891	1.526	79	58
EE	1.316	1.217	1.406	3.567	1.251

* y ** :=Valores superiores a la media más uno y dos veces el error estándar ($\mu + EE$; $\mu + 2EE$); **EE**=Error estándar; † **MEZ y GC**=Localidades El Mezquite y General Cepeda, respectivamente; ‡ El primer dígito indica el área de adaptación, **A**=Altura, **B** = Bajo; **I**=Intermedio y **T**=Transición, los dos dígitos siguientes al número de entrada y el indicador del grupo racial: **C**=Celaya; **CN**=Cónico Norsteño; **EC**=Elotes Cónicos; **EO**=Elotes Occidentales; **O**=Olotillo; **R**=Ratón; **T**= Tuxpeño; **TN**=Tuxpeño Norsteño.

De las 20 poblaciones, mostraron un potencial de rendimiento promedio sobresaliente con base en el valor superior a $\mu + EE$, representativas principalmente de las razas Tuxpeño, Ratón y

Tuxpeño Norteño, procedentes de áreas de adaptación intermedias (Cuadro 3), y cuatro de estas poblaciones I13R, I52T_C, I38T y I40R_T, con valores similares al rendimiento de los mejores testigos (Pool31, 6221 y 6222). También, resalta el comportamiento de las poblaciones I13R y I40R_T con rendimientos superiores en las dos localidades de evaluación.

En la localidad El Mezquite las ocho poblaciones nativas de maíz (I13R, I52T_C, I40R_T, I54T_C, I45R, I33EO, T08CN y I35R) mostraron rendimientos superiores al mejor testigo Pool32 (Cuadro 2); de éstas, las poblaciones I13R, I52T_C y I54T_C, con valores superiores al valor calculado de $\mu + 2EE$. Con excepción de T08CN (población adaptada al área de transición, información referida en el Cuadro 1), el resto de las poblaciones, de acuerdo con el sitio de procedencia, están adaptadas a áreas intermedias. En la localidad de General Cepeda, las poblaciones I38T y I49T, de la raza Tuxpeño, adaptadas a áreas intermedias fueron superiores en rendimiento de grano al mejor testigo (variedad sintética 6222).

La diferencia promedio en los días a floración de las poblaciones adaptadas a las áreas de transición y altura, evaluadas en las dos localidades de estudio fue de 18 a 25 días, en tanto que las poblaciones procedentes de áreas intermedias, la diferencia en floración alcanza valores superiores a los 33 días para las poblaciones I38T, I54T_C, I39R_T, I59TN. Las poblaciones adaptadas a áreas de transición y altura (A43CN_EC, T08CN, A28CN y A03CN) de la raza Cónico Norteño, en la localidad de General Cepeda tuvieron días a floración similar al promedio, lo que puede considerarse como poblaciones con capacidad de tolerar temperaturas superiores en relación con su área de adaptación.

Respuesta ambiental

En la Fig. 1 se muestran las medias del rendimiento de grano en las dos localidades de evaluación de los dos grupos de poblaciones de mayor frecuencia en el estudio, las 22 poblaciones adaptadas a áreas de Altura (Fig. 1a) y 30 de áreas intermedias (Fig. 1b).

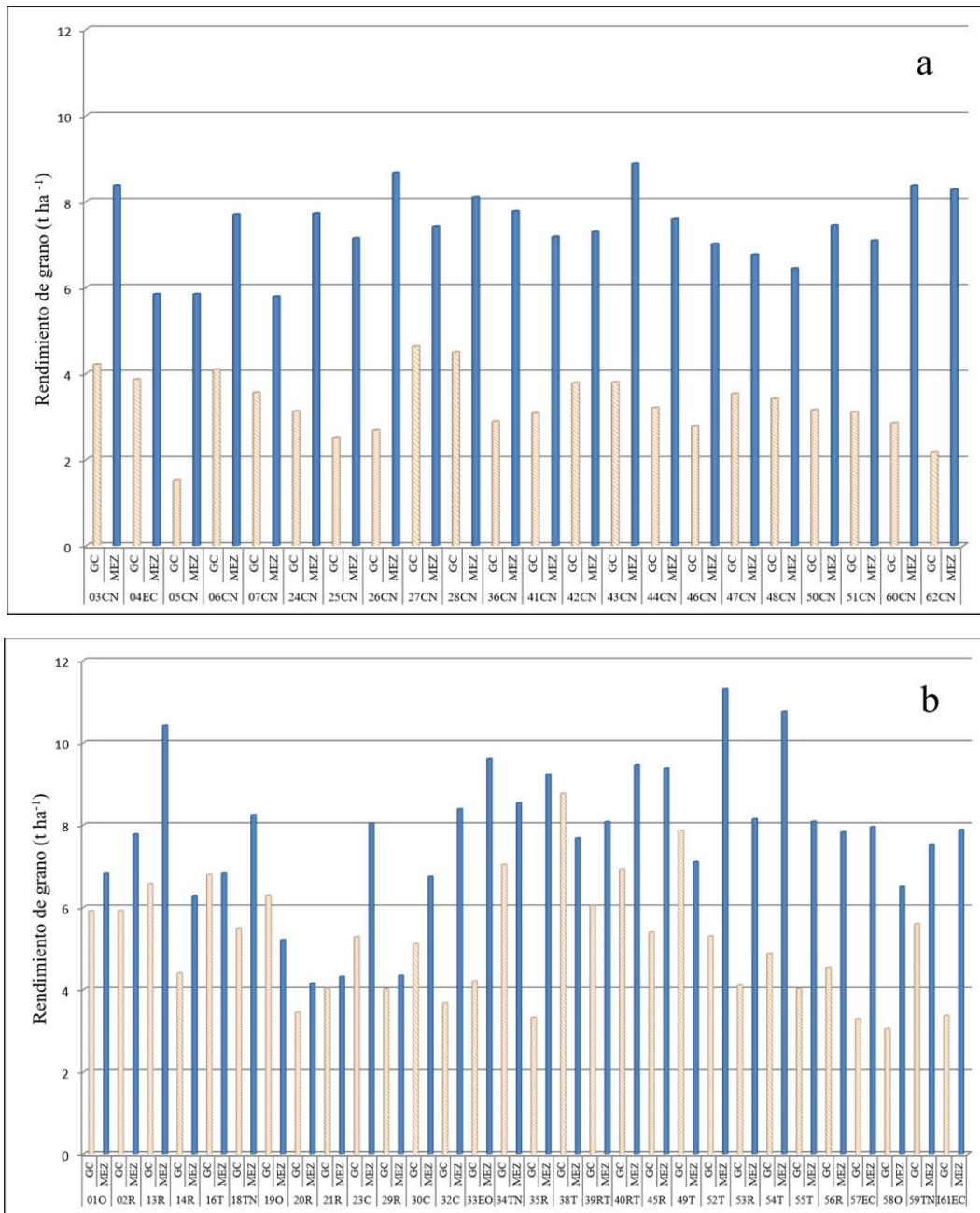


Fig. 1. Rendimiento de grano de poblaciones nativas de maíz evaluadas en dos localidades del sureste de Coahuila. **GC**=General Cepeda, Coah.; **MEZ**=El Mezquite, Galeana, N.L.; **a)** Poblaciones adaptadas a áreas de Altura (> 2000 m); **b)** Poblaciones adaptadas a áreas Intermedias (1001 – 1800 m); **C**=Celaya; **CN**=Cónico Norteño; **EC**=Elotes Cónicos; **EO**=Elotes Occidentales; **O**=Olotillo; **R**=Ratón; **T**=Tuxpeño; **TN**=Tuxpeño Norteño.

En el primer caso, los materiales de Altura (Fig. 1a), en general tuvieron un rendimiento promedio inferior en 4.1 t ha^{-1} (55.0 %), al ser evaluadas en la localidad de General Cepeda, con un rendimiento promedio de 3.29 y 7.39 t ha^{-1} para las localidades de General Cepeda y El Mezquite, Galeana, N. L., respectivamente. Con respecto al comportamiento de las 30 poblaciones de áreas intermedias (Fig. 1b), se encontró una respuesta en el rendimiento promedio de 2.6 t ha^{-1} (30.5 %) en la localidad El Mezquite, con medias de 5.15 y 7.75 t ha^{-1} para las localidades de General Cepeda, Coah. y El Mezquite, Galeana, N. L., respectivamente. Con excepción de las poblaciones 19O (Olotillo), 38T y 49T (Tuxpeño) con rendimientos superiores en General Cepeda, el resto de las poblaciones obtuvieron rendimientos superiores en la localidad El Mezquite, de las cuales 14 con rendimiento de grano superior a 8.0 t ha^{-1} (Fig. 1b) y ocho de estas, con rendimientos sobresalientes a través de los ambientes de evaluación (Cuadro 3).

Interacción genotipo por ambiente

La Fig. 2 presenta la dispersión gráfica de los genotipos (poblaciones nativas y testigos) de acuerdo con el modelo GGEbiplot para el análisis gráfico de la interacción genotipo \times ambiente del rendimiento de grano en dos localidades (Yan *et al.*, 2000).

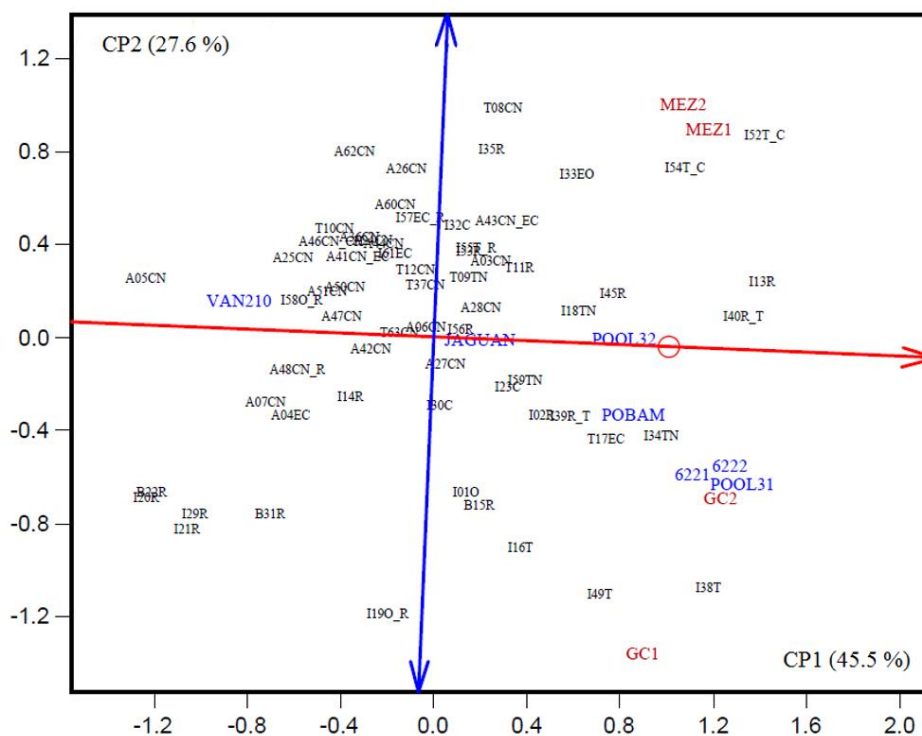


Fig. 2. Dispersión gráfica de la interacción genotipo × ambiente del rendimiento de grano en dos localidades (GC1, GC2, MEZ1 y MEZ2). El primer dígito en los genotipos indica el área de adaptación. **A**=Altura; **B**=Bajo; **I**=Intermedio; y **T**=Transición. Los dos dígitos siguientes indican el número de la entrada y el complemento, el grupo racial. **C**=Celaya; **CN**=Cónico Norteño; **EC**=Elotes Cónicos; **EO**=Elotes Occidentales; **O**=Olotillo; **R**=Ratón; **T**=Tuxpeño; **TN**=Tuxpeño Norteño.

El modelo GGEbiplot se basa en el análisis de componentes principales, que analiza la información de los efectos de los genotipos (G) y de la interacción genotipo × ambiente (GE), proporcionando un despliegue gráfico del comportamiento promedio y estabilidad de los genotipos de acuerdo con los ambientes de evaluación (Yan *et al.*, 2000; Yan y Kang, 2003). En este análisis, los dos componentes principales (CP1 y CP2) explicaron el 73.1 % de la variación total acumulada de los genotipos y la interacción genotipo × ambiente del rendimiento de grano. De acuerdo con Yan y Kang (2003) si los ambientes de evaluación son los probadores de los genotipos, el eje de la abscisa indica los rendimientos promedio, en tanto que la ordenada al origen, valora la respuesta específica en los ambientes de prueba.

En la Fig. 2, el CP1 indica el comportamiento promedio en el rendimiento de grano de los genotipos, en tanto que, los valores positivos del CP2 y alejado del origen, se identifica las

poblaciones con adaptación a la localidad El Mezquite, Galeana, N. L., las que se adaptan a General Cepeda se localizan con los valores negativos. Con el propósito de identificar a los genotipos con un comportamiento promedio a través de las variantes ambientales, se consideró a aquellos que se encuentran localizados cerca y paralelos a la abscisa (rango aproximado de $-0.3 \leq 0 \leq 0.3$ del CP2), lo cual señala como una forma de estabilidad de los genotipos en los ambientes de prueba (Yan y Tinker, 2006).

Las poblaciones con mayor rendimiento de grano a través de ambientes (Cuadro 3) se ubicaron con valores positivos del CP1 en la Fig. 2; de estas poblaciones, tres I52T_C, I54T_C y I33EO tuvieron un comportamiento y adaptación a la localidad El Mezquite, en tanto que, en la localidad de General Cepeda, Coah., se identificaron cinco poblaciones: I38T, I16T y I49T de la raza Tuxpeño; I34TN y T17EC de las razas Tuxpeño Norteño y Elotes Cónicos, y tres testigos (Pool31, 6221 y 6222). Por otro lado, se identificaron a nueve poblaciones con un comportamiento promedio en el rendimiento de grano a través de ambientes: I11R, I13R, I02R, I40R_T, I45R y I39R_T de la raza Ratón; I18TN y I59TN de Tuxpeño Norteño y I23C de Celaya, y dos testigos (Pool32 y POBAM).

Discusión o Conclusiones

Los experimentos fueron diseñados para establecer las repeticiones (bloques principales), siguiendo el principio de la experimentación en bloques, y en el caso de la localidad en General Cepeda, los dos bloques fueron separados por fechas de siembra. Lo anterior permitió que los bloques fueran diferentes, con un valor alto y significativo ($p \leq 0.01$) del cuadrado medio de bloques dentro de localidad; valor utilizado para probar los efectos de localidades (Cuadro 2), que, bajo esta premisa, no se encontraron diferencias entre localidades, aun cuando son estas contrastantes en clima y altitud, además, representativas de las condiciones ambientales del área de estudio. Por lo tanto, las combinaciones de localidades \times bloques (MEZ1, MEZ2, GC1 y GC2) fueron considerados ambientes diferentes para explorar e interpretar la interacción genotipo \times ambiente mediante el análisis de dispersión gráfica, basado en el análisis de componentes

principales (CP) con el modelo GGEbiplot, un diagrama de dispersión bi-espacial que permite visualizar las relaciones entre factores, en este caso, los genotipos y ambientes (Yan y Kang, 2003).

Las poblaciones que tuvieron un potencial de rendimiento promedio sobresaliente (Cuadro 3), son de las razas Tuxpeño, Ratón y Tuxpeño Norteño, procedentes de áreas de adaptación intermedias. En la evaluación de poblaciones nativas de maíz de Coahuila, Nájera *et al.* (2010), identificaron a las razas Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño como las de mayor potencial de rendimiento. Al igual que en el presente estudio, diversos investigadores han identificado poblaciones nativas con potencial de rendimiento similares a las variedades mejoradas e híbridos comerciales (Pecina *et al.*, 2011; Herrera-Cabrera *et al.*, 2013); lo anterior destaca la importancia del germoplasma nativo y su capacidad de respuesta en ambientes contrastantes como resultado del proceso continuo de selección que realizan los agricultores (Hellin *et al.*, 2014). El comportamiento promedio superior de las poblaciones de maíz de diferente grupo racial, así como la identificación de poblaciones con rendimiento aceptable en las dos localidades, determina el potencial genético, además, es posible identificar características adicionales para mejorar poblaciones locales en la tolerancia a factores adversos como la temperatura, estrés por sequía y adaptación, para mitigar las variaciones en los factores ambientales (Mercer y Perales, 2010; Hellin *et al.*, 2014). De las 20 poblaciones con mayor rendimiento promedio de grano (Cuadro 3), 11 fueron las más tardías, con una diferencia promedio entre las dos localidades de 25 días, debido a las diferencias intrínsecas de las mismas, pero también, a la respuesta a las condiciones de los ambientes de evaluación, particularmente a la temperatura y fotoperiodo, factores donde se ha reportado correlación positiva en ambientes de Valles Altos (Giauffret *et al.*, 2000).

En el caso de las poblaciones con adaptación a áreas de altura, aun cuando las poblaciones tuvieron una respuesta inferior en la localidad de General Cepeda, la reducción en el rendimiento tuvo una amplitud del 33.9 (04EC) al 73.9 % (05CN), lo que indica la respuesta diferencial entre las poblaciones, principalmente de la raza Cónico Norteño. Estos resultados muestran la vulnerabilidad de los materiales genéticos adaptados a Valles Altos a las condiciones extremas de temperatura como lo señalan Bellon *et al.* (2011). Las razas Cónico Norteño y Elotes Cónicos se encuentran adaptadas a las áreas de transición-altura en altitudes superiores a los 1700 m; en tanto que las razas Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño su área de adaptación es muy amplia:

Ratón (84 – 1300 m), Tuxpeño (0 – 1950 m) y Tuxpeño Norteño (1400 – 1701) (Ruiz *et al.*, 2008). Lo anterior explica la respuesta en el rendimiento de grano de las poblaciones incluidas en el presente estudio (Figs. 1a y 1b) a los diferentes ambientes, donde destacan las poblaciones adaptadas a áreas intermedias como alternativa para identificar alelos favorables que ayudan a mitigar los efectos del cambio ambiental en materiales adaptados a Valles Altos, en selecciones *per se* o a través de combinaciones genética como lo señalan Mercer y Perales (2010). La respuesta ambiental de los dos grupos de poblaciones indica que los materiales genéticos adaptados a áreas de Altura (Fig. 1a) mostraron un abatimiento promedio de 55.0 % del potencial de rendimiento al ser expuestas a condiciones ambientales de la localidad intermedia, como el caso de la localidad de General Cepeda, Coah. Por otro lado, las poblaciones adaptadas a áreas intermedias (Fig. 1b), al ser expuestas a condiciones de la localidad de transición, como el Mezquite, Galeana N. L., muestran un comportamiento en general, favorable, con un abatimiento de 30.5 % al comparar la respuesta en las dos localidades de evaluación. Este patrón de respuesta coincide con resultados encontrados por diversos investigadores en evaluaciones de poblaciones nativas en ambientes contrastantes (Giauffret *et al.*, 2000; Pecina *et al.*, 2011).

Las poblaciones sobresalientes a través de ambientes en el rendimiento de grano (Cuadro 3, Fig. 2) corresponden principalmente a las razas Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño, las cuales, con excepción de Tuxpeño Norteño, cuentan con una amplia adaptación (Ruiz *et al.*, 2008). También se nota la variación entre las poblaciones de los diferentes grupos raciales como respuesta a la interacción con los ambientes de prueba, así como las poblaciones con estabilidad de rendimiento. Lo anterior puede explicarse por las combinaciones entre grupos raciales y adaptación específica (Cuadro 1), promovido por la forma tradicional de intercambio de semilla entre agricultores en la región de estudio (Aguirre *et al.*, 2011; Rincón y Ruiz, 2015). Con base en la interpretación de la Fig. 2, se identificaron 22 poblaciones con adaptación a la localidad El Mezquite, que representa a las condiciones de transición-altura, 14 adaptadas a la localidad General Cepeda (condiciones de área intermedia) y 27 poblaciones con un comportamiento promedio (estable) a través de los ambientes. El concepto de estabilidad en esta interpretación se refiere a la respuesta promedio de los genotipos en cada ambiente, es decir, responden bien en ambientes favorables y viceversa (Weber *et al.*, 1996).

Se identificaron ocho poblaciones de maíz con un potencial de rendimiento promedio sobresaliente a través de ambientes, principalmente de las razas Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño

Norteño. Las poblaciones adaptadas a áreas de Altura tuvieron un abatimiento promedio del 55.0 % en el rendimiento de grano al ser expuestas a condiciones de una localidad intermedia; en tanto que las poblaciones procedentes de áreas intermedias, la reducción en el rendimiento de grano, bajo las mismas condiciones fue de 30.5 %. La interpretación gráfica de la interacción genotipo \times ambiente permitió identificar y agrupar a los genotipos con adaptación específica en las localidades de evaluación, así como aquellos con un comportamiento promedio a través de ambientes. Se identificaron y agruparon 22 poblaciones con adaptación a las condiciones de Altura, 14 a condiciones representativas de área intermedia y 27 poblaciones con un comportamiento promedio a través de ambientes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) por el financiamiento parcial de trabajo de investigación.

Referencias

- Aguirre M., V. J., F. Rincón S., R. Ramírez S., O. G. Colón A. y M. G. Razo M. (2011). Modelo para la conservación de maíces criollos en el sureste de Coahuila, México. Vicente Javier Aguirre Moreno, Saltillo Coahuila, México. 61 p.
- Bellon M. R., D. Hodson and J. Hellin (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *PNAS* 108: 13432-13437, <https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Giauffret C., J. Lothrop, D. Dorvillez, B. Gouesnard, and M. Derieux (2000). Genotype \times Environment Interactions in Maize Hybrids from Temperate or Highland Tropical Origin. *Crop Science*. 40:1004–1012. doi:10.2135/cropsci2000.4041004x
- Hellin, J., M. R. Bellon and S. J. Hearne (2014). Maize Landraces and Adaptation to Climate Change in Mexico. *Journal of Crop Improvement* 28(4): 484-501, doi: 10.1080/15427528.2014.921800.

- Herrera-Cabrera, B. E., F. Castillo-González, R. A. Ortega-Pazkca y A. Delgado-Alvarado (2013). Poblaciones superiores de la diversidad de maíz en la región oriental del estado de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 33 – 43.
- Mercer K. L. and H. R. Perales (2010). Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Applications* 3: 480–493. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00137.x>
- Nájera C., L. A., F. Rincón S., N. A. Ruíz T., y F. Castillo G. (2010). Potencial de rendimiento de poblaciones criollas de maíz de Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (4): 31-36.
- Pecina M., J. A., M. C. Mendoza C., J. A. López S., F. Castillo G., M. Mendoza R. y J. Ortiz C. (2011). Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34: 85 – 92.
- Rincón S., F., F. Castillo G. y N. A. Ruiz T. (2010). Diversidad y Distribución de los Maíces Nativos en Coahuila, México. SOMEFI. Chapingo, Méx. 116 p.
- Rincón S., F. y N. A. Ruiz T. (2015). Maíces nativos en el estado de Coahuila, México. *Revista Claridades Agropecuarias*. Edición Especial: 40-44. SAGARPA-ASERCA. Disponible en línea <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/especial-201509.asp>
- Ruiz C., J. A., N. Durán P., J. J. Sánchez G., J. Ron P., D. R. González E., J. B. Holland, and G. Medina G. (2008). Climatic Adaptation and Ecological Descriptors of 42 Mexican Maize Races. *Crop Science* 48:1502–1512. doi:10.2135/cropsci2007.09.0518
- Ruiz C., J. A., G. Medina G., J. L. Ramírez D., H. E. Flores L., G. Ramírez O., J. D. Manríquez O., P. Zarazúa V., D. R. González E., G. Díaz P., y C. De la Mora O. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Pub. Esp. (2): 309-323.
- SAS Institute (2004). SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- SIAP. (2017). Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) - Disponible en línea <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

- SNICS. (2005). Guía técnica para la descripción varietal de maíz (*Zea mays* L.). Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. México, D. F. 26 p.
- Ureta C., E. Martínez-Meyer., H. Perales-Rivera, and E. R. Álvarez-Buylla (2012). Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology* 18: 1073–1082. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02607.x>
- Weber, W. E., G. Wricke, and T. Westermann (1996). Selection of genotypes and prediction of performance by analyzing genotype by environment interactions. *In: Kang, M. S. and Gauch, H. G. (eds). Genotype by Environment Interaction. CRC PRESS. pp: 353-371.*
- Wellhausen, E. J., L. M. Roberts, y E. Hernández X., P. C. Mangelsdorf (1951). Razas de Maíz en México. Su Origen, Características y Distribución. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Folleto Técnico 5. México, D. F. 237 p.
- Yan W. (2012). GGEbiplot. Data Analysis and Management System. Patter Explorer. Ver. 7.8. Ontario, Canada.
- Yan W., A. Hunt., Q. Sheng, and Z. Szlavnic (2000). Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. *Crop Science*. 40 (3): 597-605. doi:10.2135/cropsci2000.403597x
- Yan W. and M. S. Kang (2003). GGE Biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. CRC Press LLC, New York. USA. 268 p.
- Yan W., and N. A. Tinker (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*. 86: 623–645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>