

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



SELECCIÓN DE POBLACIONES DE MAÍZ DE LA RAZA RATÓN CON BASE EN  
LA PRODUCCIÓN TEMPRANA DE MATERIA SECA BAJO CONDICIONES DE  
ESTRÉS SALINO

**Tesis**

Que presenta JESÚS ULISES FELIX LIZARRAGA  
como requisito parcial para el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

Saltillo, Coahuila

Febrero 2022

SELECCIÓN DE POBLACIONES DE MAÍZ DE LA RAZA RATÓN CON BASE EN  
LA PRODUCCIÓN TEMPRANA DE MATERIA SECA BAJO CONDICIONES DE  
ESTRÉS SALINO

**Tesis**

Elaborada por JESÚS ULISES FELIX LIZARRAGA como requisito parcial  
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con la supervisión  
y aprobación del Comité de Asesoría

---

Dr. Froylán Rincón Sánchez  
Asesor Principal

---

Dra. Norma Angélica Ruíz Torres  
Asesor

---

Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez  
Asesor

---

Dr. Fernando Borrego Escalante  
Asesor

---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor

---

Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## **Agradecimientos**

A **Dios**, por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida, además por permitirme disfrutar cada momento de alegría y adversidad.

A mi **familia**, por apoyarme en cada propósito que me eh propuesto.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo financiero durante mis estudios de maestría y a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, por abrirme sus puertas y por haberme permitido formar bajo sus instalaciones.

Al **Dr. Froylán Rincón Sánchez**, por darme la oportunidad de trabajar en su proyecto de investigación y además aprender temas valiosos que enriquecen mi formación.

A la **Dra. Norma Angélica Ruiz Torres**, por ser una guía durante mis estudios, gracias por la confianza que deposito en mí y sobre todo por compartirme sus conocimientos que aportaron mucho a mi vida.

Al **Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez**, por siempre estar dispuesto a ayudarme y transmitirme de su conocimiento.

Al **Dr. Fernando Borrego Escalante**, por su aportación a este proyecto de investigación.

Al **Dr. Adalberto Benavidez Mendoza**, por su asesoramiento durante mis estudios.

Al **Ing. Juan Luis Patiño Aispuro**, por ser un ejemplo a seguir y por despertar en mi la curiosidad de estudiar el arte del fitomejoramiento, infinitamente gracias.

A **compañeros de maestría y amigos**, gracias por su apoyo y aliento en cada momento.

## **Dedicatoria**

A esa persona que siempre estuvo conmigo en todo momento, *mi esposa Esmeralda*. Gracias por compartirme tus buenos ánimos y fuerzas, eres una gran ser humano para mí.

*A mis padres*, por haberme hecho una persona con buenos valores y por darme siempre la fuerza por cumplir las metas que me propongo, gracias a ustedes soy lo que soy.

*A mis hermanas y abuelos*, por sus enseñanzas y consejos, son parte de mi formación.

## Índice General

	Página
Lista de cuadros.....	vi
Lista de figuras .....	vii
Resumen .....	viii
Abstract .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivos .....	2
Hipótesis .....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Importancia del maíz .....	3
Potencial genético.....	4
Respuesta correlacionada a la selección.....	4
Respuesta ambiental y adaptación de maíz .....	5
Variación en tamaño de raíz bajo condiciones de estrés .....	5
Producción de materia seca y su relación en la concentración de nutrientes .....	6
Selección bajo condiciones de estrés.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS .....	8
Material genético .....	8
Establecimiento de experimentos .....	8
I. Ensayo en campo .....	8
II. Ensayo en invernadero.....	10
Análisis de correlación .....	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	14
Análisis de varianza.....	14
Potencial de rendimiento de los genotipos evaluados .....	23
Análisis de correlación .....	26
Coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ).....	27
CONCLUSIONES .....	29
REFERENCIAS .....	30

## Lista de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de rendimiento de grano, en la localidad de General Cepeda, Coahuila, 2020. ....	14
<b>Cuadro 2.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de la producción de materia seca en ensayo de invernadero. ....	16
<b>Cuadro 3.</b> Medias de los ambientes de evaluación de los 120 genotipos evaluados en invernadero. ....	18
<b>Cuadro 4.</b> Rendimiento promedio de materia seca, contenido de clorofila y rendimiento de grano de los 20 genotipos superiores de maíz con base en el peso seco de raíz en condiciones de estrés salino. ....	24
<b>Cuadro 5.</b> Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y materia seca de los genotipos de maíz utilizados en invernadero y campo. ....	26
<b>Cuadro 6.</b> Estimadores de componentes de varianza y coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) para los caracteres peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) contenido de clorofila (CLO) y rendimiento de grano (REND). ....	28

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Promedio de peso seco de vástago y raíz de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero en los ambientes con y sin estrés salino, realizado en el 2021. PSR = Peso seco de raíz; PSV = Peso seco de vástago; E y T, Estrés por salinidad y Testigo (sin sal), respectivamente. ....	19
<b>Figura 2.</b> Promedio de conductividad eléctrica del sustrato por repetición (fecha de siembra), en los ensayos con y sin estrés salino en invernadero en el 2021. ....	20
<b>Figura 3.</b> Promedio de contenido de clorofila (unidades SPAD) por muestreo de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero realizado en el 2021. ....	22

## **Resumen**

SELECCIÓN DE POBLACIONES DE MAÍZ DE LA RAZA RATÓN CON BASE EN  
LA PRODUCCIÓN TEMPRANA DE MATERIA SECA BAJO CONDICIONES DE  
ESTRÉS SALINO

POR

JESUS ULISES FELIX LIZARRAGA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. FROYLÁN RINCÓN SÁNCHEZ-ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Febrero 2022

Las poblaciones nativas de maíz tienen un gran potencial de adaptación, pues tienen la capacidad de enfrentarse a condiciones bióticas y abióticas adversas, provocadas por el cambio climático. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) Analizar la variación genética de la producción de materia seca en etapas tempranas de poblaciones de maíz de la raza Ratón, en ambientes de cultivo, con y sin estrés por salinidad y, 2) Analizar la correlación de la producción de materia seca en etapas tempranas con el rendimiento de grano. Se evaluaron 118 poblaciones de maíz de la raza Ratón y dos testigos híbridos comerciales (Rx715 y 6818), en dos etapas: 1) Ensayo de campo para evaluar el potencial de rendimiento y, 2) Ensayo en invernadero para analizar el peso seco de vástago y raíz en etapa temprana, bajo condiciones con y sin estrés por salinidad, usando cloruro de sodio (NaCl) como fuente salina y agua destilada en el ambiente sin estrés. En el ensayo de invernadero, se determinó el peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y contenido de clorofila (CLO), mientras que en el experimento de campo se determinó el rendimiento de grano (REND). En los ambientes se encontraron diferencias estadísticas en PSV ( $P \leq 0.01$ ) y CLO ( $P \leq 0.05$ ), en tanto que en PSR no hubo diferencia. En los genotipos (poblaciones y testigos) se encontraron diferencias estadísticas ( $p \leq 0.01$ ) para las variables de peso seco, excepto en CLO. No hubo evidencia de interacción de genotipos  $\times$  ambientes en ninguna de las variables estudiadas. Las condiciones de estrés salino tuvieron un efecto en PSR y PSV con respecto a las condiciones sin estrés con una reducción de 25.9 y 47.5 %, respectivamente. Se determina que existe variación genética en las poblaciones estudiadas de la raza Ratón para el PSR, PSV y REND, lo que permite realizar selección de genotipos en la etapa temprana de desarrollo. Se identificaron genotipos sobresalientes en la respuesta al estrés por salinidad con base en el peso seco de raíz lo que permite un buen establecimiento y desarrollo de la planta. Bajo las condiciones de evaluación se evidencia buen potencial de rendimiento de las poblaciones estudiadas con capacidad de competir contra los híbridos. No se encontró correlación entre el peso seco de vástago y peso seco de raíz con el rendimiento de grano; sin embargo, se identificaron genotipos sobresalientes (TA\_104, TA\_108, C\_86 y C\_69) con base en el peso seco de raíz con tolerancia al estrés por salinidad.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., estrés por salinidad, Raza Ratón, selección temprana.

**Abstract**

SELECTION OF MAIZE POPULATIONS OF THE RATON RACE BASED ON THE  
EARLY PRODUCTION OF DRY MATTER UNDER SALINE STRESS  
CONDITIONS

BY

JESUS ULISES FELIX LIZARRAGA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. FROYLÁN RINCÓN SÁNCHEZ - ADVISOR –

Saltillo, Coahuila

February 2022

The native maize populations have a great potential for adaptation, they have the capacity to face adverse biotic and abiotic conditions, caused by climate change. The objectives of this work were: 1) To analyze the genetic variation of dry matter production in early stages of maize populations of the Raton race, in cultivation environments, with and without salinity stress and, 2) To analyze the correlation of dry matter production in early stages with grain yield. 118 maize populations of the Raton race and two commercial hybrids as checks (Rx715 and 6818) were evaluated in two stages: 1) Field trial to evaluate the yield potential and, 2) Greenhouse trial to analyze the dry weight of stem and root in early stage, under conditions with and without salinity stress, using sodium chloride (NaCl) as a saline source and distilled water in the stress-free environment. In the greenhouse trial, the dry stem weight (PSV), root dry weight (PSR) and chlorophyll content (CLO) were determined, while in the field experiment the grain yield (REND) was determined. In the environments, statistical differences were found in PSV ( $P \leq 0.01$ ) and CLO ( $P \leq 0.05$ ), while in PSR there was no difference. Statistical differences ( $p \leq 0.01$ ) were found in the genotypes (populations and checks) for the dry weight variables, except in CLO. There was no evidence of genotype by environments interaction in any of the variables studied. Saline stress conditions had an effect on PSR and PSV with respect to non-stress conditions with a reduction of 25.9% and 47.5%, respectively. It is determined that there is genetic variation in the studied populations of the Raton race for PSR, PSV and REND, which allows genotype selection at the early stage of development. Outstanding genotypes were identified in the salinity stress response based on the dry weight root which allows a good establishment and development of the plant. Under the conditions of evaluation, there is evidence of good yield potential of the populations studied with the ability to compete against hybrids. No correlation was found between stem dry weight and root dry weight with grain yield; however, outstanding genotypes (TA\_104, TA\_108, C\_86 and C\_69) were identified based on dry root weight with tolerance to salinity stress.

**Keywords:** *Zea mays* L., salinity stress, Ratón race, early selection

## INTRODUCCIÓN

El maíz es de los cultivos con mayor importancia social, económica y cultural en México, el cual es catalogado como el más representativo del país (SADER-ASERCA-CIMA, 2020).

México es considerado como centro de origen del cultivo de maíz, debido a que se ha encontrado la mayor abundancia de diversidad de razas y variedades de esta especie, además, el territorio mexicano fue considerado como centro de domesticación del maíz, gracias a la intervención y explotación genética que realizaron los antiguos habitantes de este país. La ubicación y las características fisiográficas que tiene México, han propiciado la abundancia de razas de maíz (Kato *et al.*, 2009).

En México, en el año 2020 se sembraron 7.47 millones de ha de maíz para grano, con un rendimiento promedio de 3.83 t ha<sup>-1</sup>. La superficie sembrada de maíz para grano en el estado de Coahuila en el año 2020 fue de 25,190 hectáreas, con un rendimiento de 0.86 t ha<sup>-1</sup>, en donde el 85 % fueron en condiciones de temporal y el 15% en condiciones de riego. En el sureste del estado de Coahuila (Arteaga, General Cepeda, Parras de la Fuente, Ramos Arizpe y Saltillo) se sembraron 22,847 hectáreas, en donde el 93.4 % bajo condiciones de temporal y el 6.6% bajo condiciones de riego (SIAP, 2020).

Un problema fuerte que enfrenta la agricultura es el cambio climático, el cual, modifica la temperatura, la radiación y la lluvia, y de esta forma afecta negativamente la producción. Según Arce-Romero *et al.* (2018), si no se realizan acciones para enfrentar el cambio climático, el cultivo de maíz puede reducir un 50% en promedio su rendimiento en un futuro próximo (2015-2039). La salinidad es un efecto del cambio climático, en consecuencia, este está impactando fuertemente las superficies agrícolas áridas, semiáridas y costeras (Corwin, 2020).

Una de las alternativas para mitigar el cambio climático es el uso de la diversidad genética de las variedades nativas, debido a que están adaptadas a condiciones adversas en donde se enfrentan diferentes tipos de estrés (bióticos y abióticos) (Rincon-Sanchez y Ruiz-Torres, 2017).

Dentro de la amplia diversidad, existe la necesidad de identificar poblaciones nativas que muestren su potencial genético en condiciones adversas; una opción para identificar

germoplasma tolerante a condiciones desfavorables, es realizar ensayos en donde se someten genotipos a condiciones de salinidad (Farooq *et al.*, 2015). Actualmente, la raíz está siendo estudiada en respuesta a condiciones de estrés en etapas tempranas, debido a que esta parte de la planta se ha señalado que puede utilizarse como criterio de selección (Li *et al.*, 2015).

La finalidad de este trabajo de investigación fue analizar la respuesta de poblaciones nativas de maíz de la raza Ratón a condiciones adversas, con base en la producción de materia seca en ambientes con y sin estrés salino, por lo cual se establecieron los siguientes objetivos:

### **Objetivos**

- Analizar la variación genética de la producción de materia seca en etapas tempranas de poblaciones de maíz de la raza Ratón, en ambientes de cultivo, con y sin estrés por salinidad.
- Analizar la correlación de la producción de materia seca en etapas tempranas con el rendimiento de grano.

### **Hipótesis**

- En las poblaciones de maíz representativas de la raza Ratón existe una respuesta diferencial en la producción de peso seco de vástago y raíz, que pueden ser utilizados como criterio de selección temprana.
- La producción de materia seca en etapas tempranas de desarrollo puede estar asociada al rendimiento de grano.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Importancia del maíz**

El cultivo de maíz es de gran importancia social, económica y cultural para México, por lo cual, es catalogado como el cultivo más representativo del país (SADER-ASERCA-CIMA, 2020).

México supera a cualquier otro país en riqueza de diversidad de razas y variedades de maíz, por lo cual se ha considerado como uno de los centros de domesticación y de diversidad (Kato *et al.*, 2009). Durante el 2020 se sembraron 7.47 millones de ha de maíz para grano, con un rendimiento promedio de 3.83 t ha<sup>-1</sup>. La superficie sembrada de maíz para grano en el estado de Coahuila en el año 2020 fue de 25,190 hectáreas, con un rendimiento de 0.86 t ha<sup>-1</sup>, en donde el 85% fueron en condiciones de temporal y el 15% en condiciones de riego. En el sureste del estado de Coahuila (Arteaga, General Cepeda, Parras de la Fuente, Ramos Arizpe y Saltillo) se sembraron 22,847 hectáreas, en donde el 93.4% bajo condiciones de temporal y el 6.6% bajo condiciones de riego (SIAP, 2020).

En el estado de Coahuila, los maíces nativos representan el 80% de la superficie cultivada con maíz. Los productores han realizado una labor muy importante en la conservación de los maíces nativos, ya que estos a través de las semillas cosechadas han realizado selección, logrando conservar esta diversidad (Rincón *et al.*, 2010).

En México se han descrito 59 razas de maíz, adaptadas a diferentes condiciones climáticas, que van desde climas secos a húmedos, desde altitudes bajas (30 msnm) hasta altitudes altas (2615 msnm) (Sánchez *et al.*, 2000).

El cambio climático provoca modificaciones en las temperaturas, radiación, exceso y ausencia de lluvias, los cuales afectan el rendimiento del cultivo de maíz principalmente las condiciones de temporal (Noriega-Navarrete *et al.*, 2021). Según Arce-Romero *et al.* (2018), el cultivo de maíz en un futuro cercano (2015-2039) puede disminuir su rendimiento un 50% en promedio, si no existen acciones de resiliencia, de esta manera el cambio climático puede poner en riesgo la seguridad alimentaria de gran parte de la población.

En este sentido, como una de las estrategias de resiliencia, los maíces nativos poseen características genéticas de importancia agronómica, tal como la capacidad de adaptación a condiciones adversas, precocidad, alto potencial de rendimiento y estabilidad en diferentes ambientes, los cuales pueden ser utilizados en programas de mejoramiento genético (González-Martínez *et al.*, 2020).

### **Potencial genético**

El potencial genético según Chrispeels y Sadava (2003), es el potencial máximo de rendimiento que expresa un genotipo. Investigar y conocer el potencial genético de genotipos adaptados es de gran importancia para establecer estrategias a emplear para resolver objetivos actuales y futuros (Rincon-Sanchez y Ruiz-Torres, 2017). Una forma útil de conocer el potencial genético según Spiertz (2013) es a través de estudios exploratorios en donde un cultivo se somete a condiciones de estrés biótico o abiótico.

Nájera *et al.* (2010) realizaron un estudio en donde detectaron poblaciones nativas sobresalientes en rendimiento y estabilidad agronómica, con potencial para ser útiles en programas de mejoramiento genético. Asimismo, Espinosa *et al.* (2019) llevaron a cabo un estudio de 63 poblaciones nativas de maíz representativas del sureste del estado de Coahuila, en las que las razas Ratón, Tuxpeño y Tuxpeño Norteño fueron las que mostraron un potencial de rendimiento sobresaliente.

### **Respuesta correlacionada a la selección**

La selección indirecta consiste en seleccionar un carácter secundario con el fin de obtener una respuesta positiva en un carácter deseable o primario. Una alta correlación entre dos características podría proporcionar ganancia genética del carácter deseado. El carácter secundario debe de ser más fácil y rápido de medir. La correlación entre dos o más caracteres es de gran importancia en el fitomejoramiento, si existe una asociación genética, la selección provocará cambios en otros caracteres (Hallauer *et al.*, 2010).

Falconer y Mackay (1996) mencionan que los experimentos de doble selección proporcionan dos estimaciones de correlaciones genéticas; una a partir de la respuesta correlacionada de cada carácter y la segunda ayuda a afirmar la teoría de la respuesta

correlacionada, por lo tanto, se puede obtener una estimación conjunta de la correlación genética a partir de tales experimentos de doble selección.

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

La medición de variables agronómicas como la producción de biomasa en el cultivo de maíz, proporciona una importante información para comprender la respuesta ante el medio ambiente (Winterhalter *et al.*, 2011). La caracterización desde el punto de vista de adaptabilidad es de gran relevancia para el aprovechamiento del uso del potencial de los recursos genéticos de maíz (Ruiz *et al.*, 2008). Estos autores realizaron un estudio en 42 razas mexicanas de maíz con 4161 accesiones, en donde encontraron que las razas mexicanas de maíz tienen un gran rango de adaptación que van desde el nivel del mar hasta altitudes que superan los 2900 msnm, además tienen la capacidad de desarrollarse en ambientes áridos y húmedos.

### **Variación en tamaño de raíz bajo condiciones de estrés**

Las raíces se han presentado como una alternativa importante para mejorar la adaptación y establecimiento de los cultivos en condiciones de estrés; un continuo crecimiento de la zona radical es necesario para que las plantas puedan establecerse en condiciones adversas (Vadez, 2014). Zahra *et al.* (2020) mencionan que las altas concentraciones de salinidad provocan en las plantas un efecto negativo en el crecimiento de la raíz.

Actualmente la salinidad está afectando fuertemente las áreas agrícolas áridas, semiáridas y costeras como consecuencia del cambio climático (Corwin, 2020). Según Butcher *et al.* (2018) aproximadamente 831 millones de hectáreas de tierras cultivables a nivel mundial son afectadas por la salinidad.

La salinidad es detectada primeramente por el sistema radicular y tiene un efecto sobre el crecimiento, expansión celular, el proceso metabólico cambiante, la longitud de brotes, el desarrollo de hojas y el crecimiento radicular. En el corto plazo provoca que la presión osmótica aumente y de esta forma causa en las plantas un estrés hídrico; a largo plazo, toxicidad iónica inducida por sal, debido al desequilibrio de nutrientes. Las altas concentraciones de sal son unos de los principales factores de estrés abiótico dañinos (Yildiz *et al.*, 2020).

Acosta-Motos *et al.* (2017) mencionan que un sistema de raíces adecuado puede garantizar la absorción de agua y nutrientes en condiciones salinas y además mejora la resistencia de las plantas a las condiciones de estrés salino. Tener una mayor proporción de raíces bajo estrés salino puede favorecer la retención de iones tóxicos, lo que puede ser un mecanismo importante de resistencia de la planta en condiciones salinas.

La evaluación fenotípica en la etapa de plántula en condiciones de estrés se considera un enfoque práctico, porque es un método efectivo, de bajo costo y además que ahorra espacio y tiempo (Meeks *et al.*, 2013).

Li *et al.* (2015) investigaron la variación genética de la raíz del cultivo de maíz en respuesta al estrés por sequía en etapas tempranas, y encontraron que la variación genética expresada en la raíz se puede utilizar como criterio de selección.

### **Producción de materia seca y su relación en la concentración de nutrientes**

Se ha demostrado que la salinidad altera la producción normal de materia seca en las plantas de maíz, provocando una serie de cambios en este cultivo, como la reducción de la biomasa (Zörb *et al.*, 2015). Existe un efecto en donde el aumento de producción de biomasa provoca una dilución en los niveles de nutrientes de los tejidos, esto ocurre cuando la tasa de producción de materia seca es mayor que la velocidad de absorción de los nutrientes o el transporte del elemento hacia la parte vegetativa, provocando una dilución en el tejido foliar (Correndo y García, 2012).

Según Mengel y Kirkby (2000), existe una relación básica entre el contenido de nutrientes y el crecimiento de una planta, a medida que la velocidad de producción de biomasa aumenta, el contenido de nutrientes disminuye, lo cual provoca una dilución.

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

Con el fin de desarrollar genotipos de mejor rendimiento, se realizan pruebas masivas en situaciones de estrés salino para identificar el germoplasma tolerante a sal (Farooq *et al.*, 2015). Ensayos rápidos de tolerancia a la sal se han realizado sobre la base de algunos caracteres agronómicos durante las primeras etapas de crecimiento del maíz, donde los resultados mostraron que el crecimiento de las raíces en función de las concentraciones

de sal es útil para detectar de forma preliminar genotipos tolerantes a salinidad (Khan *et al.*, 2003).

Eker *et al.* (2006) realizaron un ensayo de tolerancia al estrés salino en etapas iniciales de maíz bajo condiciones de ambientes controlados, obtuvieron como resultados una gran variación genotípica en la tolerancia a la toxicidad del cloruro de sodio (NaCl) en el maíz, que debería ser aprovechada en programas de mejoramiento que tengan el objetivo de desarrollar variedades de maíz con alta tolerancia al NaCl.

Velázquez-Ventura *et al.* (2020) evaluaron líneas S<sub>1</sub> de dos poblaciones de maíz en condiciones con estrés y sin estrés por salinidad bajo condiciones de laboratorio e invernadero, encontrando que el peso seco de vástago y el peso seco de raíz, son útiles para realizar selección temprana de genotipos de maíz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético

El material genético utilizado en el ensayo de campo e invernadero consistió de 118 poblaciones de maíz de la raza Ratón originarias de los estados de Coahuila (83), Nuevo León (20) y Tamaulipas (15), procedentes del Centro de Conservación de Semillas Ortodoxas Región Norte ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), y dos testigos híbridos comerciales (Rx715 de Asgrow y 6818 de Syngenta).

### Establecimiento de experimentos

El estudio fue desarrollado en dos etapas: I) Evaluación de materiales genéticos en campo, en dos diferentes fechas de siembra, II) Evaluación en invernadero, bajo condiciones con y sin estrés por salinidad.

#### I. Ensayo en campo

El ensayo de campo fue establecido en la localidad de General Cepeda, Coahuila (25° 26' Latitud Norte y 101° 27' Longitud Oeste), bajo condiciones de riego. La localidad se encuentra a una altitud de 1350 msnm, con una temperatura media anual de 19.6 °C y con una precipitación anual de 414.6 mm (INEGI, 2021).

La siembra se realizó en húmedo en dos fechas de siembra durante el ciclo de Primavera-Verano, los días 18 y 25 de julio del 2020, respectivamente, con dos repeticiones por fecha de siembra. La unidad experimental estuvo constituida por un surco de 4 m, con una separación de 0.80 m, donde se sembraron 30 semillas espaciadas a 20 cm, y posteriormente se realizó un aclareo, dejando 22 plantas por unidad experimental, obteniéndose así una densidad de 62,500 plantas ha<sup>-1</sup>.

Los 120 genotipos se establecieron bajo el diseño de bloques incompletos con arreglo  $\alpha$ -láctice (Barreto *et al.*, 1997), en donde cada fecha de siembra fue considerada como ambiente. Con el programa CropStat se realizaron las aleatorizaciones de las unidades experimentales del ensayo de campo (IRRI, 2007).

El modelo lineal utilizado para el análisis de varianza de los datos de campo fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + R_{j(i)} + B_{k(ij)} + G_l + GA_{il} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:  $Y_{ijkl}$  = Variable respuesta;  $\mu$  = Media general;  $A_i$  = Efecto del  $i$ -ésimo ambiente;  $R_{j(i)}$  = Efecto de la  $j$ -ésima repetición dentro del  $i$ -ésimo ambiente;  $B_{k(ij)}$  = Efecto del  $k$ -ésimo bloque dentro del  $i$ -ésimo ambiente por la  $j$ -ésima repetición;  $G_l$  = Efecto del  $l$ -ésimo genotipo;  $GA_{il}$  = Efecto de la interacción del  $i$ -ésimo ambiente por el  $l$ -ésimo genotipo;  $\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental.

La variable evaluada de acuerdo al propósito de este trabajo fue el rendimiento de grano (REND) en  $t\ ha^{-1}$  ajustado a 15% de humedad. Para el cálculo del rendimiento de grano, en donde se determinó el porcentaje de desgrane con las siguientes fórmulas:

En la estimación del peso seco (PS) se multiplicó el peso de campo del grano (PC) por la parte complementaria al contenido de humedad:

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

Una vez calculado del peso seco, se procedió a obtener el rendimiento de campo en  $t\ ha^{-1}$  al 15% de humedad. En la estimación se multiplicó el peso seco por un factor de conversión (FC) de la siguiente forma:

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

Donde:

APU (Área parcela útil), fue definida a través del largo de surco (4 m) por la separación del surco (0.80 m); 100/85, fue un cociente para obtener el rendimiento al 15% de humedad de grano; 1,000, fue un valor utilizado para calcular el rendimiento en  $t\ ha^{-1}$ ; 10,000, es la superficie de una hectárea en  $m^2$ .

El análisis de la información consistió en un análisis de varianza usando un modelo mixto de acuerdo al diseño experimental y una comparación múltiple de medias de Tukey ( $\leq 0.05$ ) usando el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute Inc, 2015). Los ambientes,

genotipos y la interacción genotipos  $\times$  ambientes fueron considerados efectos fijos, el resto de los efectos en el modelo como aleatorios. Para la identificación de genotipos superiores se calculó un valor definido por la media más uno y dos veces el error estándar de la media ( $\mu + \varepsilon\varepsilon$ ;  $\mu + 2\varepsilon\varepsilon$ ).

## **II. Ensayo en invernadero**

El ensayo fue establecido en el invernadero número dos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, México. En el invernadero se registró la temperatura y la humedad relativa, utilizando un datalogger marca ONSET HOBO. La temperatura promedio registrada durante el desarrollo del experimento fue de 26.5 y 18.7 °C y humedad relativa promedio de 54.1 y 70.4 %, durante el día y noche respectivamente.

Por cuestiones de espacio y manejo, cada repetición (bloque) fue establecida en cuatro diferentes fechas de siembra, con y sin estrés por salinidad, con una duración de cinco semanas. La unidad experimental consistió de dos plantas de cada material genético. El experimento fue sembrado en macetas de polietileno negro de 6 x 20 cm (0.56 L), las cuales contenían un sustrato compuesto de Peat-Moss, Perlita y Vermiculita en relación 2:1:1 respectivamente. Se sembraron tres semillas por maceta, a tres centímetros de profundidad y posteriormente, cuando estas emergieron se eliminó una planta, dejando solo dos plantas por maceta. Ambos tratamientos (con y sin estrés salino) no recibieron ningún tipo de fertilización.

Para definir la concentración de NaCl, se utilizó como referencia la investigación realizada por García (2016), en donde investigó 14 diferentes concentraciones de NaCl en el cultivo de maíz, y encontró que el punto crítico de tolerancia a este tipo de estrés es de 22.80 mS/cm (16.29 g L<sup>-1</sup>), por lo cual se decidió utilizar una concentración menor de 18.57 mS/cm (13.03 g L<sup>-1</sup>).

Los riegos para las plantas estuvieron conformados para dos tipos de condiciones; una de estrés con solución salina de NaCl en una concentración de 13.03 g L<sup>-1</sup> (18.57 mS/cm) y otra en condiciones de no estrés por la aplicación de agua destilada, en donde las condiciones fueron consideradas como ambientes. La cantidad aplicada de solución salina, como de agua destilada, fue de 100 ml por maceta con un intervalo de riego de siete días.

Para apoyar a las plantas en la etapa de germinación y emergencia, se aplicó un riego de auxilio al tercer día después de la siembra, con el motivo de reponer la solución perdida en la parte superior de la maceta. Durante el periodo de duración del experimento, se buscó mantener la humedad necesaria en las macetas. Después de cada riego se realizaron lecturas de conductividad eléctrica de forma directa en el sustrato, con el medidor portátil de conductividad para suelo Hanna HI993310 ®.

En el ensayo de invernadero se establecieron 120 genotipos en los meses de junio, julio y agosto del año 2021 bajo el diseño experimental de parcelas divididas establecido en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, en donde el factor A fueron los ambientes (con / sin sal) y el factor B fueron los genotipos. Las aleatorizaciones de las unidades experimentales del ensayo de invernadero, se realizaron con el programa CropStat (IRRI, 2007).

Con ayuda de un medidor portátil SPAD 501 Konica Minolta, a lo largo de la duración del ensayo, se realizaron muestreos (MUE) del contenido de clorofila (CLO) en unidades SPAD (Índice de contenido relativo de clorofila). El primer muestreo se realizó a los 14 días después de la siembra, y posteriormente los muestreos fueron semanalmente. El muestreo se realizó en la última hoja ligulada, en donde se tomó la lectura en una planta de la unidad experimental y se realizaron tres lecturas en la misma hoja, así obteniendo un promedio. El equipo de medición (SPAD 501) captura la medida del contenido de clorofila como un valor matemático, que es denominado unidades SPAD, utilizando métodos espectrofotométricos (Konica Minolta Inc, 2009).

Una vez transcurridas las cinco semanas, las raíces fueron extraídas del sustrato con cuidado. Posteriormente, cada planta se seccionó en dos partes (vástago y raíz), y luego se depositaron en bolsas de papel de estraza, para someterlas a secado en una estufa a 70° C por 48 horas. Cuando el tiempo transcurrió, se pesaron en una balanza analítica y el resultado fue expresado como peso seco de vástago (PSV) y peso seco de raíz (PSR), en mg planta<sup>-1</sup>.

Para el análisis de varianza de los datos de peso seco de raíz (PSR) y peso seco vástago (PSV) del ensayo de invernadero se utilizó el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + A_j + BA_{ij} + G_k + AG_{jk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:  $Y_{ijkl}$  = Variable respuesta;  $\mu$  = Media general;  $B_i$  = Efecto del  $i$ -ésimo bloque;  $A_j$  = Efecto del  $j$ -ésimo ambiente;  $BA_{ij}$  = Efecto del  $i$ -ésimo bloque por el  $j$ -ésimo ambiente;  $G_k$  = Efecto del  $k$ -ésimo genotipo;  $AG_{jk}$  = Efecto de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente por el  $k$ -ésimo genotipo;  $\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental.

El modelo lineal utilizado para el análisis de varianza de los datos de clorofila (CLO) del ensayo de invernadero fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + A_j + BA_{ij} + G_k + M_l + AG_{jk} + AM_{jl} + AGM_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:  $Y_{ijkl}$  = Variable respuesta;  $\mu$  = Media general;  $B_i$  = Efecto del  $i$ -ésimo bloque;  $A_j$  = Efecto del  $j$ -ésimo ambiente;  $BA_{ij}$  = Efecto del  $i$ -ésimo bloque por el  $j$ -ésimo ambiente;  $G_k$  = Efecto del  $k$ -ésimo genotipo;  $M_l$  = Efecto del  $l$ -ésimo muestreo;  $AG_{jk}$  = Efecto de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente por el  $k$ -ésimo genotipo;  $AM_{jl}$  = Efecto de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente por el  $l$ -ésimo muestreo;  $AGM_{jkl}$  = Efecto de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente por el  $k$ -ésimo genotipo por el  $l$ -ésimo muestreo;  $\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental.

Se realizó análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental usando un modelo mixto y una comparación múltiple de medias de Tukey ( $\leq 0.05$ ) con el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute Inc, 2015). Los ambientes, genotipos, muestreos y las interacciones entre ellos fueron considerados efectos fijos, el resto de los efectos en el modelo como aleatorios. Para la identificación de genotipos superiores se calculó un valor definido por la media más uno y dos veces el error estándar de la media ( $\mu + \varepsilon\varepsilon$ ;  $\mu + 2\varepsilon\varepsilon$ ).

### **Análisis de correlación**

Se realizó un análisis de correlación simple de Pearson ( $r$ ) entre peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y el rendimiento de grano (REND), con los 120 genotipos evaluados, utilizando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{COV_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2} \sqrt{\sigma_y^2}}$$

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

### **Coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ )**

Para analizar la heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) de los caracteres de peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), contenido de clorofila (CLO) y el rendimiento de grano (REND), se utilizó la ecuación dada por Hallauer *et al.* (2010). Según Yan y Holland (2010),  $H^2$  es un indicativo de utilidad del ensayo en la evaluación del genotipo, donde  $H^2 = 1$  significa que las diferencias observadas en las medias genotípicas en el ensayo se deben enteramente a efectos genéticos;  $H^2 = 0$  indica que las diferencias observadas se deben completamente a los efectos ambientales. Este parámetro se estimó con la siguiente fórmula:

$$H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_e^2/re + \sigma_{ge}^2/e + \sigma_g^2}$$

Dónde:  $H^2$  = Coeficiente de heredabilidad en sentido amplio;  $\sigma_g^2$  = Estimador de varianza de genotipos;  $\sigma_e^2$  = Estimador de varianza de ambientes;  $\sigma_{ge}^2$  = Estimador de varianza de la interacción genotipos por ambientes;  $r$  = número de repeticiones y  $e$  = número de ambientes.

Para la obtención de los estimadores de componentes de varianza, se utilizó el procedimiento PROC MIXED de SAS (Statistical Analysis System) (SAS Institute Inc, 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de varianza

En esta sección se presentan los resultados de investigación de las variables peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), contenido de clorofila (CLO) y rendimiento de grano (REND), con la finalidad dar respuesta a los objetivos establecidos en el presente trabajo y además realizar la comprobación de las hipótesis establecidas. Los datos de las cuatro variables estudiadas proceden de los ensayos de campo e invernadero.

En este apartado, se trata el análisis de varianza (ANVA), en el cual se busca explicar y discutir en forma general, el comportamiento biológico de los genotipos evaluados. El ANVA se presenta en dos secciones, el ensayo de campo y el ensayo de invernadero.

En el Cuadro 1 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza y sus respectivas significancias de cada fuente de variación para la variable de rendimiento de grano (REND), obtenidas en campo.

**Cuadro 1.** Cuadrados medios del análisis de varianza de rendimiento de grano, en la localidad de General Cepeda, Coahuila, 2020.

F.V.	gl	REND (t ha <sup>-1</sup> )
Ambientes (Amb)	1	0.00
Repeticiones (Rep) / Amb	2	22.59 *
Bloques / (Amb x Rep)	48	2.30 **
Genotipos (Gen)	119	2.02 **
Amb × Gen	119	1.06
Error	190	0.86
C.V. (%)		18.66

\*, \*\*, Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; F.V.= Fuente de variación; gl= Grados de libertad; REND= Rendimiento de grano.

En los genotipos evaluados (poblaciones y testigos) se encontraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ), lo cual se debe a la variación presentada entre las poblaciones de la raza Ratón y los dos testigos utilizados.

En la interacción ambientes  $\times$  genotipos no existieron diferencias significativas para rendimiento de grano, esto indica que el comportamiento que exhibieron los genotipos utilizados en los dos ambientes (fechas de siembra) fue muy similar.

En este sentido, Ruiz *et al.* (2008) mencionan que existe variación entre y dentro de razas de maíz, debido a su lugar de adaptación (altitud, temperatura media anual, precipitación anual y duración de día).

A continuación, en el Cuadro 2, se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza y sus respectivas significancias de cada fuente de variación, en las variables peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y contenido de Clorofila (CLO), obtenidas del ensayo de invernadero.

**Cuadro 2.** Cuadrados medios del análisis de varianza de la producción de materia seca en ensayo de invernadero.

F.V.	gl	PSV	PSR	F.V.	gl	CLO
		(mg)	(mg)			(SPAD)
Bloques (Blo)	3	425,128.91	55,399.13	Bloques (Blo)	3	1,212.87
Ambientes (Amb)	1	17,892,904.28 **	447,613.52	Ambientes (Amb)	1	32,286.00 *
Blo × Amb	3	474,855.59 **	135,371.06 **	Blo × Amb	3	1,290.63 **
Genotipos (Gen)	119	40,051.24 **	5,294.60 **	Genotipos (Gen)	119	27.43 **
Amb × Gen	119	15,098.81	2,142.65	Muestreo (Mue)	3	11,554.33 **
Error	712	13,993.44	1,826.55	Amb × Gen	119	21.21 *
CV (%)		26.98	29.64	Amb × Mue	3	953.82 **
				Amb × Gen × Mue	714	11.35
				Error	2833	15.97
				CV (%)		12.02

\*, \*\*, 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, CLO = Contenido de clorofila.

Respecto a la fuente de variación ambientes (Amb), se encontraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) en las variables peso seco de vástago (PSV) y el contenido de clorofila (CLO), mientras que en peso seco de raíz (PSR) no se encontraron diferencias.

En la fuente de variación genotipos (Gen), se encontraron diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) para todas las variables, lo cual se debe a la variación existente dentro de la población raza Ratón, y sus diferentes orígenes (Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas).

En lo que respecta en la interacción de Genotipos x Ambientes (Gen x Amb) no se encontraron diferencias significativas para las variables peso seco de vástago y peso seco de raíz, esto indica que los genotipos mostraron un comportamiento similar tanto en el ambiente en condiciones de estrés salino, como en el ambiente sin estrés salino. En la variable del contenido de clorofila sí se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ), lo que significa que la respuesta en el contenido de clorofila fue diferente en los ambientes utilizados.

Se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) entre muestreos (Mue), lo anterior indica que en cada una de las semanas que el experimento atravesó, el contenido de clorofila fue diferente.

Considerando que en el ensayo de invernadero no hubo fertilización, Bänziger *et al.* (2012) comparten un punto de vista que permite analizar el fenómeno de la relación vástago-raíz, en donde mencionan que el N es el nutriente que la planta requiere en más grandes cantidades y este está estrechamente relacionado con la producción de biomasa vegetativa y el contenido de clorofila, además mencionan que en condiciones de estrés por deficiencia de N, las plantas favorecen el crecimiento de raíces más que el crecimiento vástago y, por consecuencia, la proporción raíz: vástago aumenta.

En el Cuadro 3 se presentan las medias de los ambientes de evaluación del ensayo de invernadero.

**Cuadro 3.** Medias de los ambientes de evaluación de los 120 genotipos evaluados en invernadero.

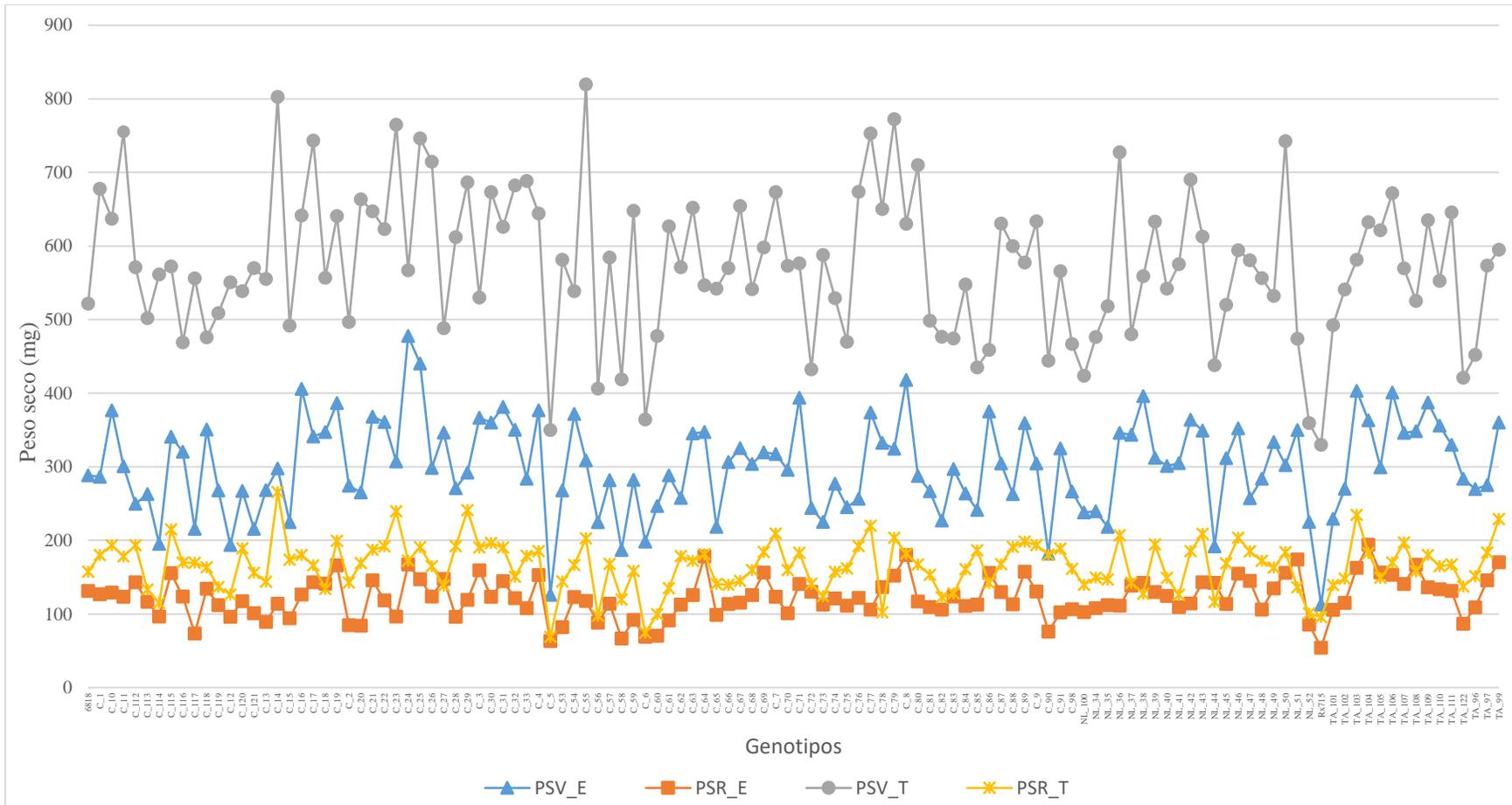
<b>Ensayo en invernadero</b>			
Ambientes	PSR (mg)	PSV (mg)	CLO (SPAD)
Testigo	165.57 a	574.63 a	30.37 b
Estrés	122.68 a	301.73 b	36.20 a
<b>Media</b>	144.17	438.47	33.26
<b>Tukey (<math>\alpha=0.05</math>)</b>	75.66	141.71	0.25

Valores con la misma letra en la columna no son estadísticamente diferentes; PSR y PSV = Peso seco del sistema radical y vástago; CLO = Contenido de clorofila, respectivamente.

De acuerdo con el Cuadro 3, el PSR bajo condiciones de estrés salino disminuyó un 25.9% respecto al PSR sin estrés salino (testigo). Por otro lado, el PSV bajo condiciones de estrés se redujo un 47.5% respecto al PSV sin estrés. Finalmente, el contenido de clorofila (CLO) fue un 16.1 % mayor bajo condiciones de estrés salino respecto a condiciones sin estrés salino.

Iqbal *et al.* (2020) mencionan que, aunque la raíz es el primer órgano expuesto al estrés por sal, los brotes son más sensibles al estrés por sal que las raíces.

Con el objeto de explorar el comportamiento de los genotipos en los ambientes de evaluación se realizó la Figura 1, en donde se muestra el promedio de peso seco de vástago (PSV) y peso seco de raíz (PSR) de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero realizado en el año 2021.

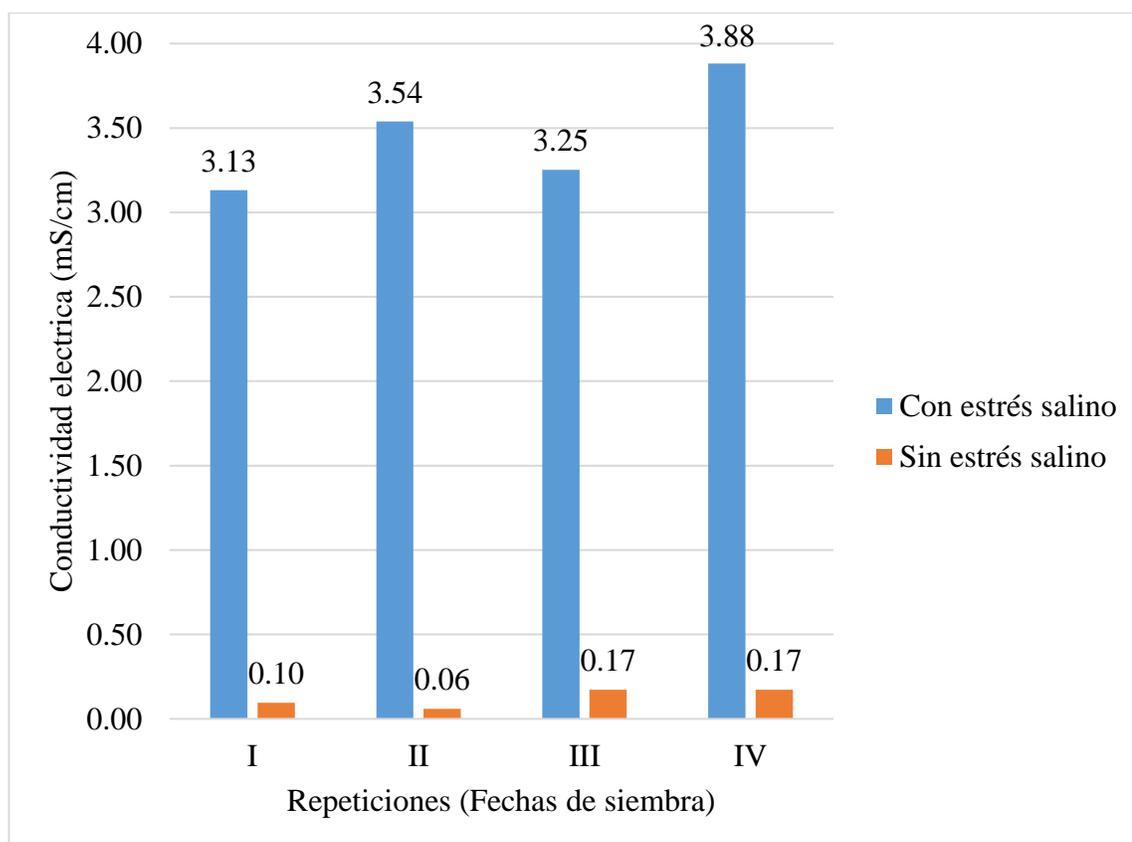


**Figura 1.** Promedio de peso seco de vástago y raíz de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero en los ambientes con y sin estrés salino, realizado en el 2021. PSR = Peso seco de raíz; PSV = Peso seco de vástago; E y T, Estrés por salinidad y Testigo (sin sal), respectivamente.

De acuerdo con la Figura 1, se observa un comportamiento similar de los genotipos en la producción de peso seco de vástago (PSV) y peso seco de raíz (PSR) a través de los dos ambientes utilizados (con y sin estrés por salinidad), es decir, la ausencia de interacción Genotipos x Ambientes tal como se indicó en el Cuadro 1.

Yan y Kang (2003) explican la importancia de la interacción genotipo ambiente desde el punto de vista de selección, en donde mencionan que cuando no existe una interacción genotipo ambiente cualquier ambiente debería ser suficiente para seleccionar los mejores genotipos.

En la Figura 2 se muestra el promedio de conductividad eléctrica del sustrato por repetición (fecha de siembra), en el invernadero durante el año 2021.



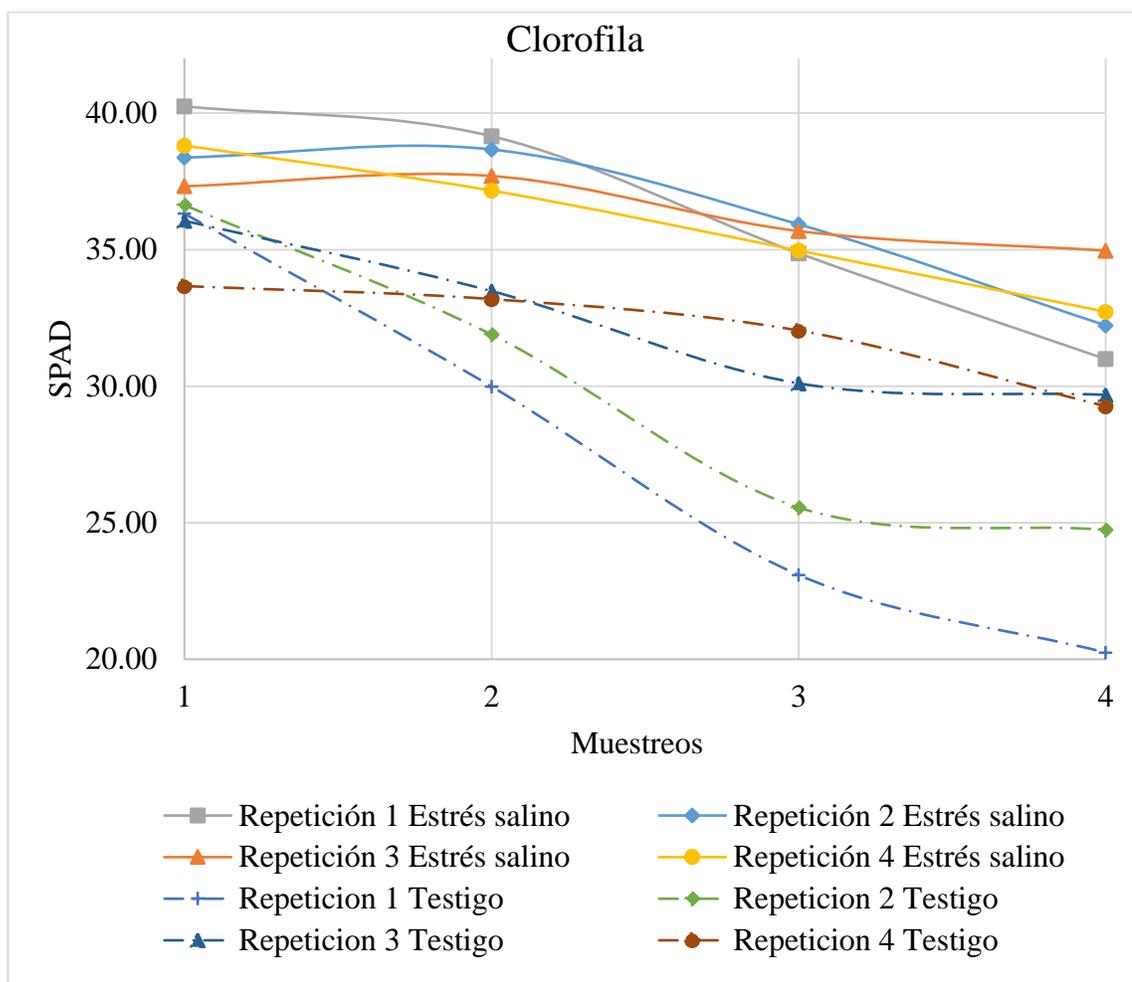
**Figura 2.** Promedio de conductividad eléctrica del sustrato por repetición (fecha de siembra), en los ensayos con y sin estrés salino en invernadero en el 2021.

En la Figura 2 se observa que la conductividad eléctrica a la que la planta de maíz fue expuesta varió de 3.13 a 3.88 mS/cm, con una media de 3.45 mS/cm.

Leland y Mass (1999), mencionan que el cultivo de maíz comienza a ser afectado cuando las conductividades eléctricas son superiores a 1.7 mS/cm.

García (2016) realizó un estudio, en donde investigó 14 diferentes concentraciones de NaCl en el cultivo de maíz, y encontró que el punto crítico de tolerancia a este tipo de estrés es de 22.80 mS/cm ( $16.29 \text{ g L}^{-1}$ ), en donde existió una reducción del 90.5% en vigor y un 66.2% en germinación.

Con el fin de explorar las diferencias encontradas en los muestreos (Mue) de acuerdo con los resultados obtenidos en el Cuadro 2, se realizó la Figura 3, en donde se muestra el promedio del contenido de clorofila (CLO) por cada muestreo de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero realizado en el 2021.



**Figura 3.** Promedio de contenido de clorofila (unidades SPAD) por muestreo de los 120 genotipos utilizados en el ensayo de invernadero realizado en el 2021.

De acuerdo con la Figura 3, los materiales genéticos expuestos a estrés salino mostraron un contenido de clorofila (CLO) superior respecto a los genotipos que no estuvieron en estrés salino. En ambos ambientes (con y sin estrés salino) se observó que a medida que avanza el desarrollo de la planta, el contenido de clorofila disminuye, sin embargo en el ambiente sin estrés salino (testigo) la reducción fue del 26.8% del contenido de clorofila inicial respecto al contenido de clorofila final, mientras que en el CLO en condiciones de estrés salino la reducción fue del 11.61%.

Lo anterior puede ser explicado debido a que los materiales que no estuvieron expuestos a sal, mostraron una mayor producción de biomasa, lo cual provocó un agotamiento de nutrientes, debido a que ellos nunca recibieron ningún tipo de fertilización.

Piekielek y Fox (1992) mencionan que valores SPAD inferiores a 43.4 es el nivel crítico del contenido de clorofila en maíz, en donde indica una deficiencia del contenido de N. Correndo y García (2012) mencionan que existe un fenómeno en donde el aumento de producción de materia seca provoca una dilución de nutrientes en los tejidos cuando no existe aportación de nutrientes.

### **Potencial de rendimiento de los genotipos evaluados**

En el Cuadro 4 se presentan las medias de peso seco (vástago y raíz), contenido de clorofila y rendimiento de grano de los 20 genotipos superiores con base en el peso seco de raíz en condiciones de estrés salino.

**Cuadro 4.** Rendimiento promedio de materia seca, contenido de clorofila y rendimiento de grano de los 20 genotipos superiores de maíz con base en el peso seco de raíz en condiciones de estrés salino.

Genotipo	Ensayo en invernadero						Ensayo de campo
	PSR_E (mg)	PSV_E (mg)	PSR_T (mg)	PSV_T (mg)	CLO_E (SPAD)	CLO_T (SPAD)	REND (t ha <sup>-1</sup> )
<b><u>Poblaciones</u></b>							
TA_104	194.00 **	363.08 *	182.79	632.26	35.51	30.29	5.48 *
C_8	179.95 **	417.78 **	182.09	629.95	35.40	30.00	5.60 *
C_64	178.23 **	347.14	181.36	546.60	37.11	30.44	5.42
NL_51	173.94 **	349.74 *	136.06	473.74	37.50 *	31.53	4.20
TA_99	170.41 **	360.23 *	228.91 **	594.94	38.08 *	31.14	4.55
C_24	167.39 **	477.58 **	172.68	566.93	36.52	31.11	5.31
TA_108	166.81 **	348.39	157.88	525.51	32.70	29.65	6.61 **
C_19	165.93 **	386.50 *	199.40 *	640.51	35.00	30.32	4.32
TA_103	162.59 **	403.31 **	234.49 **	581.48	36.68	29.68	5.03
C_3	159.40 *	366.70 *	190.23 *	529.91	38.14 *	30.07	5.36
C_89	157.45 *	359.16 *	198.38 *	577.64	36.64	31.64	4.96
C_69	156.35 *	319.53	184.41	598.04	37.49 *	28.51	6.33 **
TA_105	156.20 *	299.29	149.24	621.48	37.79 *	29.17	5.07
NL_50	155.96 *	302.39	183.71	742.33 **	36.99	30.43	4.87
C_86	155.81 *	375.26 *	142.00	458.74	36.46	31.16	6.19 **
C_115	155.49 *	340.98	214.84 **	572.39	36.70	30.51	4.62
NL_46	154.71 *	352.14 *	203.50 *	594.34	40.00 **	31.68	4.80
TA_106	153.41 *	401.04 **	169.93	671.68 *	36.75	30.40	4.97
C_4	152.69 *	376.63 *	185.35	644.19 *	36.39	30.24	5.36
C_79	152.11 *	324.46	203.38 *	772.13 **	35.68	27.92	5.63 *
<b><u>Testigos</u></b>							
Rx715	54.31	112.65	95.90	329.73	33.85	29.45	7.91 **
6818	131.19	288.24	157.50	521.75	36.62	30.92	6.08 **
<b>Media general</b>	122.68	301.73	165.57	574.63	36.20	30.37	4.97
<b>EE</b>	19.21	47.51	23.36	68.88	1.22	1.33	0.52

\*, \*\*, selección con base  $\mu+EE$  y  $\mu+2EE$ , respectivamente; REND = Rendimiento de grano; PSR = Peso seco de raíz; PSV = Peso seco de vástago; CLO = Clorofila; E y T, Estrés por salinidad y Testigo (sin sal); EE= Error estándar de la media.

Con base en el PSR\_E, los nueve genotipos superiores (Cuadro 4) representan la selección bajo condiciones de estrés salino. Adicionalmente, de acuerdo con el Cuadro 4, el material que mostró el mejor comportamiento en peso seco de raíz (PSR\_E) y peso seco de vástago (PSV\_E), en condiciones de estrés salino y además con un buen comportamiento en rendimiento de grano (REND) fue el genotipo C\_8. Caso similar el de la población TA\_104, al tener valores sobresalientes en PSR y PSV bajo condiciones de estrés (PSV\_E) y rendimiento de grano aceptable (REND). Finalmente, un material que destacó con un excelente rendimiento de grano (REND) y además, con un buen comportamiento en peso seco de raíz (PSR\_E) y peso seco de vástago (PSV\_E) en condiciones de estrés salino, fue la población de la raza Ratón C\_86.

Cabe resaltar que, de los 120 genotipos utilizados en esta investigación (118 poblaciones de la raza Ratón y los testigos Rx715 y 6818), solo fueron seleccionados por su buen comportamiento, poblaciones de la raza Ratón, es decir, ninguno de los testigos utilizados (híbridos), mostraron un buen comportamiento en condiciones de estrés salino. Sin embargo, los híbridos obtuvieron los rendimientos superiores, donde también estaban las poblaciones TA\_108, C\_69, C\_86 con rendimientos de grano sobresalientes y además una buena respuesta en la producción de materia seca de raíz.

Layne-Garsaball *et al.* (2008) indican que la tolerancia a la salinidad dependerá de las condiciones ambientales y de la habilidad que posea para controlar la absorción y el transporte de sodio al tejido fotosintético. Según Munns (2005), el principal mecanismo de tolerancia a condiciones salinas está relacionado con la capacidad de las raíces para regular la llegada de sales al vástago, con el fin de dividir las sales a nivel celular y que no sea acumulada en concentraciones tóxicas en las hojas.

Nájera *et al.* (2010) encontraron que la raza Ratón muestra un gran potencial de rendimiento de grano y estabilidad agronómica, siendo así esta raza una fuente de características de rendimiento para incorporar a programas de mejoramiento. Espinosa *et al.* (2019) llevaron a cabo un estudio de 63 poblaciones nativas de maíz representativas del sureste del estado de Coahuila, en donde la raza Ratón fue una de las razas que mostraron un potencial de rendimiento sobresaliente.

Li *et al.* (2015) investigaron la respuesta al estrés por sequía en la etapa temprana en el cultivo de maíz, y encontraron que la variación genética expresada en la raíz se puede emplear como criterio de selección. Leach *et al.* (2011) mencionaron que un buen sistema de raíces es de gran importancia para que el cultivo de maíz pueda establecerse en condiciones de estrés. Otros efectos de la salinidad del suelo en las plantas son el lento o detenido crecimiento y desarrollo de las raíces y brotes, desaceleración de la germinación, principalmente a través de procesos fisiológicos como el cierre de las estomas y el deterioro de la actividad fotosintética (Yildiz *et al.*, 2020).

### Análisis de correlación

En el Cuadro 5 se presentan las correlaciones de Pearson ( $r$ ) entre las variables de peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y rendimiento de grano (REND) en los diferentes ensayos y condiciones ambientales establecidas.

**Cuadro 5.** Coeficientes de correlación del rendimiento de grano y materia seca de los genotipos de maíz utilizados en invernadero y campo.

	Ensayo en invernadero			Ensayo de campo
	PSR_E	PSV_T	PSR_T	REND
PSV_E	0.729 **	0.500 **	0.509 **	0.008
PSR_E		0.323 *	0.434 **	-0.008
PSV_T			0.658 **	-0.024
PSR_T				-0.040

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

De acuerdo con el Cuadro 5, se encontró una correlación alta, positiva y significativa ( $P \leq 0.01$ ) entre PSV\_E y PSR\_E ( $r = 0.729$ ). Se detectaron correlaciones moderadas, entre PSV\_T y PSR\_T ( $r = 0.658$ ), PSV\_E y PSV\_T ( $r = 0.500$ ), PSV\_E y PSR\_T ( $r = 0.509$ ) y PSR\_E y PSR\_T ( $r = 0.434$ ), todas positivas y significativas ( $P \leq 0.01$ ). Finalmente se encontró una correlación baja, positiva y significativa ( $P \leq 0.05$ ) entre PSR\_E y PSV\_T

( $r = 0.323$ ). Se encontró correlación positiva entre peso seco de vástago y raíz en condiciones de estrés y no estrés por salinidad. Los resultados no muestran asociación entre los caracteres de PSV y PSR con rendimiento de grano. Lo anterior concuerda con Cervantes *et al.* (2014), en donde mencionan que la etapa inicial tiene una correlación baja con la etapa adulta de la planta de maíz.

Aunque la producción temprana de raíz no tiene correlación con el rendimiento de grano, Li *et al.* (2015) mencionan que un buen crecimiento y desarrollo de este órgano, contribuye a mejorar el establecimiento de la planta y además permite que la planta sobreviva a condiciones estresantes, por consecuencia, estos autores encontraron que el peso seco de vástago y el peso seco de raíz en etapas iniciales, se puede utilizar como criterio de selección temprana de genotipos de maíz con tolerancia al estrés. De manera similar, Giaveno *et al.* (2007) reportaron que el peso seco de plántula del cultivo de maíz en condiciones de estrés salino puede usarse como criterio de selección para tolerancia a la salinidad.

### **Coefficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ )**

En el Cuadro 6, se presentan los estimadores de componentes de varianza de genotipos ( $\sigma_g^2$ ), varianza de ambientes ( $\sigma_e^2$ ), varianza de la interacción genotipos por ambientes ( $\sigma_{ge}^2$ ), y coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) para los caracteres peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), contenido de clorofila (CLO) y rendimiento de grano (REND).

**Cuadro 6.** Estimadores de componentes de varianza y coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) para los caracteres peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) contenido de clorofila (CLO) y rendimiento de grano (REND).

Carácter	$\sigma_g^2$	$\sigma_{ge}^2$	$\sigma_e^2$	$H^2$
PSV	3149.67	295.31	13989.00	0.62
PSR	397.99	78.53	1827.85	0.60
CLO	0.00	0.00	11.79	0.00
REND	0.27	0.16	0.84	0.49

PSR= Peso seco de raíz, PSV= Peso seco de vástago, REND= Rendimiento de grano;  $\sigma_g^2$  = Varianza genotípica;  $\sigma_{ge}^2$ = Varianza de la interacción genotipo por ambiente;  $\sigma_e^2$  = Varianza ambiental;  $H^2$ = Coeficiente de heredabilidad en sentido amplio.

De acuerdo con el Cuadro 6, se obtuvieron valores del coeficiente de heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) de 0.60 y 0.62 para los caracteres peso seco de raíz (PSR) y peso seco de vástago (PSV), respectivamente. En el caso del contenido de clorofila (CLO) se obtuvo un valor de  $H^2$  del 0.00, finalmente el rendimiento de grano (REND) mostró una  $H^2$  de 0.49. Se logró revelar que el contenido de clorofila (CLO), no es de utilidad para efectos de selección en la etapa temprana de desarrollo, debido a que el total de la variación se debió a efectos ambientales. Ali *et al.* (2013) en un estudio de vigor híbrido para tolerancia a sequía reportan valores de heredabilidad de 0.90 y 0.76 para peso seso de raíz y peso seco de vástago, respectivamente. También, en la evaluación de cuatro genotipos de maíz para tolerancia a sequía, Haseeb *et al.* (2020) reportan heredabilidades de 0.89 y 0.90 para peso seco de raíz y peso seco de vástago, respectivamente. Sin embargo, en la evaluación de líneas endogámicas bajo condiciones de estrés hídrico, Masood *et al.* (2020) reportan valores de heredabilidad para PSR y PSV de 0.49 y 0.47, y de 0.34 y 0.46 para las condiciones de ambientes normal y de estrés, respectivamente. En la evaluación de líneas endogámicas de maíz bajo diferentes niveles de N, Abdel-Ghani *et al.* (2013), reportan valores estimados de heredabilidad de 89.6 y 0.83 para peso seco de raíz y peso seco de vástago, respectivamente. Lo anterior indica la importancia de los caracteres PSR y PSV en la selección de genotipos de maíz en etapas tempranas de desarrollo.

## CONCLUSIONES

Se determinó que existe variación genética entre las poblaciones estudiadas de la raza Ratón para los caracteres peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR) y rendimiento de grano (REND) lo que permite realizar selección.

Se identificaron genotipos sobresalientes en la respuesta al estrés por salinidad con base en el peso seco de raíz lo que permite un buen establecimiento y desarrollo de la planta.

Bajo las condiciones de evaluación se evidencia buen potencial de rendimiento de las poblaciones estudiadas con capacidad de competir contra los híbridos.

Entre los caracteres peso seco de vástago y peso seco de raíz con el rendimiento de grano no se encontró relación; sin embargo, se identificaron genotipos sobresalientes (TA\_104, TA\_108, C\_86 y C\_69) con base en el peso seco de raíz con tolerancia al estrés por salinidad.

## REFERENCIAS

- Abdel-Ghani, A. H., B. Kumar, J. Reyes-Matamoros, P. J. Gonzalez-Portilla, C. Jansen, J. P. San Martin, M. Lee, and T. Lübberstedt. 2013. Genotypic variation and relationships between seedling and adult plant traits in maize (*Zea mays* L.) inbred lines grown under contrasting nitrogen levels. *Euphytica* 189(1): 123-133. DOI 10.1007/s10681-012-0759-0.
- Acosta-Motos, J. R., M. F. Ortuño, A. Bernal-Vicente, P. Diaz-Vivancos, M. J. Sanchez-Blanco and J. A. Hernandez. 2017. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy* 7(18):1-38. doi: 10.3390/agronomy7010018.
- Ali, Q., A. Muhammad, F. Ali, S. Muhammad, M. Manzoor, N. H. Khan, S.M.A. Basra, and H. S. B. Mustafa. 2013. Genetic advance, heritability, correlation, heterosis and heterobeltiosis for morphological traits of maize (*Zea mays* L.). *Albanian Journal of Agricultural Sciences*. 12 (4): 689-698.
- Arce-Romero, A. R., A. I. Monterroso-Rivas, J. D. Gómez-Díaz and M. A. Palacios-Mendoza. 2018. Potential yields of maize and barley with climate change scenarios and adaptive actions in two sites in Mexico. *In*: Angelov P., J. A. Iglesia, and J. C. Corrales (eds). *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change. Proceedings of the International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change (AACC'17), November 22-24, 2017, Popayan, Colombia. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer 687: 197-208.* doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5\_15.
- Bänziger, M., G. O. Edmeades, D. Beck y M. Bellon. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de Nitrógeno en el maíz: De la teoría a la práctica. México, D.F. CIMMYT. 61 p.
- 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.*
- Butcher, K., A. F. Wick, T. DeSutter, A. Chatterjee and J. Harmon. 2018. Corn and soybean yield response to salinity influenced by soil texture. *Agronomy Journal* 110(4): 1243–1253. doi: 10.2134/agronj2017.10.0619.
- Cervantes, O. F., M. T. Gasca O., E. Andrio E., M. Mendoza E., L. P. Guevara A., F. Vázquez M. y S. Rodríguez H. 2014. Densidad de población y correlaciones fenotípicas en caracteres agronomicos y de rendimiento en genotipos de maíz. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 2(1): 9-16.

- Chrispeels, J. M. and D. E. Sadava. 2003. *Plants, genes and crop biotechnology*. Second edition (ed.). Jones and Bartlett Publishers. USA. 211p.
- Correndo, A. A. y F. O. García. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo agronómico*. 14: 1-8.
- Corwin, D. L. 2020. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science* 72(2): 842-862. doi.org/10.1111/ejss.13010.
- Eker, N., G. Cömertpay, Ö. Konuşkan, A. C. Ülger, L. Öztürk and I. Çakmak. 2006. Effect of salinity stress on dry matter production and ion accumulation in hybrid maize varieties. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 30: 365-373.
- Espinosa T., L. C., F. Rincón S., N. A. Ruiz T., J. M. Martínez R. y A. Benavides M. 2019. Respuesta ambiental de poblaciones nativas de maíz del sureste de Coahuila, México. *Nova scientia* 11(23): 108-125. doi.org/10.21640/ns.v11i23.1931.
- Falconer, D. S. and T. F. C. Mackay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th ed. Longman, Harlow, England.
- Farooq, M., M. Hussain, A. Wakeel and K. H. M. Siddique. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35(2):461–481. doi 10.1007/s13593-015-0287-0.
- 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 Profesional en Tecnología de Granos y Semillas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah, México. 49 p.
- Giaveno, C. D., R. Vasconcelos R., G. Maia S. and R. Ferraz O. 2007. Screening of tropical maize for salt stress tolerance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 7: 304-313.
- González-Martínez, J., M. Rocandio-Rodríguez, A. R. Contreras-Toledo, S. Joaquín-Cancino, V. Vanoye-Eligio, J. C. Chacón-Hernández y A. Hernández-Bautista. 2020. Diversidad morfológica y agronómica de maíces nativos del altiplano de Tamaulipas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43(4): 361-370.
- Goodman, M. M. and E. Paterniani. 1969. The races of maize: III. Choices of appropriate characters for racial classification. *Economic Botany* 23: 265-273.

- Hallauer, A. R., M. J. Carena and J. B. Miranda F. 2010. Handbook of plant breeding. Quantitative genetics in maize breeding. Vol. 6. Springer Science and Business Media. New York. doi:10.1007/978-1-4419-0766-0.
- Haseeb, A., A. Nawaz, M.Q.A. Rao, Q. Ali, and A. Malik. 2020. Genetic variability and association among seedling traits of *Zea mays* under drought stress conditions. Biological and Clinical Sciences Research Journal, 2020(1). DOI: <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2020i1.20>.
- INEGI. 2021. Climatología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Mapa>. Consulta realizada en noviembre de 2021.
- Iqbal, S., S. Hussain, M. Abdul Q., M. Ashraf and Saifullah. 2020. The response of maize physiology under salinity stress and its coping strategies. In: Hossain, A. (ed). Plant Stress Physiology. IntechOpen pp 1-25. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92213>.
- IRRI. 2007. CropStat for Windows Versión 7.2. International Rice Research Institute. Metro Manila, Philippines.
- Kato, Y., T. A., C. Mapes S., L. M. Mera O., J. A. Serratos H. y R. A. Bye B. 2009. Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F. 116 p.
- Khan, A. A., S. Ali R. and T. McNeilly. 2003. Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). Euphytica 131:81–89. doi:10.1023/A:1023054706489.
- Konica Minolta Inc. 2009. A lightweight handheld meter for measuring the chlorophyll content of leaves without causing damage to plants. Chlorophyll meter Spad-502plus. Disponible en : [https://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/spad502plus\\_catalog\\_eng.pdf](https://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/spad502plus_catalog_eng.pdf). Consulta realizada en noviembre de 2021.
- 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 (*Zea mays* L.) bajo condiciones de laboratorio. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 11(1): 17-25.
- Leach, K. A., L. G. Hejlek, L. B. Hearne, H. T. Nguyen, R. E. Sharp and G. L. Davis. 2011. Primary root elongation rate and abscisic acid levels of maize in response to water stress. Crop Science 51: 157–172. doi: 10.2135/cropsci2009.12.0708.

- Leland, E. F. and E. V. Maas. 1999. Crop response and management of salt-affected soils. M. Pessarakli (ed). Handbook of plant and crop stress, second edition. pp 169-201.
- Li, R., Y. Zeng, J. Xu, Q. Wang, F. Wu, M. Cao, H. Lan, Y. Lui and Y. Lu. 2015. Genetic variation for maize root architecture in response to drought stress at the seedling stage. *Breeding Science* 65(4): 298–307. doi:10.1270/jsbbs.65.298.
- Masood, M., M. Ahsan, H.A. Sadaqat, and F. Awan. 2020. Screening of maize (*Zea mays* L.) inbred lines under water deficit conditions. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, 2020(1). DOI: <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2020i1.7>
- Meeks, M., S. C. Murray, S. Hague and D. Hays. 2013. Measuring maize seedling drought response in search of tolerant germplasm. *Agronomy* 3(1): 135-147; doi:10.3390/agronomy3010135.
- Mengel, K. y E. A. Kirkby. 2000. Principios de nutrición vegetal 4<sup>a</sup> ed. International Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
- Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167(3): 645–663. doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x.
- Nájera C., L. A., F. Rincón S., N. A. Ruiz T. y F. Castillo. G. 2010. Potencial de rendimiento de poblaciones criollas de maíz de Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(4): 31-36.
- Noriega-Navarrete, J. L., R. Salazar-Moreno y I. L. López-Cruz. 2021. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(1): 127-140.
- Piekielek, W. P. and R. H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal* 84(1): 59-65.
- Rincón, S., F., F. Castillo G. y N. A. Ruiz T. (eds) 2010. Diversidad y Distribución de los Maíces Nativos en Coahuila, México. SOMEFI. Chapingo, Méx. 116 p.
- Rincon-Sanchez, F. and N. A. Ruiz-Torres. 2017. Genetic potential and usefulness of native maize populations in developing novel germplasm for current and upcoming goals. *In: Grillo, O. (ed). Rediscovery of Landraces as a Resource for the Future. IntechOpen* pp: 97-111. doi: 10.5772/intechopen.71360.
- 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: 1502-1512. doi:10.2135/cropsci2007.09.0518.

- SADER-ASERCA-CIMA. 2020. Reporte del mercado de Maíz. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA). Centro de Información de Mercados Agropecuarios (CIMA). Disponible en línea: <https://www.cima.aserca.gob.mx/swb/cima/Maiz> (Consulta realizada 22 agosto de 2020).
- Sánchez, G., J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54(1): 43-59. doi.org/10.1007/BF02866599.
- SAS Institute Inc. 2015. SAS/STAT® 14.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA.
- SIAP. 2020. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (Consulta realizada 7 junio de 2021).
- Spiertz, H. 2013. Challenges for crop production research in improving land use, productivity and sustainability. *Sustainability* 5: 1632-1644. doi:10.3390/su5041632.
- Valdez, V. 2014. Root hydraulics: The forgotten side of roots in drought adaptation. *Field Crops Research* 165: 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.03.017>.
- Velázquez-Ventura, J. C., F. Rincón-Sánchez, N. A. Ruíz-Torres y J. M. Martínez-Reyna. 2020. Respuesta al estrés por salinidad de familias S<sub>1</sub> de dos poblaciones de maíz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7(1): e2355. doi: 10.19136/era.a7n1.2355.
- Winterhalter, L., B. Mistele, S. Jampatong and U. Schmidhalter. 2011. High-throughput sensing of aerial biomass and above-ground nitrogen uptake in the vegetative stage of well-watered and drought stressed tropical maize hybrids. *Crop Science* 51: 479–489. doi: 10.2135/cropsci2010.07.0397.
- Yan, W. and J. B. Holland. 2010. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171:355–369. doi 10.1007/s10681-009-0030-5.
- Yan, W. and M. S. Kang. 2003. GGE biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomics. CRC Press LLC, New York. 271p.
- Yildiz, M., I. Poyraz, A. Çavdar, Y. Özgen and R. Beyaz. 2020. Plant responses to salt stress. *In: Abdurakhmonov I. Y. (ed). Plant Breeding - Current and Future Views. IntechOpen* pp 1-18. doi: 10.5772/intechopen.93920.
- Zahra, N., Z. A. Raza and S. Mahmood. 2020. Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting maize genotypes. *Agriculture*,

Agribusiness and Biotechnology 63: e20200072: 1-9. doi.org/10.1590/1678-4324-2020200072.

Zörb, C., K. H. Mühling, U. Kutschera and C. M. Geilfus. 2015. Salinity stiffens the epidermal cell walls of salt-stressed maize leaves: is the epidermis growth-restricting?. PLOS ONE 10(3): 1-15. doi:10.1371/journal.pone.0118406.