

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



PESO SECO DE PLÁNTULA Y DESARROLLO VEGETATIVO BAJO  
CONDICIONES DE ESTRÉS Y SU RELACIÓN CON EL  
RENDIMIENTO DE GRANO EN MAÍZ

GREGORIO ANTONIO RAMÍREZ CEH

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial Para  
Obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN FITOMEJORAMIENTO

PESO SECO DE PLÁNTULA Y DESARROLLO VEGETATIVO BAJO  
CONDICIONES DE ESTRÉS Y SU RELACIÓN CON EL  
RENDIMIENTO DE GRANO EN MAÍZ

TESIS

GREGORIO ANTONIO RAMÍREZ CEH

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y  
aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN FITOMEJORAMIENTO

COMITÉ PARTICULAR



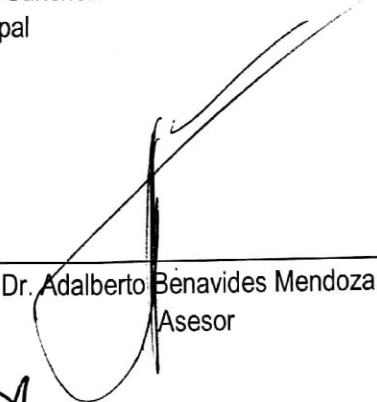
---

Dr. Froylan Rincón Sánchez  
Asesor Principal



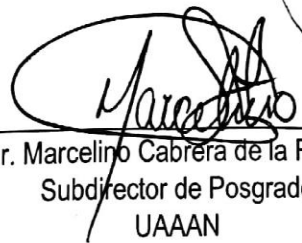
---

Dra. Norma Angélica Ruiz Torres  
Asesor



---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor



---

Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Subdirector de Posgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Mayo 2019

## **Agradecimientos**

A la **Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”** por permitirme culminar mi formación profesional.

A mi Comité Particular de Asesoría, integrado por el **Dr. Froylán Rincón Sánchez, Dra. Norma Angélica Ruiz Torres y Dr. Adalberto Benavides Mendoza**; por darme la gran oportunidad de trabajar con ellos, por sus enseñanzas y consideraciones para conmigo, aunque no siempre hayan tenido una respuesta favorable de mi parte y; sobre todo, por su amistad. Gracias.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico durante los estudios de Postgrado.

Al **Ing. Manuel Treviño Torres** por su apoyo brindado durante el experimento realizado en el invernadero.

## Índice general

## Página

|  |      |
|--|------|
| Lista de cuadros.....                          | vi   |
| Lista de figuras.....                          | vii  |
| Resumen .....                                  | viii |
| Abstract.....                                  | xi   |
| INTRODUCCIÓN .....                             | 1    |
| Objetivos.....                                 | 3    |
| Hipótesis.....                                 | 3    |
| REVISIÓN DE LITERATURA.....                    | 4    |
| Importancia de maíz .....                      | 4    |
| Cambio climático .....                         | 5    |
| Respuesta ambiental y adaptación de maíz ..... | 7    |
| Divergencia genética .....                     | 7    |
| Selección bajo condiciones de estrés.....      | 8    |
| MATERIALES Y MÉTODOS.....                      | 10   |
| Material genético .....                        | 10   |
| Ambientes de evaluación.....                   | 10   |
| Diseño experimental .....                      | 11   |
| I.    Ensayo en invernadero .....              | 11   |
| Siembra .....                                  | 11   |
| Riegos y manejo del cultivo.....               | 12   |
| Cosecha y variables medidas.....               | 13   |
| II.   Ensayo de laboratorio .....              | 13   |
| Siembra .....                                  | 13   |
| Variables evaluadas .....                      | 14   |
| III.  Ensayo de campo .....                    | 14   |
| Siembra .....                                  | 14   |
| Labores culturales .....                       | 15   |
| Riegos .....                                   | 15   |
| Cosecha y variable que considerar .....        | 15   |
| Análisis de la información .....               | 16   |

|   |    |
|---|----|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                  | 18 |
| Análisis de varianza.....                                     | 18 |
| Potencial de rendimiento de genotipos.....                    | 22 |
| Análisis de la heterosis.....                                 | 24 |
| Análisis de correlación.....                                  | 27 |
| Interacción de los genotipos con caracteres x ambientes ..... | 29 |
| CONCLUSIONES .....  | 33 |
| REFERENCIAS .....   | 34 |

## Lista de cuadros

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Cuadro 1.</b> Clasificación racial y procedencia de las poblaciones nativas involucradas en el estudio. ....   | 10            |
| <b>Cuadro 2.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de la producción de materia seca en ensayos de laboratorio e invernadero y rendimiento de grano en campo realizados en el 2017. .... | 19            |
| <b>Cuadro 3.</b> Medias de los ambientes de evaluación de los genotipos y sus cruzas realizados en 2017. ....   | 21            |
| <b>Cuadro 4.</b> Rendimiento promedio de grano y materia seca en laboratorio e invernadero de poblaciones de maíz y las mejores 20 cruzas evaluadas en 2017. ....                               | 23            |
| <b>Cuadro 5.</b> Heterosis promedio de poblaciones de maíz y sus cruzas seleccionadas en rendimiento de grano y materia seca evaluadas en 2017. ....  | 25            |
| <b>Cuadro 6.</b> Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y materia seca a través de los ambientes de evaluación de poblaciones y cruzas simples realizado en 2017. ....            | 28            |

## Lista de figuras

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Figura 1.</b> Promedio de temperatura y humedad relativa registradas durante el desarrollo del cultivo.....   | 12            |
| <b>Figura 2.</b> Dispersión grafica de la interacción de las poblaciones de maíz y sus cruzas con los caracteres de materia seca y rendimiento de grano..... | 30            |

**Resumen**

**PESO SECO DE PLÁNTULA Y DESARROLLO VEGETATIVO BAJO  
CONDICIONES DE ESTRÉS Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO DE  
GRANO EN MAÍZ**

**POR**

**GREGORIO ANTONIO RAMÍREZ CEH**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DR. FROYLÁN RINCÓN SÁNCHEZ-ASESOR-**

Saltillo, Coahuila

mayo 2019



El cambio climático se ha convertido en un gran problema para la producción agrícola, debido a las variaciones climatológicas presentes en los lugares en donde se produce el maíz, uno de los principales cultivos. Los objetivos del presente trabajo fueron: Analizar la producción de materia seca en las plántulas y el desarrollo vegetativo temprano de nueve poblaciones de maíz en ambientes de cultivo contrastantes, y analizar las interrelaciones de la producción de materia seca con el rendimiento de grano. En material genético consistió en nueve poblaciones de maíz y las cruzas entre ellas. Los genotipos (poblaciones y cruzas) fueron sometidos a ensayos de evaluación en tres etapas: 1) Ensayo de laboratorio para determinar la calidad fisiológica de las semillas bajo condiciones con y sin estrés por salinidad, 2) Ensayo en invernadero para analizar el desarrollo en la etapa temprana, con y sin estrés por salinidad, y 3) Ensayo de evaluación del potencial de rendimiento en campo. En los ensayos establecidos en laboratorio e invernadero, para las condiciones de estrés por salinidad se utilizó una presión osmótica de -1.25 Mpa, usando NaCl como fuente salina. En los ambientes de los ensayos de laboratorio e invernadero, se determinó el peso seco del sistema radical (PSR) y el peso seco de la parte aérea o vástago (PSV); en campo se determinó el rendimiento de grano. Se utilizó un análisis de dispersión grafica para explorar la interacción genotipos x caracteres en ambientes. La variación genética de las poblaciones y cruzas expresada por los caracteres en estudio dan pauta para realizar selección genética. En los ambientes (con y sin estrés por salinidad) en los ensayos en laboratorio, se obtuvo un abatimiento en la respuesta de 49.0 y 60.0 % para PSR y PSV, respectivamente. En general se obtuvo una respuesta positiva de las cruzas con respecto a las poblaciones de 11.0 % en el rendimiento de grano; 4.1 y 6.0 % en el PSR en los ensayos de laboratorio e invernadero, respectivamente, como un indicador de divergencia genética y a los efectos heteróticos promedio entre ellas. Las cruzas superiores en rendimiento de grano también muestran valores superiores del PSR en el promedio de cruzas en los ambientes de evaluación. En los ensayos en invernadero, se encontró relación positiva del PSR y PSV con y sin estrés con el rendimiento de grano. El PSR y PSV bajo condiciones de estrés en invernadero, correlacionaron positivamente

con los datos obtenidos a partir de la calidad fisiológica en laboratorio, pero también, se encontró correlación positiva con el rendimiento de grano, en particular, el PSR con una correlación de  $r=0.308^*$ . Se confirma que existe variación genética entre poblaciones para los caracteres en estudio, la cual se manifiesta en la expresión del potencial de la combinación genética en las cruas. Se puede considerar al peso seco del sistema radical determinado bajo condiciones de estrés por salinidad en invernadero, como indicador con potencial para la selección temprana de genotipos de maíz, que fortalezca las estrategias de mejoramiento genético. El análisis de dispersión gráfica puede ser una herramienta complementaria en el proceso de selección de la respuesta correlacionada, ya que visualmente se analiza la interacción de los genotipos con la combinación de caracteres x ambientes de evaluación.

**Abstract**

**DRY PLANT WEIGHT AND VEGETATIVE DEVELOPMENT  
UNDER STRESS CONDITIONS AND ITS RELATIONSHIP  
WITH MAIZE GRAIN YIELD**

**BY**

**GREGORIO ANTONIO RAMÍREZ CEH**

**MASTER OF SCIENCE IN PLANT BREEDING**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DR. FROYLÁN RINCÓN SÁNCHEZ - ADVISOR -**

Climate change has become a major problem for agricultural production, due to the climatic variations present in the places where corn is produced, one of the main crops. The objectives of this work were: To analyze the production of dry matter in the seedlings and the early vegetative development of nine maize populations in contrasting developing environments, and to analyze the interrelations of dry matter production with grain yield. The genetic material consisted of nine populations of corn and the crosses between them. The genotypes (populations and crosses) were subjected to evaluation trials in three stages: 1) Laboratory test to determine the physiological quality of the seeds under conditions with and without stress by salinity, 2) Greenhouse test to analyze the development in the early stage, with and without stress due to salinity, and 3) Evaluation test of the yield potential in the field. In the laboratory and greenhouse tests, an osmotic pressure of -1.25 Mpa was used for salinity stress conditions, using NaCl as a saline source. In the environments of the laboratory and greenhouse tests, the dry weight of the root system (PSR) and the dry weight of the aerial part or shoot (PSV) were determined; in the field the grain yield was determined. A scatter plot analysis was used to explore the interaction of genotypes x characters in environments. The genetic variation of the populations and crosses expressed by the characters under study give guidelines for genetic selection. In the environments (with and without stress due to salinity) in the laboratory tests, a reduction in the response of 49.0 and 60.0% was obtained for PSR and PSV, respectively. In general, a positive response of the crosses was obtained with respect to the populations of 11.0% in the grain yield; 4.1 and 6.0% in the PSR in the laboratory and greenhouse tests, respectively, as an indicator of genetic divergence and the average heterotic effects between them. Higher crosses in grain yield also show higher PSR values in the average crosses in the evaluation environments. In greenhouse trials, positive PSR and PSV relationship with and without stress was found with grain yield. The PSR and PSV under greenhouse stress conditions correlated positively with the data obtained from the physiological quality in the laboratory, but also, positive correlation was found with the grain yield, as the case of PSR with a correlation of  $r = 0.308^*$ . It is confirmed

that there is genetic variation among populations for the characters under study, which is manifested in the expression of the potential of the genetic combination in the crosses. It is possible to consider the dry weight of the root system determined under salinity stress conditions in the greenhouse, as an indicator with potential for the early selection of maize genotypes, which strengthens breeding strategies. The graphical dispersion analysis can be a complementary tool in the selection process of the correlated response, since the interaction of the genotypes with the combination of characters x evaluation environments is visually analyzed.

## INTRODUCCIÓN

En México, el maíz (*Zea mays* L.), dada a su importancia alimentaria, industrial, cultural y social, así como, por su extensión nacional establecida, es el cultivo agrícola más estudiado. La producción de maíz se desarrolla principalmente bajo condiciones de temporal, en el 2017 la superficie total estimada para este cultivo fue de 7.5 millones de hectáreas, de las cuales el 78.8 %, se desarrolló bajo condiciones de temporal, con un rendimiento promedio general de 3.58 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA-SIAP, 2017).

En el estado de Coahuila, en 2017 se sembraron 30.7 mil hectáreas de maíz, la producción se concentra principalmente en el sureste del estado 27,000 hectáreas, de las cuales el 97.9 % se lleva a cabo principalmente bajo condiciones de temporal con un rendimiento promedio de 0.60 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA-SIAP, 2017). Para la producción de este cereal, se usan en su mayoría poblaciones nativas (criollas).

Actualmente las modificaciones de los factores ambientales se han convertido en un gran problema para la producción agrícola en los lugares donde se producen los principales cultivos. Se espera que el estrés hídrico y el estrés salino se intensifiquen cada vez más con el cambio climático que se presenta de manera global.

Es así como el conocimiento de la diversidad de una especie en un ámbito regional constituye un amplio acervo de genes importantes para su conservación y mejoramiento, pero también, para determinar su potencial genético que permita identificar alelos favorables para generar nuevas variedades adaptadas a condiciones adversas del cultivo en una región determinada.

Una alternativa para mejorar la productividad agrícola regional es identificar poblaciones nativas, que exhiban potencial genético en condiciones desfavorables (de estrés), las cuales se utilizarán como fuente de germoplasma.

La exposición de materiales genéticos a condiciones de salinidad puede ser una alternativa para identificar genotipos que porten alelos con el potencial de reducir el daño causado por este tipo de estrés, y que provoca pérdidas en la producción agrícola a causa de la disminución del crecimiento de plantas, quemaduras en tejido, abscisión foliar y restricción de la absorción de agua por las raíces. Los alelos identificados pueden incluirse en esquemas de selección para mitigar los efectos del cambio climático.

Dadas las condiciones semiáridas del sureste de Coahuila, así como la amplia variación genética del maíz nativo (Rincón *et al.*, 2010), la importancia de las poblaciones nativas en la producción y considerando la presión de la modificación por efecto del cambio climático, se desarrolló el presente estudio para analizar la respuesta de nueve poblaciones nativas de maíz a condiciones de estrés, para determinar el potencial genético en la producción de materia seca en ambientes contrastantes, para lo cual se establecieron los siguientes objetivos:

## **Objetivos**

- Analizar la producción de materia seca en las plántulas y el desarrollo vegetativo temprano de nueve poblaciones de maíz en ambientes de cultivo contrastantes.
- Analizar las interrelaciones de la producción de materia seca con el rendimiento de grano.

## **Hipótesis**

- En la diversidad genética de las poblaciones en estudio, existe una respuesta diferencial en la expresión de la producción de materia seca, la cual puede ser utilizada como criterio de selección en el proceso de mejoramiento genético.



## REVISIÓN DE LITERATURA

### Importancia de maíz

En la actualidad, el maíz es uno de los tres cereales de mayor importancia en el mundo, por la superficie sembrada y su aportación en la alimentación, cultivándose en la mayoría de los continentes excepto en la Antártida y es el cultivo de mayor rendimiento por hectárea. Con relación al trigo y al arroz (FAO, 2017) esto lo convierte en un cereal de gran importancia económica, alimenticia humana y animal, así como un elemento esencial en la producción industrial.

En México, el maíz es el cultivo más estudiado, por ser el alimento básico en la dieta de los mexicanos. El crecimiento y producción del maíz depende del potencial genético de la planta, el cual responde a las condiciones ambientales en las que se desarrolla y al manejo que se le proporciona. En México en el 2017 se sembró 7.5 millones de hectáreas de las cuales, el 78.8 % se sembraron bajo condiciones de temporal con un rendimiento promedio de 3.58 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA-SIAP, 2017).

En Coahuila, en 2017 se sembraron 30.7 mil hectáreas de maíz para grano, con un rendimiento promedio de 1.2 t ha<sup>-1</sup>. La región sureste del estado concentra la mayor superficie sembrada con un estimado de 27.0 mil hectáreas, de las cuales el 97.9 %, se sembró bajo condiciones de temporal o seco obteniendo un rendimiento promedio de 0.6 t ha<sup>-1</sup> (SAGARPA-SIAP, 2017). En el sureste del estado de Coahuila, se reporta la mayor producción de maíz para grano, representada principalmente por poblaciones de variedades nativas. Las poblaciones nativas están agrupadas en siete grupos raciales: Celaya, Cónico Norteño, Elotes Cónicos, Olotillo, Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño (Rincón *et al.*, 2010). El sureste del estado de Coahuila presenta un clima subhúmedo con lluvias escasas durante el año, esta región tiene una precipitación pluvial media

anual de 350 mm, y presenta una temperatura que oscila entre los 18 y 22° C (INEGI, 2018). En esta región la producción de maíz depende principalmente de la precipitación pluvial, y principalmente se usan materiales criollos.

### **Cambio climático**

El cambio climático afecta a la agricultura a través de las modificaciones en la temperatura, la precipitación y las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, Almeida y Paulo (2017) señalan que el 33 % de los suelos irrigados son afectados por este tipo de estrés, y que el proceso de salinización del suelo puede ser acentuado por el cambio climático.

Al cambiar las condiciones climáticas, la soberanía alimentaria se ve amenazada al incidir en los componentes de los sistemas alimentarios a nivel mundial, regional y local (López y Hernández, 2016).

Para contrarrestar los efectos del cambio climático se puede aprovechar la respuesta de genotipos a factores ambientales contrastantes, esto para identificar alelos favorables para introducirlos en el proceso de programas de mejoramiento y producir nuevas variedades adaptadas a diferentes condiciones ambientales (Mercer y Perales, 2010). Por su parte Lobo *et al.* (2003), indican que los patrones de variación genética coinciden con las condiciones climáticas, debiéndose a los procesos de adaptación del germoplasma a los diferentes factores ambientales.

Debido a este problema, el conocimiento de la diversidad genética de una especie en un ámbito regional constituye un amplio reservorio de genes importantes para su conservación y mejoramiento, pero también, para determinar su potencial genético que pudiera mejorar el germoplasma debido a la presencia de alelos útiles aun sin explorar (Castro *et al.*, 2013).

Partiendo de esto, Hellin *et al.* (2014) discuten la posibilidad de que existan poblaciones de maíz nativo que son apropiadas para incluir en las estrategias de

adaptación al cambio climático, en entornos pronosticados con largos periodos de sequía, calor extremo y precipitaciones irregulares en México y América Latina.

La producción agrícola es una de las actividades extremadamente vulnerables al cambio climático. A nivel mundial los principales granos básicos cultivados (maíz, trigo y arroz), presentan las mayores probabilidades de sufrir los efectos del cambio climático (Lobell *et al.*, 2008). En México, debido a las diferentes condiciones de producción del maíz, presenta una alta vulnerabilidad a la variación climática y se prevé impacte de manera significativa en el rendimiento y la calidad del grano (Tinoco-Rueda *et al.*, 2010).

Considerando el clima árido en el estado de Coahuila (García, 1981) y los escenarios climáticos desarrollados en el ámbito mundial, se prevé haya un efecto más agudo en el grado de aridez de la región, lo que tendría como resultado, problemas muy graves en cuanto al desarrollo de los cultivos en la región, esto como consecuencia principalmente de la reducción en las precipitaciones (Mendoza-Hernández *et al.*, 2013).

En relación con lo anterior Lamz y González (2013) indican que la salinización de los suelos es una situación predominante en regiones áridas y semiáridas y aun puede ocurrir regiones con clima trópico seco y templado seco con periodos secos largos. Estos autores también indican que conjuntamente a las condiciones adversas climáticas, se deben considerar otros factores, en la ocurrencia de salinidad, como son las aguas salinas subterráneas y la cercanía a minas y bóvedas salinas, factores presentes en el estado de Coahuila.

## **Respuesta ambiental y adaptación de maíz**

La respuesta diferencial de una característica de un genotipo en diferentes condiciones ambientales se encuentra influenciada gravemente por otras características que permiten expresar su potencial genético. Esperando que los genotipos que son tolerantes al estrés abiótico y biótico presenten características mejoradas y asociadas para exhibir un potencial genético aceptable en diferentes condiciones ambientales (Tollenaar y Lee, 2002).

En un estudio realizado por Ruíz *et al.* (2008), indican que el maíz presenta una amplia adaptación y potencial de producción a los diferentes ambientes en donde a través de los años se ha desarrollado y resaltan que la raza que presenta mayor diversidad de adaptación y mayor expresión de producción en las condiciones ambientales de desarrollo es la raza Tuxpeño.

Por su parte Mayer *et al.* (2016), con el propósito de conocer la influencia de las altas temperaturas en la composición química de grano de maíz, sometieron cuatro diferentes híbridos con diferente tipo de grano (cristalino, reventador, semi-dentado templado y semi-dentado tropical) a temperaturas mayores de 35° C durante el llenado de grano; encontraron que los híbridos de grano cristalino y reventadores tienden a ser menos vulnerables a los efectos generados por las altas temperaturas en la concentración de proteínas.

## **Divergencia genética**

La expresión de heterosis se encuentra estrictamente ligada a la diversidad genética de los progenitores, la cual se manifiesta en la superioridad en el rendimiento de la progenie de diversos progenitores de una especie. Entre más efecto heterótico exhiba una craza, en los progenitores existe una alta divergencia genética; en contraste, si la craza exhibe valores bajos o nulos de heterosis se puede considerar que los progenitores involucrados no muestran

diversidad genética o pudieran estar emparentados (Hallauer *et al.*, 2010). Por su parte, Birchler *et al.* (2010) indican que este fenómeno también se presenta en características como producción de biomasa, velocidad de desarrollo y fertilidad.

Las combinaciones híbridas de mayor rendimiento han sido desarrolladas a partir de genotipos seleccionados de manera artificial para genes aditivos, dominantes y epistáticos favorables. Reif *et al.* (2005), revisan las diferentes hipótesis sobre las causas del fenómeno de heterosis, estos autores sugieren que la mayor expresión de este fenómeno proviene de combinación de genotipos que provienen de diferentes grupos heteróticos, lo cual está asociado a la acción de un gen sobredominante en muchos loci.

En su investigación realizada, Hochholdinger y Baldauf (2018), mencionan que la superioridad en una combinación genética está influenciada en gran medida por el grupo heterótico al que pertenece, encontrando mayor heterosis en combinaciones intergrupales que los intragrupalas.

En los programas de mejoramiento genético enfocado a explotar la heterosis de los cultivos, el éxito está determinado en gran parte por las fuentes de germoplasma que se emplean en la generación de líneas parentales, esto permite incorporar germoplasma de diferente región, templado en tropical (Balderrama *et al.*, 2016), sin perder la adaptación y explotando el vigor híbrido de las poblaciones de diferente origen.

### **Selección bajo condiciones de estrés**

De acuerdo con Torabi y Halim (2013), existe una diferente respuesta al efecto de salinidad en diferentes variedades y genotipos. Los ensayos de estrés por salinidad se han centrado en analizar la respuesta de los genotipos para seleccionar materiales tolerantes a condiciones ambientales no favorables para el desarrollo de los cultivos (Hoffman *et al.*, 1983).

Layne-Garsaball *et al.* (2008) evaluaron diferentes tamaños de semillas de dos genotipos de maíz bajo condiciones de salinidad en laboratorio, evaluando germinación y crecimiento a los 12 días después de la siembra; encontraron que el mayor crecimiento de las plántulas se presentó en semillas grandes, esto indica que el tamaño de la semilla influye en gran medida en el establecimiento del cultivo, pero también la evaluación en etapas tempranas de desarrollo son elementales para seleccionar genotipos tolerantes a condiciones de crecimiento adversas.

La selección simultánea a través de condiciones con y sin estrés en conjunto con la variación genética que existe en las especies estudiadas, proporcionan las bases para el desarrollo de nuevas variedades que aportan genes de resistencia a factores bióticos y abióticos por la plasticidad de los ecosistemas donde se desarrollan (Lamz y González, 2013).

En los programas de mejoramiento de maíz con un enfoque en ambientes de estrés, los rasgos evaluados a través de la calidad fisiológica de semillas son de gran importancia para los investigadores, debido a que permiten clasificar de manera eficaz y temprana a los genotipos que presentan diferentes grados de tolerancia (De Abreu *et al.*, 2018). Por otra parte, Nawaz *et al.* (2010) mencionan que el estrés por salinidad afecta toda la fisiología de la planta a nivel celular, a través de ajustes osmóticos y iónicos que resultan en una reducción en la producción de biomasa. Y el efecto adverso se observa en todos los estados de desarrollo, incluyendo la germinación, plántula y en las etapas vegetativa, reproductiva y de madurez. Sin embargo, la tolerancia a estrés salino varía entre especies.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético

El material genético consistió de nueve poblaciones de maíz nativo (Cuadro 1), adaptadas a las condiciones del sureste de Coahuila, y las cruzas simples entre ellas. Las poblaciones fueron identificadas considerando el potencial de rendimiento, y que representaran a los grupos raciales en la región de estudio (Espinoza-Tamayo *et al.*, 2016).

**Cuadro 1.** Clasificación racial y procedencia de las poblaciones nativas involucradas en el estudio.

| Entrada | Grupo racial    | Municipio      | Localidad               | Altitud (msnm) |
|---------|-----------------|----------------|-------------------------|----------------|
| 1       | Cónico Norteño  | Saltillo       | El Jagüey De Ferniza    | 2100           |
| 2       | Cónico Norteño  | Arteaga        | Chapultepec             | 2013           |
| 3       | Celaya          | General Cepeda | Porvenir de Tacubaya    | 1556           |
| 4       | Ratón           | General Cepeda | Porvenir de Tacubaya    | 1556           |
| 5       | Tuxpeño norteño | General Cepeda | El Gavillero            | 1398           |
| 6       | Ratón           | Parras         | Siete de Enero          | 1506           |
| 7       | Ratón           | Arteaga        | Nuncio                  | 1705           |
| 8       | Tuxpeño         | Ramos Arizpe   | San Martín de las Vacas | 1702           |
| 9       | Tuxpeño         | Arteaga        | El Arbolito             | 1468           |

La generación de cruzas directas se realizó a través de polinizaciones controladas, en el ciclo Primavera-Verano (P-V) 2016, en la localidad El Mezquite, Galeana, Nuevo León. Las cruzas entre las nueve poblaciones y el incremento de las mismas a través de cruzas fraternales dieron un total de 45 genotipos experimentales.

### Ambientes de evaluación

El estudio se desarrolló en tres etapas: I) En invernadero, en dos ambientes, bajo condiciones con y sin estrés por salinidad, II) Ensayo de laboratorio para determinar la calidad fisiológica de las semillas bajo condiciones con y sin estrés por salinidad, y III) Evaluación de los genotipos en campo, en dos localidades contrastantes en relación a las condiciones ambientales, ambas en el sureste del estado de Coahuila.

## **Diseño experimental**

La evaluación de los genotipos se realizó durante el ciclo Primavera-Verano (P-V) 2017. Se utilizó un diseño experimental de bloques incompletos con un arreglo alfa látice (0,1) (Barreto *et al.*, 1997), con cuatro repeticiones en ensayos en invernadero y tres en laboratorio y campo. En los ensayos de invernadero y laboratorio, los experimentos fueron establecidos en dos condiciones de desarrollo (con y sin estrés por salinidad); para el ambiente de estrés se utilizó una presión osmótica de  $-1.25 \text{ Mpa}^1$ , condiciones previamente determinadas por García (2016), utilizando cloruro de sodio (NaCl) como fuente salina, y usando agua destilada para la condición de sin estrés. En la evaluación realizada en campo, los genotipos fueron establecidos bajo el mismo diseño experimental.

### **I. Ensayo en invernadero**

El ensayo fue establecido en el invernadero número dos del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. El invernadero cuenta con control pasivo de la temperatura, la cual fue registrada cada cuatro horas durante el desarrollo del experimento, con un promedio diario de  $31.0 \text{ }^\circ\text{C}$  durante el día y  $18.3 \text{ }^\circ\text{C}$  por la noche. La evaluación se llevó a cabo durante cinco semanas, a partir de la fecha de siembra. Se utilizaron cuatro repeticiones establecidas en diferentes fechas de siembra; la unidad experimental estuvo representada por una planta de cada genotipo.

### **Siembra**

Se realizó en macetas de polietileno negro de 1 L de alto calibre utilizando un sustrato a base de una mezcla de Perlita (Hortiperl), Vermiculita (Vermilita) y Peat Moss (Peat-Moss Tourbe) en una proporción 1:1:2 respectivamente. Se depositaron dos semillas por maceta de cada genotipo a tres centímetros de profundidad. Posteriormente, a la emergencia y establecimiento del cultivo, una plántula fue removida para dejar la unidad experimental de una planta.

<sup>1</sup> García. L., J. I. 2016. Estudio de diferentes niveles de salinidad en la germinación, vigor y procesos fisiológicos en la variedad criolla mejorada de maíz Jaguan. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.



## Riegos y manejo del cultivo

Estuvieron constituidos en condiciones de estrés por la solución salina y en condiciones de no estrés por la aplicación de agua destilada. La cantidad de solución salina como de agua destilada, fue de 100 ml aplicada a cada una de las unidades experimentales en la evaluación. Los riegos fueron aplicados una vez por semana durante el periodo que duró el experimento, para mantener la humedad de las macetas. Debido a las condiciones del invernadero dónde se realizó el experimento, se efectuaron aplicaciones de insecticida AGROCIN 20 C.E. (Cipermetrina) para proteger al cultivo del ataque de plagas. En el invernadero no hubo control de la temperatura, pero fueron registradas diariamente, utilizando un sensor marca ONSET HOBO. La temperatura durante el desarrollo del cultivo en los periodos diurnos durante el desarrollo del experimento registró un promedio de 31.2 °C y una humedad relativa de 48.8 %. Por su parte la temperatura nocturna registrada presentó un promedio de 18.3°C y humedad relativa de 77.9 % (Figura 1).

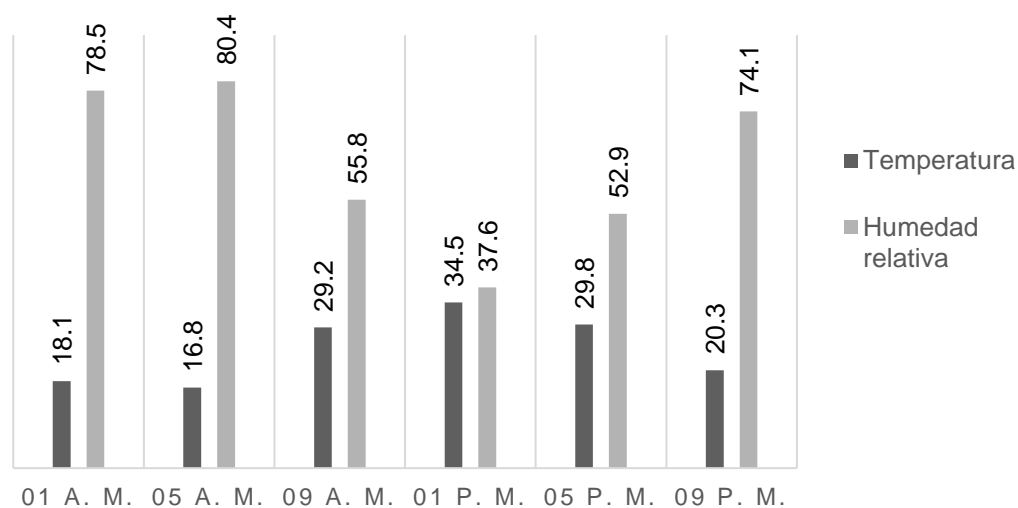


Figura 1. Promedio de temperatura y humedad relativa registradas durante el desarrollo del cultivo

## **Cosecha y variables medidas**

Una vez transcurrido el periodo de evaluación, las plantas de cada unidad experimental de los ambientes de evaluación fueron extraídas de las macetas con cuidado, obteniendo las secciones del sistema radical y la parte aérea (Vástago). Posteriormente fueron sometidas al secado a través del método de la estufa para obtener el peso seco del sistema radical (PSR) y preso seco de vástago (PSV). Las muestras fueron depositadas en bolsas de papel previamente identificadas, para su secado en una estufa a 70° C por 48 horas. Una vez transcurrido el tiempo se pesaron en una balanza analítica y el resultado fue expresado en mg planta<sup>-1</sup>.

## **II. Ensayo de laboratorio**

La evaluación se llevó acabo en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo de Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. En este estudio se utilizó la prueba de germinación estándar de acuerdo con las recomendaciones establecidas por el ISTA (2009), con algunas modificaciones en cuanto al número de repeticiones y el número de semillas evaluadas, esto debido a que, en algunas cruza, la semilla obtenida no fue suficiente. Para este estudio la unidad experimental consistió de 25 semillas por repetición.

### **Siembra**

La siembra se realizó colocando 25 semillas entre papel Anchor, el cual fue humedecido con la solución salina para el ambiente de estrés y con agua destilada para el ambiente sin estrés. Posteriormente se enrolló en forma de taco y se acomodó de acuerdo al número de identificación, en bolsas de polietileno, y fueron acomodados dentro de una canastilla, dentro de una cámara de crecimiento Lab-Line a una temperatura de 25 ± 1° C por siete días.

### **Variables evaluadas**

A los siete días, las plántulas de cada unidad experimental fueron evaluadas; se consideró como plántula normal, aquellas que desarrollaron su sistema radical y vástago, con una longitud igual o superior a 3 cm. Una vez seleccionadas las plántulas normales, se separó el vástago y la raíz y se colocaron en bolsas de papel identificadas con el número de parcela para posteriormente someterlas a secado a la estufa por 24 horas a 70 °C. Una vez transcurrido el tiempo, cada una de las partes de las plántulas se pesaron en una balanza analítica y el dato resultante se reportó en mg planta<sup>-1</sup>.

### **III. Ensayo de campo**

Para la evaluación del material experimental, se utilizaron dos localidades contrastantes en las condiciones ambientales en el sureste de Coahuila: El Mezquite, Galeana, N. L. ubicado geográficamente a 9 km de los límites de Arteaga, Coah., en las coordenadas 25° 05' Latitud Norte y 100° 42' Longitud Oeste, a una altura de 1850 m y Rancho Nuevo, Ramos Arizpe, Coah. localizado en las coordenadas 25° 72' Latitud Norte y 101° 00' Longitud Oeste y una altitud de 1473 m (Georreferenciación). Las evaluaciones se llevaron a cabo bajo condiciones de riego. En estos ensayos la unidad experimental estuvo constituida por un surco de cuatro metros, donde se sembraron 30 semillas espaciadas a 20 cm, para posteriormente a clarear y dejar 21 plantas por parcela, la distancia entre surcos fue de 85 cm en ambas localidades.

#### **Siembra**

Las fechas de siembra en la localidad de El Mezquite fue de 6 de mayo y en Rancho Nuevo fue el 10 de junio del 2017. Cabe mencionar que en El Mezquite se sembró en húmedo, en contraste con Rancho Nuevo, donde la siembra fue en seco. En ambas localidades se utilizó una dosis de fertilización de 120-60-60.

Se aplicó el 50 % de Nitrógeno y el 100 % de Fósforo y Potasio al momento de la siembra; el complemento del Nitrógeno se aplicó al momento del cultivo. Como fuentes de N-P-K se usaron triple 17 (17-17-17) y urea (46-00-00).

### **Labores culturales**

Las labores culturales y el manejo agronómico del cultivo fueron realizados de acuerdo a las necesidades del cultivo en cada localidad de estudio.

### **Riegos**

El número de riegos estuvo en función de las necesidades del cultivo, así como de las condiciones meteorológicas de cada localidad.

### **Cosecha y variable que considerar**

La característica agronómica que se consideró de mayor importancia en esta evaluación fue el rendimiento de grano expresado en  $t\ ha^{-1}$  al 15 % de contenido de humedad del grano. Cabe mencionar que para el cálculo de este valor se estimó utilizando una muestra para determinar el porcentaje de desgrane y considerando las siguientes formulas:

Para estimar el peso seco (PS) se multiplicó el peso de campo del grano por la fracción complementaria al contenido de humedad en la unidad experimental:

$$PS = PC \times [1 - (HUM / 100)]$$

Posteriormente, el PS fue multiplicado por un factor de conversión (FC) para estimar el rendimiento de grano en  $t\ ha^{-1}$ , al 15 % de humedad, de la siguiente manera:

$$FC = [(100 / 85) \times (10,000 / APU)] / 1,000$$

Dónde:

APU (Área de parcela útil), fue determinada mediante la distancia entre surcos por la distancia del surco (4 m x 0.85 m); 100/85, coeficiente para obtener el rendimiento al 15 % de contenido de humedad del grano; 1,000, es un valor, constante usado para calcular el rendimiento en t ha<sup>-1</sup>; 10,000, es la superficie de una hectárea en m<sup>2</sup>.

### **Análisis de la información**

Con la información obtenida de los 45 genotipos, se realizó un análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental en cada uno de los ensayos, usando el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute, 2004). Se realizó la descomposición de la suma de cuadrados de los genotipos en poblaciones, cruza y poblaciones vs cruza. Las fuentes de variación Ambientes, Genotipos y la interacción Genotipo x Ambiente fueron considerados como efectos fijos, el resto de los efectos como aleatorios. Para identificar genotipos sobresalientes en cada caso, se calculó un valor de decisión determinado por la media más uno y dos veces el error estándar ( $\mu + \varepsilon$ ;  $\mu + 2\varepsilon$ ).

### **Cálculo de la heterosis**

En cada una de las características en estudio, se computó el valor de heterosis ( $h$ ) entre pares de poblaciones ( $y_{ii}$ ,  $y_{jj}$ ) con base en el comportamiento de las cruza ( $y_{ij}$ ) sustrayendo el comportamiento promedio de los progenitores de la siguiente manera:  $h = y_{ij} - 0.5 * (y_{ii} + y_{jj})$  de acuerdo con Stalder y Saxton, (2004).

### **Análisis de correlación**

Se realizó un análisis de correlación simple de Pearson ( $r$ ) entre las características estudiadas con el promedio de los 45 genotipos en los ensayos y ambientes de evaluación. Este análisis se realizó con el objetivo de conocer las interrelaciones entre los caracteres evaluados, utilizando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{COV_{XY}}{\sqrt{\sigma^2x} \sqrt{\sigma^2y}}$$

Dónde:

$r$  = Coeficiente de correlación entre los caracteres X e Y;  $COV_{XY}$  = la covarianza fenotípica entre los caracteres X e Y;  $\sqrt{\sigma^2x}$  y  $\sqrt{\sigma^2y}$  = la raíz cuadrada de las varianzas fenotípicas de los caracteres X e Y, respectivamente.

### **Interacción genotipos por caracteres**

Para conocer la interacción de las cruzas y poblaciones a través de las diferentes características medidas en el ensayo de evaluación, se realizó un análisis de dispersión gráfica basado en el análisis de componentes principales (ACP) con el modelo GGEbiplot (Yan y Kang, 2003).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de varianza

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este trabajo, así como para la comprobación de hipótesis, en esta sección se presentan los resultados realizados para tres variables: pesos secos de raíz y de vástago (PSR y PSV) en laboratorio e invernadero y Rendimiento (REND), obtenidos en dos ambientes de evaluación. Esta información proviene de tres diferentes ensayos realizados en laboratorio, invernadero y campo, con 36 cruzas directas y nueve poblaciones de maíz, utilizadas como progenitores.

En esta sección, se aborda el análisis de varianza (ANVA) que comprende los genotipos evaluados, y de esta forma dar una explicación general del comportamiento biológico del material evaluado en esta investigación. En el (Cuadro 2) se presentan los cuadrados medios y la significancia de las diferencias de los componentes de cada fuente de variación, que presentaron las variables evaluadas.

**Cuadro 2.** Cuadrados medios del análisis de varianza de la producción de materia seca en ensayos de laboratorio e invernadero y rendimiento de grano en campo realizados en el 2017.

| F.V.                      | Ensayo en Laboratorio |             |             | Ensayo en Invernadero |               |                | gl  | REND<br>(t ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|---------------|----------------|-----|-------------------------------|
|                           | gl                    | PSR<br>(mg) | PSV<br>(mg) | gl                    | PSR<br>(mg)   | PSV<br>(mg)    |     |                               |
| <b>Ambientes (Amb)</b>    | 1                     | 17,897.0 ** | 72,952.4 ** | 1                     | 40,960.3      | 9,635,274.3    | 1   | 2,625.8 **                    |
| <b>Repeticiones (Rep)</b> | 2                     | 236.4       | 572.6       | 3                     | 1,387,794.3 * | 14,253,430.4 * | 4 † | 13.5 **                       |
| <b>Amb x Rep</b>          | 2                     | 139.5       | 88.0        | 3                     | 20,656.9      | 1,064,103.2 *  |     |                               |
| <b>Genotipos (Gen)</b>    | 44                    | 77.1 *      | 39.2        | 44                    | 24,497.1 **   | 393,311.0      | 44  | 3.3 **                        |
| Poblaciones (Pob)         | 8                     | 67.9        | 29.8        | 8                     | 10,247.7      | 145,251.8      | 8   | 1.6                           |
| Cruzas                    | 35                    | 80.3 *      | 41.9        | 35                    | 27,497.4 **   | 432,155.8      | 35  | 3.3 **                        |
| Pob vs Cruzas             | 1                     | 33.8        | 18.0        | 1                     | 33,608.7      | 1,028,786.9    | 1   | 19.3 **                       |
| <b>Gen x Amb</b>          | 44                    | 47.3        | 45.7 *      | 44                    | 14,617.4      | 280,724.1      | 44  | 1.6                           |
| Pob x Amb                 | 8                     | 46.0        | 74.7 *      | 8                     | 22,225.0      | 180,661.4      | 8   | 2.4                           |
| Cruzas x Amb              | 35                    | 47.7        | 38.4        | 35                    | 13,180.8      | 280,194.5      | 35  | 1.5                           |
| (Pob vs Cruzas) x Amb     | 1                     | 43.7        | 69.4        | 1                     | 4,938.8       | 1,066,809.3    | 1   | 0.7                           |
| <b>Error</b>              | 173                   | 52.8        | 32.1        | 262                   | 14,554.1      | 324,853.4      | 173 | 1.5                           |
| <b>C.V. (%)</b>           |                       | 28.7        | 14.6        |                       | 30.8          | 24.1           |     | 22.7                          |

\*, \*\*, Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; F. V.= Fuente de variación; gl= Grados de libertad; PSR= Peso seco de raíz, PSV= Peso seco de vástago, REND= Rendimiento de grano; † = En ensayos de campo, las repeticiones están anidados dentro de ambientes.



Los resultados muestran diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) entre ambientes (Amb) de evaluación, sólo en el PSR y PSV en los ensayos de laboratorio, y para y para el rendimiento de grano (REND). En los ensayos de invernadero no se encontraron diferencias significativas. Lo anterior puede explicarse considerando la variación ambiental debido a las condiciones de estrés y el testigo en cada uno de los ensayos de evaluación.

En lo que respecta a Genotipos, se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) para la variable peso seco de raíz en el ensayo de invernadero y rendimiento de grano en campo; mientras que para las variables peso seco de raíz en laboratorio, las diferencias estadísticas fueron al  $P \leq 0.05$  de probabilidad. Las poblaciones son genéticamente diferentes ya que provienen de diferente grupo racial y adaptadas a diferentes ambientes (Cuadro 1). La diferencia entre genotipos se debe básicamente a la variación que presentan las cruzas. Las cruzas expresaron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) para las variables PSR en el ensayo en invernadero y para REND en campo; la variable PSR en el ensayo en laboratorio presentó diferencias al 0.05 de probabilidad. Estas diferencias encontradas entre las cruzas pueden deberse a una respuesta heterótica de los genotipos, que a lo largo del tiempo han sido desarrollados y adaptados a diferentes condiciones ambientales (Reif *et al.*, 2005).

Es importante señalar que para la interacción Genotipos x Ambientes (Gen x Amb) no se encontraron diferencias estadísticas para la mayoría de las variables de evaluación; esto indica que el orden que exhibieron los genotipos en los diferentes ensayos a través de los diferentes ambientes fue muy similar. Sin embargo, para la variable peso seco de vástago en el ensayo en laboratorio se encontró diferencias estadísticas ( $P \leq 0.05$ ), lo cual indica que en esta variable si hubo respuesta de las poblaciones a los diferentes ambientes evaluados en los ensayos de laboratorio.

Las diferencias obtenidas entre las cruzas indican la amplia variación genética presente en las poblaciones en estudio, la cual permitirá identificar cruzas que se desarrollen de manera positiva a diferentes condiciones de desarrollo. Esta respuesta pudiera deberse a una característica multigénica y regulada en gran medida por efectos de los loci de cientos de genes que controlan las respuestas fisiológicas y morfológicas de las plantas (Hu y Xiong, 2014).

Los resultados promedio de los ambientes de evaluación de los ensayos de laboratorio, invernadero y campo se presentan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Medias de los ambientes de evaluación de los genotipos y sus cruzas realizados en 2017.

| Ensayo en Laboratorio |                           |             | Ensayo en Invernadero |             |             | Ambiente    | REND<br>(t ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Ambientes             | PSR<br>(mg)               | PSV<br>(mg) | Ambientes             | PSR<br>(mg) | PSV<br>(mg) |             |                               |
| Testigo               | 33.47 a †                 | 55.37 a     | Testigo               | 402.88 a    | 2,529.70 a  | El Mezquite | 8.43                          |
| Estrés                | 17.01 b                   | 22.19 b     | Estrés                | 381.24 a    | 2,200.60 a  |             |                               |
|                       | <b>Tukey<br/>(α=0.05)</b> |             |                       | 48.35       | 347.02      |             |                               |

† Valores con la misma letra en la columna no son estadísticamente diferentes; REND = Rendimiento de grano; PSR y PSV = Peso seco del sistema radical y vástago, respectivamente.

En el caso de los ambientes de evaluación en los ensayos en laboratorio, se encontró un abatimiento en la respuesta de 49.0 y 60.0 % para el peso seco de raíz (PSR) y peso seco de vástago (PSV), respectivamente, lo cual se debe a los efectos del estrés por salinidad con respecto al testigo, este último, se desarrolló bajo condiciones normales. En los ensayos de invernadero, aun cuando numéricamente existe una diferencia entre las condiciones de estrés con respecto al testigo, estas diferencias no son estadísticamente de consideración, con una reducción de 5.0 y 13.0 % para el PSR y PSV, respectivamente.

### **Potencial de rendimiento de genotipos**

Las medias de rendimiento de grano y el peso seco de las poblaciones y de las mejores 20 Cruzas en los ambientes de evaluación se presentan en el Cuadro 4. En el Cuadro 4 se presentan las mejores 20 cruzas identificadas por su potencial de rendimiento promedio a través de los ensayos de evaluación, también se presenta el promedio de los progenitores (poblaciones) involucrados en el estudio.

Las poblaciones son diferentes en su constitución genética y lugar de procedencia (Cuadro 1), sin embargo, no se encontraron diferencias debido en parte a la comparación en los ambientes (estrés y testigo) en laboratorio e invernadero (Cuadro 2). En campo, además de las diferentes condiciones ambientales, a la adaptación de las poblaciones.

Al comparar el comportamiento promedio de las cruzas en las poblaciones, con excepciones en el PSV en el ensayo en laboratorio, donde se obtuvo una reducción de 1.3 % en el resto de los casos, se obtuvo una respuesta positiva de las cruzas de 11.0 % en el rendimiento de grano; 4.1 y 6.0 % en el PSR en los ensayos de laboratorio e invernadero, respectivamente. De las nueve cruzas superiores (Cuadro 3) las poblaciones 9T y 7R sugieren una aptitud combinatoria general positiva, al aparecer en cinco y cuatro cruzas respectivamente, como un indicador de divergencia genética y a los efectos heteróticos promedio entre ellas (Reif *et al.*, 2005).

**Cuadro 4.** Rendimiento promedio de grano y materia seca en laboratorio e invernadero de poblaciones de maíz y las mejores 20 cruzas evaluadas en 2017.

| Genotipos            | REND<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | Ensayo en Laboratorio |             | Ensayo en Invernadero |                |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|----------------|
|                      |                               | PSR<br>(mg)           | PSV<br>(mg) | PSR<br>(mg)           | PSV<br>(mg)    |
| 8T†                  | 5.63                          | 26.4                  | 37.4        | 432.6                 | 2,264.2        |
| 3C                   | 5.29                          | 27.2                  | 40.4        | 371.2                 | 2,303.1        |
| 6R                   | 5.19                          | 25.8                  | 42.0*       | 333.3                 | 2,436.6        |
| 7R                   | 5.19                          | 23.9                  | 43.1*       | 375.7                 | 2,343.6        |
| 9T                   | 4.75                          | 17.6                  | 37.6        | 350.8                 | 2,295.6        |
| 4R                   | 4.63                          | 25.2                  | 38.1        | 434.6                 | 2,341.8        |
| 2CN                  | 4.62                          | 28.9*                 | 36.5        | 317.7                 | 2,146.5        |
| 5TN                  | 4.54                          | 21.3                  | 38.4        | 380.8                 | 1,960.6        |
| 1CN                  | 4.27                          | 24.3                  | 40.1        | 377.6                 | 2,269.8        |
| <b>Medias</b>        | <b>4.90</b>                   | <b>24.5</b>           | <b>39.3</b> | <b>374.9</b>          | <b>2,262.4</b> |
| 5x7                  | 7.13**                        | 19.7                  | 37.0        | 423.9                 | 2,225.6        |
| 6x9                  | 7.02**                        | 22.8                  | 45.0**      | 349.7                 | 2,241.2        |
| 8x9                  | 6.25*                         | 27.6                  | 39.8        | 454.7                 | 2,635.6        |
| 4x9                  | 6.25*                         | 18.7                  | 34.2        | 385.6                 | 2,087.2        |
| 7x9                  | 6.17*                         | 34.5**                | 41.4        | 573.2**               | 2,823.1*       |
| 3x7                  | 6.02*                         | 22.7                  | 35.0        | 446.4                 | 2,219.7        |
| 4x7                  | 5.99*                         | 28.3                  | 42.1*       | 440.2                 | 2,599.9        |
| 3x9                  | 5.96*                         | 31.4**                | 42.6*       | 410.0                 | 2,539.8        |
| 5x6                  | 5.88*                         | 25.7                  | 39.3        | 373.0                 | 2,458.7        |
| 3x8                  | 5.85                          | 27.4                  | 38.8        | 405.5                 | 2,623.1        |
| 2x7                  | 5.81                          | 25.9                  | 38.8        | 355.3                 | 2,260.8        |
| 4x6                  | 5.79                          | 26.0                  | 35.4        | 373.8                 | 2,614.8        |
| 1x7                  | 5.77                          | 24.3                  | 38.0        | 330.4                 | 2,453.5        |
| 7x8                  | 5.74                          | 21.8                  | 37.2        | 375.9                 | 2,462.7        |
| 5x9                  | 5.74                          | 26.3                  | 46.5**      | 476.4*                | 2,573.2        |
| 6x7                  | 5.65                          | 27.1                  | 43.3*       | 463.5                 | 2,440.8        |
| 4x8                  | 5.63                          | 28.4*                 | 37.7        | 322.0                 | 2,111.6        |
| 5x8                  | 5.43                          | 21.6                  | 41.5        | 459.8                 | 2,563.8        |
| 2x8                  | 5.39                          | 24.7                  | 37.3        | 446.8                 | 2,330.8        |
| 1x9                  | 5.38                          | 22.1                  | 37.6        | 411.9                 | 2,652.6*       |
| <b>Medias</b>        | <b>5.44</b>                   | <b>25.5</b>           | <b>38.8</b> | <b>397.2</b>          | <b>2,393.5</b> |
| <b>Media general</b> | <b>5.33</b>                   | <b>25.3</b>           | <b>38.9</b> | <b>392.4</b>          | <b>2365.0</b>  |
| <b>EE</b>            | <b>0.54</b>                   | <b>3.1</b>            | <b>2.7</b>  | <b>75.2</b>           | <b>281.9</b>   |

\*, \*\*, selección con base  $\mu+EE$  y  $\mu+2EE$ , respectivamente; † El primer dígito indica el número de población y la letra la identificación de raza: C= Celaya, CN= Cónico Norteño, R= Ratón, T= Tuxpeño y TN= Tuxpeño Norteño; REND= Rendimiento de grano; PSR= Peso seco de raíz; PSV= Peso seco de vástago; EE= Error estándar de la media.

La cruce 7R x 9T con rendimiento de grano sobresaliente (Cuadro 4) también obtuvo valores significativos en PSR en los ensayos de laboratorio e invernadero. En general, las cruces superiores en rendimiento de grano también muestran valores superiores en PSR en el promedio de cruces en los ambientes de evaluación. La identificación de combinaciones genéticas superiores en los caracteres de interés puede ser incluidas en esquemas de mejoramiento para incorporar alelos favorables complementarios al rendimiento de grano (Cossa *et al.*, 1990; Mercer y Perales, 2010).

### **Análisis de la heterosis**

Para la estimación de este efecto, se usó los valores promedios de los genotipos en cada uno de los ambientes en los diferentes ensayos y así analizar la respuesta de las cruces con respecto a sus progenitores (Cuadro 5).

En la evaluación en campo, los valores obtenidos en la localidad de El Mezquite permitieron identificar a las cruces: 6x9, 4x9, 8x9 y 3x9, con valores superiores y significativos ( $P \leq 0.05$ ), mientras que los valores obtenidos en la localidad de Ramos Arizpe se identificaron a las cruces 6x9 y 5x7 las cuales presentaron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$  y  $P \leq 0.01$ ), respectivamente.

La magnitud de los valores de la heterosis que exhibe una combinación híbrida depende en gran parte de la divergencia genética y, por lo tanto, la manifestación del vigor híbrido en los caracteres de interés (Hallauer *et al.*, 2010; Hochholdinger y Baldauf, 2018). La importancia de las poblaciones 7R y 9T identificadas en el Cuadro 4, manifiestan un comportamiento significativo en los valores de la heterosis promedio (Cuadro 4), y al analizar las cruces sobresalientes, en ocho y cinco de estas intervienen las poblaciones 9T y 7R, respectivamente.

**Cuadro 5.** Heterosis promedio de poblaciones de maíz y sus cruzas seleccionadas en rendimiento de grano y materia seca evaluadas en 2017.

| GEN             | REN_MEZ            | REN_RA             | Ensayo en Laboratorio |                    |                     |                     | Ensayo en Invernadero |                    |                     |        |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|--------|
|                 |                    |                    | PSR_E                 | PSV_E              | PSR_T               | PSV_T               | PSR_E                 | PSV_E              | PSR_T               | PSV_T  |
| 9T <sup>†</sup> | 1.64 <sup>**</sup> | 0.54               | 0.58                  | -2.57              | 5.41 <sup>‡</sup>   | 4.82 <sup>*</sup>   | 59.3                  | 394.0 <sup>‡</sup> | 46.7                | -17.7  |
| 7R              | 0.94 <sup>*</sup>  | 0.99 <sup>*</sup>  | -0.68                 | -0.69              | 2.35                | -3.34               | 34.6                  | 199.0              | 58.0                | 44.9   |
| 6R              | 0.88               | 0.21               | 0.66                  | -2.98              | 0.71                | -0.72               | 41.3                  | 226.9              | 37.9                | -65.7  |
| 4R              | 0.86               | 0.14               | 1.27                  | -2.46              | 0.63                | 1.32                | 0.8                   | 190.8              | -33.4               | -136.8 |
| 2CN             | 0.59               | 0.24               | 0.70                  | 0.28               | -2.75               | -1.25               | 18.7                  | 206.6              | 13.3                | 27.6   |
| 3C              | 0.46               | 0.52               | 0.56                  | -2.08              | 2.36                | 0.50                | 33.1                  | 154.7              | 51.5                | 194.0  |
| 8T              | 0.45               | 0.26               | -2.11                 | -1.86              | 1.68                | 1.44                | 57.8                  | 275.7              | -36.7               | -5.4   |
| 5TN             | 0.38               | 1.17 <sup>**</sup> | -0.84                 | -0.12              | 1.32                | 3.58                | -14.9                 | 207.0              | 38.5                | 156.6  |
| 1CN             | 0.29               | 0.03               | -1.34                 | -2.51              | 3.12                | -1.71               | 23.2                  | 288.3              | -55.9               | -217.2 |
| 6x9             | 2.22 <sup>*</sup>  | 1.87 <sup>*</sup>  | 3.97                  | -4.93              | -2.99               | 7.83                | 14.3                  | 115.5              | 1.0                 | -365.4 |
| 4x9             | 2.20 <sup>*</sup>  | 0.92               | -2.24                 | -6.65              | -3.18               | -0.65               | -65.3                 | -253.4             | 59.5                | -191.5 |
| 8x9             | 2.17 <sup>*</sup>  | -0.05              | 0.16                  | -4.33              | 11.01 <sup>‡</sup>  | 8.75 <sup>‡</sup>   | 156.6                 | 740.3 <sup>‡</sup> | -30.7               | -28.8  |
| 3x9             | 2.02 <sup>*</sup>  | 0.44               | 4.44                  | -2.06              | 13.59 <sup>*</sup>  | 9.17 <sup>‡</sup>   | 59.5                  | 219.4              | 38.6                | 261.4  |
| 4x7             | 1.89               | 0.27               | 2.98                  | 1.22               | 4.56                | 1.88                | -12.4                 | 333.1              | 90.9                | 199.5  |
| 2x9             | 1.82               | -0.25              | -2.84                 | -1.69              | -11.41              | -1.78               | -38.3                 | 343.8              | 9.9                 | -62.3  |
| 1x9             | 1.72               | 0.02               | -6.61                 | -4.08              | 8.89                | 1.57                | 103.7                 | 900.2 <sup>*</sup> | -8.3                | -160.3 |
| 2x6             | 1.60               | -0.50              | 4.85                  | 1.71               | -7.57               | -6.58               | 14.7                  | 145.4              | 26.5                | 130.3  |
| 4x8             | 1.57               | -0.57              | 0.05                  | -2.10              | 5.07                | 1.91                | 10.5                  | 221.9              | -225.3 <sup>*</sup> | -586.4 |
| 5x7             | 1.54               | 3.00 <sup>**</sup> | -2.08                 | 1.68               | -0.70               | -3.05               | 12.6                  | 224.0              | 78.6                | -77.1  |
| 2x7             | 1.48               | 0.98               | 2.23                  | 4.28               | -3.17               | -6.13               | 36.1                  | 74.1               | -18.9               | -42.7  |
| 7x9             | 1.34               | 1.05               | 3.87                  | -4.76              | 23.54 <sup>**</sup> | 6.91                | 239.5 <sup>*</sup>    | 750.7              | 192.6 <sup>‡</sup>  | 227.6  |
| 4x6             | 1.31               | 0.44               | 1.96                  | -9.74 <sup>*</sup> | -1.01               | 0.45                | 53.6                  | 826.8 <sup>‡</sup> | -65.4               | -357.4 |
| 5x9             | 1.29               | 0.89               | 4.46                  | 5.33               | 9.18                | 11.54 <sup>*</sup>  | 64.0                  | 729.8              | 157.2               | 160.3  |
| 1x7             | 1.23               | 0.85               | -3.02                 | 1.03               | 0.02                | -12.73 <sup>*</sup> | -34.8                 | 274.6              | -57.8               | 19.1   |

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>, significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; <sup>‡</sup>= Significativo al 0.10 nivel de probabilidad; GEN= Genotipos; REN\_MEZ, REN\_RA, Rendimiento de grano en las localidades El Mezquite, N. L. y Ramos Arizpe, Coah., respectivamente; <sup>†</sup> El primer dígito indica el número de población y la letra la identificación de raza: C= Celaya, CN= Cónico Norteño, R= Ratón, T= Tuxpeño y TN= Tuxpeño Norteño; PSR= Peso seco de raíz; PSV= Peso seco de vástago; E y T, Estrés por salinidad y Testigo (sin sal).

Por su parte en el ensayo realizado en laboratorio las cruzas 7Rx9T presentaron diferencias al ( $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$ ) respectivamente, estos valores expresan el potencial de la combinación genética entre las poblaciones a diferentes condiciones de desarrollo en etapas tempranas indicando que estas poblaciones involucradas en la cruce, pudieran ser combinaciones heteróticas deseables para incrementar la capacidad de incrementar materia seca en diferentes condiciones de desarrollo en etapas tempranas (Peña *et al.*, 2012) y en campo (Santiago-López *et al.*, 2017).

En el ensayo realizado en invernadero, los valores obtenidos permitieron identificar a la cruce 7x9 como el mayor valor y significativo ( $P \leq 0.05$ ) para la característica PSR, y la cruce 1x9 con diferencias ( $P \leq 0.05$ ) para PSV en condiciones de estrés por salinidad, esto es de importancia debido a que las poblaciones involucradas presentan la capacidad de desarrollarse en condiciones desfavorables de desarrollo. Diversos trabajos (Mohammadkhani y Heidari, 2008; Méndez *et al.*, 2010), mencionan que esta variación detectada entre los genotipos puede deberse al desarrollo de las raíces en condiciones de estrés, como una respuesta de la planta para explorar un área mayor en busca de agua, teniendo un efecto secundario en el desarrollo de la parte aérea. En contraste Zörb *et al.*, (2004), mencionan que la reacción bioquímica del maíz al estrés salino se caracteriza por una mitigación de síntomas y no por adaptaciones específicas.

La variación genética de las poblaciones y la variación ambiental no permitieron identificar diferencias significativas entre ellas en las evaluaciones de laboratorio e invernadero. Sin embargo, al analizar la respuesta al 0.10 de probabilidad, las poblaciones 7R y 9T identificadas en el Cuadro 4, también sus cruces expresan valor de heterosis positiva en PSR y PSV en los ensayos de laboratorio e invernadero.

## **Análisis de correlación**

El Cuadro 6 muestra las correlaciones de Pearson ( $r$ ) entre las características de los 45 genotipos evaluados en los diferentes ensayos y condiciones ambientales de desarrollo.

En las evaluaciones en campo destacan la correlación positiva de  $r = 0.360^{**}$  entre el rendimiento de grano en los dos ambientes de evaluación (Cuadro 6). Esta correlación es importante, dado que los ambientes a pesar de ser contrastantes, el rendimiento de los genotipos tuvo una respuesta asociada a las condiciones de evaluación. Sin embargo, hay que tomar esta correlación con reserva debido a que es una correlación moderadamente intermedia, la cual está influenciada por las condiciones ambientales de evaluación y la interacción genotipo x ambiente (Martínez *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2012).

Del Cuadro 6 se desprende que, con excepción de los ensayos en laboratorio, la relación de PSR y PSV es significativa ( $P \leq 0.01$ ) dentro de ensayos y condiciones de estrés y testigo. El peso seco de plántula en los ensayos de laboratorio e invernadero (planta), sólo en las condiciones sin estrés en laboratorio, correlacionaron positiva y significativamente con PSR, y con PSV en los ensayos de invernadero.

En el caso de los ensayos en invernadero, se encontró relación positiva, aunque con valores moderadamente bajos, del peso seco de planta con rendimiento de grano en campo, donde el PSR bajo condiciones de estrés (PSR\_EI) obtuvo una correlación de  $r = 0.308^{**}$  y  $r = 0.198$  para las localidades El Mezquite y Ramos Arizpe, respectivamente.



**Cuadro 6.** Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y materia seca a través de los ambientes de evaluación de poblaciones y cruzas simples realizado en 2017.

|                | Ensayo en Laboratorio |         |          | Ensayo en Invernadero |          |        |          | REN_MEZ | REN_RA   |
|----------------|-----------------------|---------|----------|-----------------------|----------|--------|----------|---------|----------|
|                | PSV_EL                | PSR_TL  | PSV_TL   | PSR_EI                | PSV_EI   | PSR_TI | PSV_TI   |         |          |
| PSR_EL         | 0.028                 | 0.304 * | 0.223    | 0.044                 | 0.208    | -0.132 | -0.061   | -0.192  | -0.260   |
| PSV_EL         |                       | -0.288  | -0.099   | 0.010                 | -0.078   | 0.117  | 0.237    | 0.126   | 0.100    |
| PSR_TL         |                       |         | 0.465 ** | 0.486 **              | 0.366 *  | 0.224  | 0.090    | 0.102   | -0.170   |
| PST_TL         |                       |         |          | 0.401 **              | 0.335 *  | 0.168  | 0.276    | 0.079   | 0.151    |
| PSR_EI         |                       |         |          |                       | 0.549 ** | 0.281  | 0.386 ** | 0.308 * | 0.198    |
| PSV_EI         |                       |         |          |                       |          | 0.079  | 0.182    | 0.234   | 0.057    |
| PSR_TI         |                       |         |          |                       |          |        | 0.408 ** | 0.157   | 0.310 *  |
| PSV_TI         |                       |         |          |                       |          |        |          | 0.148   | 0.205    |
| <b>REN_MEZ</b> |                       |         |          |                       |          |        |          |         | 0.360 ** |

\*, \*\*, significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; PSR= Peso seco de raíz, PSV= Peso seco de vástago, REN= Rendimiento de grano; E y T, Estrés por salinidad y Testigo (sin sal).

En contraste con los ensayos realizados en laboratorio, estas características no mostraron asociación, lo que indica que los genotipos presentaron un comportamiento diferencial en el desarrollo de sus estructuras entre las dos condiciones a las que fueron sometidos.

Los resultados del Cuadro 6 concuerdan en parte con la propuesta realizada por Giaveno *et al.* (2007) en que el peso de plántula puede ser usado como criterio de selección, sin embargo, en el presente estudio, el PSR y PSV bajo condiciones sin estrés, sólo mostraron correlación positiva con el PSR, y para PSV en los ensayos bajo condiciones de invernadero.

### **Interacción de los genotipos con caracteres x ambientes**

La Figura 2 presenta la dispersión gráfica de la interacción de los genotipos con las características en estudio por ambientes de evaluación, utilizando el modelo GGE Biplot para el análisis gráfico.

El modelo GGE Biplot analiza la interacción de factores, en este caso, los genotipos, usando como probadores los caracteres en estudio, asociados a los diferentes ambientes. En la Figura 2, los vectores representan la combinación de caracteres con ambientes, los cuales, se originaron a partir del origen; la magnitud de estos indica la variación asociada a este carácter.



Primeramente, se interpretará los vectores generados por las características evaluadas. El coseno del ángulo que forman los vectores se aproxima al coeficiente de correlación. Un ángulo menor a  $30^\circ$  indica una relación muy estrecha y en contraste los vectores con ángulos mayores o iguales a  $90^\circ$  muestran un comportamiento independiente; un ángulo de  $180^\circ$  estará representando una asociación negativa (Yan y Kang, 2003). De manera similar, cada genotipo proyecta un vector a partir del origen y, por lo tanto, las interrelaciones entre los genotipos y los caracteres x ambientes pueden utilizarse como un proceso de selección indirecta de genotipos con los caracteres de interés. En este análisis se consideró usar los primeros dos componentes principales, los cuales explican el 47.3 % de la varianza total acumulada.

En lo que refiere a la asociación de las características el rendimiento de grano (REN\_MEZ y REN\_RA) correlacionó positivamente con PSR\_TI, PSV\_TI y con PSV\_EL, en tanto que con el PSR\_EL una asociación negativa y asociaciones muy bajas para las características PSV\_EL y PSR\_EI. Por otro lado, las características PSR\_TL, PSV\_TL y PSV\_EI dónde se presentaron asociaciones fuertes entre ellas, esto es un resultado similar exhibido por las correlaciones (Cuadro 6). La diferencia entre la proyección de los vectores en la Figura 2 y los resultados del Cuadro 6 se debe a que en el Cuadro 6, se utilizó el 100 % de la variación acumulada en tanto en la Figura 2 sólo el 47.3 %. En la Figura 2 se puede confirmar la variación entre las poblaciones, las cuales están ordenadas de acuerdo a las interacciones entre los caracteres.

Del análisis multivariante se puede ubicar a las poblaciones 7R, 6R,4R y 8T que forman un grupo que correlaciona positivamente con el rendimiento de grano y los caracteres PSR\_TI y PSV\_TI; el resto de las poblaciones con excepción de la 9T se asocian negativamente formando otro grupo. De manera similar, las cruas 5x8, 5x9, 1x9, 6x7, 6x8, 4x7 5x6 y 2x8, forman un grupo estrechamente relacionado al PSR\_EI, que correlaciona positivamente con el rendimiento de grano tal como se puede verificar en el Cuadro 6.

De la interacción con los genotipos, se puede identificar a las poblaciones 6R y 7R y un importante grupo de cruzas, de las cuales, en seis de ellas interviene la población 9T, cuyos valores están interrelacionados con el rendimiento de grano y el PST\_EI.

Considerando el PSR\_EI se puede verificar que las poblaciones 1CN, 2CN, 5TN y 9T y un grupo importante de cruzas en la que intervienen las combinaciones con las poblaciones 1CN y 2CN, correlacionan negativamente. Por lo tanto, se puede considerar al PSR\_EI como un indicador para la selección temprana de genotipos de maíz, que fortalezcan las estrategias de mejoramiento como lo señalan Lamz y Gonzalez (2013).

## CONCLUSIONES

Se confirma que existe variación genética entre poblaciones y cruzas entre ellas para los caracteres en estudio.

Se puede considerar al peso seco del sistema radical determinado bajo condiciones de estrés por salinidad en invernadero, como indicador con potencial para la selección temprana de genotipos de maíz.

El análisis de dispersión gráfica puede ser una herramienta complementaria en el proceso de selección de la respuesta correlacionada.

## REFERENCIAS

- Almeida M., R. M. and R. Paulo S. 2017. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*. 3(30): 1-13. doi:10.3390/horticulturae3020030
- Balderrama C., S., J. Ron P., J. J. Sánchez G., E. Rodríguez G. y S. Adolfo U. 2016. Formación de un patrón heterótico con líneas templadas y tropicales de maíz. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(3): 521-530.
- Barreto H., J., G. O. Edmeades., S. C. Chapman and J. Crossa. 1997. The alpha lattice design in plant breeding and agronomy: Generation and analysis. In: G. O. Edmeades., M. Bänzinger., H. R. Mickelson., and C. B. Peña Valdivia. *Developing Drought and Low N-Tolerant Maize. Proceedings of a Symposium.* 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, México. México, D. F. pp. 544-551.
- Birchler J. A., H. Yao, S. Chudalayandi, D. Vaiman and R. A. Veitia. 2010. Heterosis. *The Plant Cell* 22(2): 2105 - 2112. doi:10.1105/tpc.110.076133
- Castro N., S., J. A. López S., J. A. Pecina M., Ma. del C. Mendoza C. y C. A. Reyes M. 2013. Exploración de germoplasma nativo de maíz en el centro y sur de Tamaulipas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4: 645-653.
- Crossa J., S. Taba, and E. J. Wellhausen. 1990. Heterotic patterns among mexican races of maize. *Crop Sci.* 30: 1182 - 1190
- De Abreu, V. M., É. V. Resende V. P., M. P. Mendes-Resende, M. Balestre, A. C. Lima, H. Oliveira-Santos and R. Garcia V. P. 2018. Combining Ability and Heterosis of Maize Genotypes under Water Stress during Seed Germination and Seedling Emergence. *Crop Sci.* 59(1):33–43. doi: 10.2135/cropsci2018.03.0161
- Espinosa-Tamayo, L. C., F. Rincón-Sánchez, N. A. Ruiz-Torres y J. M. Martínez-Reyna. 2016. Potencial genético y adaptación de poblaciones nativas de maíz del sureste de Coahuila, México. *Agraria* 13: 7-14.
- FAO. 2017. Base de Datos Sustantivos. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en línea <http://www.fao.org/faostat/es/#data> (Revisado el 01 de marzo de 2019).
- García L., J. I. 2016. Estudio de diferentes niveles de salinidad en la germinación, vigor y procesos fisiológicos en la variedad criolla mejorada de maíz Jaguan. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koeppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana. Offset Larios. México. 246 p.
- Giaveno C. D., R. Vasconcelos R., G. Maia S. and R. Ferraz de O. 2007. Screening of tropical maize for salt stress tolerance. *Crop Breeding and applied Biotechnology* 7: 301 – 313.
- Hallauer A. R., M. J. Carena, and J. B. Miranda F. 2010. Quantitative Genetics in Maize Breeding. Volume 6 of the Handbook of Plant Breeding. Springer Science and Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, USA. 663 p.
- Hellin J., M. R. Bellon and S. J. Hearne. 2014. Maize landraces and adaptation to climate change in México. *Journal of Crop Improvement*. 28(4): 484-501, DOI: 10.1080/15427528.2014.921800.
- Hochholdinger F. and J. A. Baldauf. 2018. Heterosis in plants. *Curr Biol*. 28(18): R1089-R1092. doi: 10.1016/j.cub.2018.06.041.
- Hoffman G., E. Maas, T. Prichard and J. Meyer. 1983. Salt tolerance of corn in the Sacramento-San Joaquin Delta of California. *Irrigation Science* 4:31-44.
- Hu H. and L. Xiong. 2014. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. *Annu. Rev. Plant Biol.* 35:14-34.
- INEGI. 2018. Cuaderno Estadístico Municipal de Saltillo, Coahuila de Zaragoza. Aspectos Geográficos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía Disponible en línea: <http://www.inegi.org.mx/> (Consultado el 20 de marzo del 2019).
- ISTA. 2009. International Rules for Seed Testing. The International Seed Testing Association (ISTA). Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Lamz P., A. y M. González C. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34 (4): 31-42.
- Layne-Garsaball J. A., J. R. Méndez-Natera y J. Mayz-Figueroa. 2008. Efecto de la salinidad y del tamaño de la semilla sobre la germinación y crecimiento de plántulas de maíz bajo condiciones de laboratorio. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 11:17-25.
- Lobell D., B., M. B. Burke, C. Tebaldi, M. D. Mastrandrea, W. P. Falcon and R. L. Naylor. 2008. "Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030". *Science*. 319: 607-610.



- Lobo B. M., C. M. Torres C., J. R. Fonseca R., A. Martins P. de M., R. de Belem N. A. and T. Abadie. 2003. Characterization of germplasm according to environmental conditions at the collecting site using GIS: Two case studies from Brazil. *Plant Genet. Resour. News.* 135:1–11.
- López F., A. J. y D. Hernández C. 2016. Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico.* 83: 459-496.
- Martínez M., R. Ortiz, H. Ríos y R. Acosta. 2010. Análisis de correlaciones en poblaciones cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales.* 31: 82-91.
- Mayer L. I., R. Savin and G. A. Maddonni. 2016. Heat stress during grain filling modifies kernel protein composition in field-grown maize. *Crop Science* 56(4). doi:10.2135/cropsci2015.09.0537.
- Méndez N. J., F. Ybarra y P. J. Merazo. 2010. Germinación y desarrollo de plántulas de tres híbridos de maíz bajo soluciones osmóticas. VI. Comparación entre cinco soluciones osmóticas. *Tecnológica ESPOL-RTE.* 1:55-60.
- Mendoza-Hernández, J. M., A. Zermeño-González, J. M. Covarrubias-Ramírez y J. J. Cortés-Bracho. 2013. Proyecciones climáticas para el estado de Coahuila usando el modelo precis bajo dos escenarios de emisiones. *Agrociencia* 47: 523-537.
- Mercer K. L. and H. R. Perales 2010. Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Application* 3: 480-493.
- Mohammadkhani N. and R. Heidari. 2008. Water stress induced by polyethylene glycol 6000 and sodium chloride in two maize cultivars. *Pakistan J. Biol. Sci.* 11:92-97.
- Nawaz K., K. Hussain, A. Majeed, F. Khan, S. Afghan and K. Ali. 2010. Fatality of salt stress to plants: Morphological, physiological and biochemical aspects. *Afr. J. Biotechnol.* 9(34): 5475-5480.
- Peña R., A., F. González C., G. Núñez H., M. R. Tovar G., V. A. Vidal M. y J. L. Ramírez D. 2012. Heterosis y aptitud combinatoria para producción y calidad de forraje en seis poblaciones de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias,* 3: 389-406.
- Reif J. C., A. R. Hallauer and A. E. Melchinger. 2005. Heterosis and heterotic patterns in maize. *Maydica* 50: 215-233.
- 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.

- Ruiz C., J. A., N. Durán P., J. de 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. doi:10.2135/cropsci2007.09.0518
- SAGARPA-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://www.gob.mx/siap> Consulta realizada el 2 marzo de 2019.
- Santiago-López N., J. García-Zavala, A. Mejía-Contreras, A. Espinoza-Banda, U. Santiago-López, G. Esquivel-Esquivel y J. Molina-Galán. 2017. Rendimiento de grano de poblaciones de maíz Tuxpeño adaptado a Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8: 145-156.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- Stadler K. J. and A. M. Saxton. 2004. More estimation of genetic parameters. In: Saxton, A. M. (ed). *Genetic Analysis of Complex Traits Using SAS*. pp: 35-67.
- Tinoco-Rueda, J. A., J. D. Gómez-Díaz y A. I. Monterroso-Rivas. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana* 29: 161-168.
- Tollenaar M. and J. Lee. 2002. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci.* 39:1597–1604. doi:10.2135/cropsci1999.3961597.
- Torabi M. and R. A. Halim. 2013. Physiological and biochemical responses of plants in saline environment. In: Roychowdhury, R. (Ed.). *Crop Biology and Agriculture in Harsh Environments*. Lambert Academic Publishing. pp: 48- 80.
- Vázquez C., M. G., D. Santiago R., Y. Salinas M., I. Rojas M., J. L. Arellano V., G. A. Velázquez C. y A. Espinosa C. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 35: 229- 237.
- Yan W. and M. S. Kang. 2003. GGE Biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press LLC, New York. 271p.
- Zörb C., S. Schmitt, A. Neeba, S. Karl, M. Linder and S. Schubert. 2004. The biochemical reaction of maize (*Zea mays* L.) to salt stress is characterized by a mitigation of symptoms and not by a specific adaptation. *Crop. Science*, 167: 91-100.