

**Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Agronomía
Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



T E S I S

**Tolerancia y variación a la salinidad en poblaciones de
chile silvestre (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*)**

**Para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

Presenta:

M.C. José Manuel Osuna Rodríguez

Director

Dr. Sergio Hernández Verdugo

Co-Director

Dr. Antonio Pacheco Olvera

Culiacán, Sinaloa, México. Septiembre del 2024



UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



CONTENIDO

La presente tesis titulada “**Tolerancia y variación a la salinidad en poblaciones de chile silvestre (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum***” fue realizada por JOSÉ MANUEL OSUNA RODRÍGUEZ, bajo la dirección del consejo particular que se indica, y ha sido APROBADA por el mismo, y ACEPTADA como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR:

DR. SERGIO HERNÁNDEZ VERDUGO

CO-DIRECTOR:

DR. ANTONIO PACHECO OLVERA

ASESOR:

DR. TOMÁS OSUNA ENCISO

ASESOR:

DR. SAÚL PARRA TERRAZA

ASESOR:

DR. CÉSAR ENRIQUE ROMERO HIGAREDA

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO. SEPTIEMBRE DEL 2024

DEDICATORIA

A mis Padres: Su amor incondicional es un refugio que me da fuerza para enfrentar cualquier adversidad.

A mi Familia Maria y Manuelito: El mayor tesoro que existe

A mis Herman@s: Los regalos más bonitos que me han hecho.

Cuñad@s y Sobrin@s: Gracias por compartir su alegría, amor y humor con nuestra familia.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) hoy Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por su apoyo económico, académico e institucional para lograr realizar y culminar este proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, por darme la oportunidad de pertenecer y formar parte de esta gran casa de estudios y así poder obtener un logro más en mi etapa profesional.

Al centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo unidad Culiacán (CIAD-Culiacán), por permitir realizar mi estancia de investigación en el laboratorio de Nutrición dirigido por del Dr. Tomás Osuna Enciso, y operado por los técnicos y buenos compañeros I.Q. Werner Rubio Castro y MC. Eduardo Sánchez Valdez, fueron parte fundamental en mi proceso de formación.

A mi director de tesis Dr. Sergio Hernández Verdugo por la guía, enseñanza y paciencia en todas las etapas del doctorado.

Al Dr. Antonio Pacheco Olvera, por el acompañamiento y compartir sus conocimientos en especial en las colectas de campo.

Al Dr. Saúl Parra Terraza, por los consejos prácticos en la parte nutrimental.

Al Dr. César Enrique Romero Higareda, excelente asesor estadístico y bagaje de amplios conocimientos.

Al. Dr. Jesús Enrique Retes Manjarrez por su orientaron e impulso durante este proceso.

A mis compañeros: Heriberto Luna Barraza, Mario Humberto Valenzuela Romero, Carlos Rodríguez, Carlos Ornelas en la gran labor de campo; Yomira Pérez, Omar Mendivil y Fidel Romero Muños por su apoyo en el trabajo de invernadero y laboratorio.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN GENERAL.....	1
GENERAL ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.2.1. Salinidad	3
1.2.2. <i>Capsicum annuum</i> var. <i>glabriusculum</i>	6
1.2.3. Conclusiones	7
1.2.4. Literatura citada.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
VARIACIÓN EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN POBLACIONES DE CHILE SILVESTRE (<i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>glabriusculum</i>).....	10
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
2.1. INTRODUCCIÓN	12
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.2.1. Sitios de colecta	13
2.2.2. Descripción de la planta	13
2.2.3. Diseño experimental	14
2.2.4. Características evaluadas	15
2.2.5. Índice de tolerancia al estrés (ITS).....	15
2.2.6. Análisis estadístico	16
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
2.3.1. Efecto de los tratamientos	16
2.3.2. Variación entre las poblaciones y los ITS	18
2.3.3. Relación entre el ITS y las características del suelo.....	22
2.4. CONCLUSIONES	24

2.5. LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO 3.....	28
DIFERENCIACIÓN FENOTÍPICA EN POBLACIONES DE CHILE SILVESTRE DEL NOROESTE DE MÉXICO POR EFECTO DE SALINIDAD	28
RESUMEN	28
ABSTRACT	29
3.1. INTRODUCCIÓN	30
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.2.1. Sitios de colecta.....	32
3.2.2. Descripción de la planta.....	34
3.2.3. Diseño experimental.....	34
3.2.4. Rasgos evaluados	35
3.2.5. Análisis estadístico	35
3.3. RESULTADOS	36
3.3.1. Efecto de la salinidad	36
3.3.2. Variación dentro de familias	37
3.3.3. Variación entre familias.....	38
3.3.4. Variación genética	38
3.3.5. Variación entre poblaciones	40
3.3.6. Variación fenotípica.....	41
3.4. DISCUSIÓN	42
3.4.1. Efecto de la salinidad	42
3.4.2. Distribución de la variación fenotípica y genética.....	43
3.4.2.1. Variación fenotípica.....	43
3.4.2.2. Variación genética (VGT)	43
3.4.3. Variación entre poblaciones	44
3.4.4. Variación fenotípica (CV).....	45
3.5. CONCLUSIONES	47
3.6. LITERATURA CITADA.....	48
CAPÍTULO 4.....	54
DISCUSIÓN GENERAL.....	54
4.1. LITERATURA CITADA.....	57

CAPÍTULO 5.....	59
CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 6.....	60
ANEXOS	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Datos geográficos, climáticos y edáficos de las seis poblaciones silvestres de <i>Capsicum annuum</i> del noroeste de México.	14
Cuadro 2. Efecto de los rasgos evaluados en 0 mM de NaCl e índices de tolerancia al estrés por salinidad en la concentración de 25 mM y 50 mM en las características altura de la planta (API), diámetro del tallo (DTII), área foliar (AFo), clorofila (SPAD), peso seco de la planta (PSPI), peso seco de la raíz (PSRa), peso seco de los tallos (PSTII) y peso seco de las hojas (PSHo) de 6 poblaciones de <i>Capsicum annuum</i> silvestre del noroeste de México.....	19
Cuadro 3. Resultado del análisis de componentes principales de los ITS de las características analizadas en seis poblaciones silvestres de <i>Capsicum annuum</i> en 25 y 50 mM de salinidad. Las variables con mayor peso están en negritas.....	20
Cuadro 4. Datos geográficos, climáticos y edáficos de las seis poblaciones silvestres de <i>Capsicum annuum</i> del noroeste de México.	33
Cuadro 5. Porcentaje de variación fenotípica entre poblaciones (VFEP), entre familias (VFEF) y dentro de familias (VFDF). Variación genética total ($VGT = VFEP + VFEF$)/ $VFEP + VFEF + VFDF$), variación genética entre poblaciones ($VGP = VFEP / VFEP + VFEF$) y variación genética entre familias ($VGF = VFEF / VFEP + VFEF$), para diez caracteres medidos en poblaciones de <i>C. annuum</i> silvestre del Noroeste de México bajo tres niveles de NaCl.....	39
Cuadro 6. Coeficientes de variación (%) de rasgos en poblaciones silvestres de <i>C. annuum</i> del noroeste de México. Datos agrupados de tres tratamientos de NaCl.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas de México afectadas por la salinización y sodificación. Fuente: Etchevers <i>et al.</i> , 2023; Cruz-Gaistardo, 2024	4
Figura 2. Localización geográfica de las 6 poblaciones silvestres de <i>Capsicum annuum</i> L. colectadas en los estados de Sonora y Sinaloa, México. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.	14
Figura 3. Medias ($\pm$ E. E.) de las características altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, cantidad de clorofila (SPAD), peso seco de la planta, peso seco de la raíz, peso seco del tallo y peso seco de las hojas en tres niveles de salinidad. Medias	17
Figura 4. Diferenciación de las seis poblaciones silvestres <i>Capsicum annuum</i> silvestre sobre los componentes principales 1 y 2 obtenidos con los ITS en el tratamiento de 25 mM y 50 mM. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.....	21
Figura 5. Relación entre el ITS de peso seco de la raíz en el tratamiento 25 mM con la concentración de Cl (en mM) en los sitios de origen. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.	22
Figura 6. Relaciones entre los ITS en el tratamiento de 50 mM con algunas características del suelo en los sitios de origen: altura de la planta (A), diámetro del tallo (B), área foliar (C) peso seco del tallo (D) y peso seco de la hoja (E) con la conductividad eléctrica (CE), área foliar (F), cantidad de clorofila (G) peso seco del tallo (H) y peso seco de la hoja (I) con el Na. . 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.	23
Figura 7. Localización geográfica de 6 poblaciones silvestres de <i>C. annuum</i> L. recolectadas en los estados de Sonora y Sinaloa, México. Mazocahui (1), Presa Oviachic (2), Yecorato (3), Lo de Vega (3), Cosalá (4) y El Roble (5).	33
Figura 8. Promedios de los rasgos ($\pm$ E. E.) de <i>C. annuum</i> silvestre con diferentes niveles de NaCl: 0 mM, 25 mM, y 50 mM. Barras con misma literal dentro de cada parámetro (rasgo) no son estadísticamente diferentes, (Tukey, $\alpha = 0.05$).	37
Figura 9. Promedios de los rasgos ($\pm$ E. E.) en plantas de seis poblaciones de <i>C. annuum</i> silvestre del Noroeste de México. MZC: Mazocahui, POV: Presa Oviachic, YCT: Yecorato, LDV: Lo de Vega, COS: Cosalá y RBL: El roble. Datos agrupados de tres niveles de NaCl. Letras diferentes en minúsculas indican diferencias de medias entre poblaciones. (Tukey, $\alpha = 0.05$).....	41

RESUMEN GENERAL

El chile silvestre (*Capsicum annuum*) es un valioso recurso genético para la agricultura y la alimentación al presentar un acervo de genes primario de resistencia o tolerancia a factores bióticos y abióticos como la salinidad en los suelos. La salinidad es un problema en zonas agrícolas al comprometer el crecimiento de los cultivos.

En el presente trabajo se estimó la variación en la tolerancia a la salinidad, la distribución de la variación fenotípica entre poblaciones, entre y dentro de familias, y se estimó la proporción de esta variación fenotípica que tiene una base genética en tres niveles de salinidad (sin NaCl, 25 mM y 50 mM de NaCl) usando el índice de tolerancia al estrés (ITS, donde un ITS mayor en una población o característica indica una tolerancia mayor a la salinidad) en seis poblaciones de chile silvestre del noroeste de México

Todas las características medidas fueron afectadas negativa y significativamente por la salinidad con excepción de grosor de hoja. El ITS promedio más alto lo presentó Presa Oviachic en ambos tratamientos, el cual fue 37.6% y 40.4% superior con respecto a Cósala y Mazocahui. Peso seco de raíz (0.427), diámetro de tallo (0.419), área foliar (0.412), peso seco de tallo (0.407) y peso seco de planta (0.345) fueron las características más tolerantes en ese orden. En el tratamiento de 50 mM afectó la altura de planta, diámetro del tallo, área foliar, peso seco de tallo y hojas presentando correlación positiva con la conductividad eléctrica. Asimismo, el área foliar, el contenido relativo de clorofila, el peso seco de tallo y hojas se correlacionó con el contenido de Na del suelo del sitio de origen de las poblaciones. La mayor variación fenotípica se distribuyó dentro de familias. Mientras que, el mayor coeficiente de variación fue en peso seco de raíz (40%). Las poblaciones mantuvieron variación en todos los rasgos excepto en altura de planta. Los resultados obtenidos son valiosos para el desarrollo de programas de mejora genética y para la conservación *in situ* o *ex situ* de (*Capsicum annuum*) silvestre.

Palabras clave: *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*; chile chiltepín; salinidad; variación genética; variación fenotípica; colecta en campo

GENERAL ABSTRACT

Wild pepper (*Capsicum annuum*) is a valuable genetic resource for agriculture and food as it has a primary gene pool for resistance or tolerance to biotic and abiotic factors such as soil salinity. Salinity is a problem in agricultural areas as it compromises crop growth.

In the present work, the variation in salinity tolerance, the distribution of phenotypic variation among populations, between and within families, and the proportion of this phenotypic variation that has a genetic basis at three salinity levels (no NaCl, 25 mM and 50 mM NaCl) were estimated using the index of stress tolerance (STI, where a higher STI in a population or trait indicates a greater tolerance to salinity) in six wild chili populations from northwestern Mexico.

All the measured characteristics were negatively and significantly affected by salinity, except for leaf thickness. The highest average STI was presented by Presa Oviachic in both treatments, which was 37.6% and 40.4% higher than in Cósala and Mazocahui. Root dry weight (0.427), stem diameter (0.419), leaf area (0.412), stem dry weight (0.407) and plant dry weight (0.345) were the most tolerant characteristics in that order. In the 50 mM treatment, plant height, stem diameter, leaf area, stem dry weight and leaves were affected, showing a positive correlation with electrical conductivity. Likewise, leaf area, relative chlorophyll content, stem and leaf dry weight were correlated with the Na content of the soil at the site of origin of the populations. The greatest phenotypic variation was distributed within families. The highest coefficient of variation was in root dry weight (40%). The populations maintained variation in all traits except plant height. The results obtained are valuable for the development of genetic improvement programs and for the *in situ* or *ex situ* conservation of wild (*Capsicum annuum*).

Keywords: *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*; chiltepín pepper; salinity; genetic variation; phenotypic variation; field collection

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. INTRODUCCIÓN

El chile *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* es el pariente silvestre de las plantas modernas cultivadas como chiles de árbol o cola de rata, anchos, serranos, jalapeños y morrón, entre otros.

Es un recurso genético importante que constituye un acervo de genes primario de resistencia o tolerancia a factores bióticos y abióticos como la salinidad en los suelos, cuyo conocimiento podría contribuir a mejorar la producción agrícola actual (Hernández-Verdugo *et al.*, 1998).

A nivel mundial, la creciente escasez de agua y tierra cultivable para la agricultura y la alimentación es un problema crítico, debido a los grandes volúmenes de agua requeridos para la producción agrícola. Uno de los principales factores abióticos que limita el crecimiento y productividad de las plantas en todo el mundo es la salinidad de los suelos (Munns y Tester, 2008), que afecta negativamente a más del 20 % de la superficie agrícola bajo riego (Henderson *et al.*, 2020). Existe información limitada sobre la variación en la tolerancia de poblaciones chile silvestre a la salinidad; por lo que, los objetivos fueron: estimar la variación en la tolerancia, así como la naturaleza adaptativa de esta variación, la distribución de la variación fenotípica entre poblaciones, entre y dentro de familias, y estimar la proporción de la variación fenotípica en diferentes rasgos en respuesta a tres niveles de NaCl en condiciones de invernadero.

1.2. REVISIÓN DE LITERATURA

1.2.1. Salinidad

La salinidad es una condición del suelo caracterizada por una alta concentración de sales solubles. Los suelos se clasifican como salinos cuando la conductividad eléctrica (CE) es mayor a 4 dS m⁻¹ (Munns y Tester, 2008). La República Mexicana presenta 22.3 millones de hectáreas afectadas por salinidad. Las causas principales de la salinización y sodificación acelerada son la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la gestión inadecuada del riego. Otras causas están relacionadas con la falta de mantenimiento de la infraestructura hidráulica, variaciones climáticas extremas y fertilización incorrecta. Existen al menos 24 casos críticos de salinización y sodificación en las zonas agrícolas. Las áreas están en el sur de Sonora y noroeste de Sinaloa; comprenden el corredor de Ciudad Obregón a Culiacán, el valle de Mexicali, el centro de Chihuahua, la Comarca Lagunera, los extremos norte y sur de Tamaulipas, el corredor agrícola que conecta el sur de Guanajuato con el lago de

Chapala, la zona de TulaMixquiahuala y los suelos de origen calizo intensamente fragmentados en la Península de Yucatán (Figura 1) (Etchevers *et al.*, 2023).



Figura 1. Zonas de México afectadas por la salinización y sodificación. Fuente: Etchevers *et al.*, 2023; Cruz-Gaistardo, 2024

Esta condición de los suelos reduce la productividad de los cultivos y es una de las principales causas del abandono de tierras y acuíferos para fines agrícolas (COLPOS 2013). El daño que causa a las plantas varía según las condiciones climáticas, la intensidad de la luz, las especies vegetales o las condiciones del suelo. Dependiendo de la capacidad de las plantas para crecer en ambientes salinos, se clasifican en halófitas y glicófitas. Las halófitas son plantas que se adaptan a ambientes salinizados (altamente tolerantes a la salinidad, hasta 200 mM de NaCl) y emplean estrategias especializadas para hacer frente a esta condición. Sin embargo, la mayoría de las especies de cultivos (chile, tomate, maíz, etc) son sensibles al exceso de sal (glicófitas), por lo que el desarrollo de cultivos tolerantes para aumentar el rendimiento en tierras agrícolas salinizadas ha sido un objetivo científico muy deseable (Van Zelm *et al.*, 2020).

Para lograr este objetivo, es necesario comprender cómo la alta salinidad afecta las propiedades morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, metabólicas y de expresión genética de las plantas.

En las raíces el estrés por salinidad se detecta inhibiendo el crecimiento y desarrollo de las plantas al imponer varias limitaciones importantes. La primera restricción es un estrés osmótico (la disminución del potencial hídrico externo) que compromete la capacidad de una planta para absorber agua. Este proceso desencadena varios eventos importantes en los tejidos vegetales. A nivel macroscópico, la expansión de

las células de la raíz y los brotes en la parte aérea se detienen inmediatamente como resultado de una disminución de la presión de turgencia. Para lidiar con este problema, las plantas deben ajustarse osmóticamente. La mayor parte de la turgencia celular, en la raíz, se recupera en 40 a 60 min mediante un aumento en la absorción de iones inorgánicos y se reanuda el crecimiento, aunque a un ritmo reducido. El estrés osmótico también produce un cierre rápido de los estomas, lo que reduce la capacidad de la planta para asimilar CO₂. El rápido cierre de los estomas puede explicarse por la rápida caída en la presión del xilema (raíces de maíz expuestas a NaCl 100 mM), que acompaña al estrés por salinidad. Esta caída en la presión del xilema ocurre minutos después del inicio del estrés, y las señales hidráulicas detectadas por las raíces se mueven a la velocidad del sonido y se traducen casi instantáneamente los brotes, donde se decodifican y alteran el metabolismo de ellos. Debido a que las células protectoras estomáticas poseen un rango de canales iónicos mecanosensibles (activados por estiramiento) podrían potencialmente transducir un cambio en la presión del xilema causado por la salinidad en aberturas estomáticas alteradas (Gupta *et al.*, 2014).

La segunda restricción impuesta por la salinidad es el desequilibrio iónico (a menudo llamado "estrés iónico" o "toxicidad iónica"). En la mayoría de los casos, esta restricción está asociada con una acumulación excesiva de Na⁺ y Cl⁻ en compartimentos intracelulares metabólicamente activos (Efisue *et al.*, 2019)).

Es bien sabido que el Na⁺ puede dañar el metabolismo de la planta y potencialmente matarla. La explicación más común de la toxicidad del Na⁺ es que tiene un efecto inhibitorio sobre las actividades de la fotosíntesis al (1) reducir la absorción de CO₂ a través de los estomas, (2) causar desequilibrios iónicos (Na⁺, K⁺, Cl⁻) dentro de los cloroplastos, lo que resulta en una pobre eficiencia de las reacciones de luz y ciclo de Calvin, y (3) causa daño oxidativo a los fotosistemas y las membranas. Sin embargo, el alcance de la disminución de la fotosíntesis en condiciones de salinidad varía ampliamente entre especies y genotipos de cultivos (Munns *et al.*, 2019). En los genotipos tolerantes que pueden mantener la sal fuera de la hoja, el suministro fotosintético no se ve afectado y causa cambios en la anatomía de la hoja aumentando el grosor. Las modificaciones anatómicas en las hojas también incluyen un aumento del parénquima empalizado y de los espacios intercelulares y una disminución del parénquima esponjoso, sirviendo para facilitar la difusión del CO₂ en una situación de apertura estomática reducida (Acosta-Motos *et al.*, 2017). En tales casos, la disminución del crecimiento potencial (en comparación con un control no salino) debe ser directamente proporcional y una medida del costo energético asociado con la tolerancia. (Zhao *et al.*, 2020).

La capacidad de las plantas para tolerar una alta salinidad varía entre especies y dentro de ellas, estudiarla permitiría identificar variaciones naturales que son fundamentales para la tolerancia al estrés salino en las plantas y podría ser benéfico en los programas de mejoramiento. (Efisue e Igoma, 2019). Los trabajos de investigación para la tolerancia y variación fenotípica con poblaciones de plantas silvestres son escasas en México. Por otra parte, existen ejemplos de los beneficios de estudiarlas. Munns *et al.* (2012), al utilizar genes de un ancestro de trigo reportan que mejoró la exclusión de Na⁺ de los brotes y la tolerancia en el campo, con un mayor rendimiento de grano usando un proceso de hibridación interespecífica de un alelo HKT1, por lo que podría ser una estrategia prometedora, ya que se produce una variación natural en muchas especies diferentes.

1.2.2. *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*

El género *Capsicum* comprende 43 especies, de las cuales a nivel mundial se cultivan cinco (*C. annuum* L. var. *annuum*, *C. baccatum* L. var. *pendulum* (Willd.) Eshbaugh, *C. baccatum* L. var. *umbilicatum* (Vell.) Hunz. & Barboza, *C. chinense* Jacq. y *C. frutescens* L.) (Barboza *et al.* 2022). En México por su importancia cultural al ser centro de domesticación y consumo, así como por su componente económico *C. annuum* L. var. *annuum* es apreciado en todo el territorio mexicano.

El chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum* (Dual) Heier & Pickersgill) es el ancestro de *C. annuum*. Es una especie silvestre, ampliamente distribuida en México, su fruto seco es altamente preferido, presentando demanda en los mercados nacionales e internacionales, debido a su sabor particular y pungencia, contribuyendo con su alto valor económico al desarrollo de los sectores rurales (Hernández-Verdugo *et al.* 1998).

De acuerdo con SIAP-SAGARPA (2024) durante el año 2023 en México solo aparece el estado de Sonora con 20 hectáreas de chile silvestre (chiltepín), en donde hubo una producción de 18 toneladas, lo que significa un rendimiento de 0.9 toneladas por hectárea.

El cultivo de chile chiltepín se ha propuesto como un cultivo de interés agronómico redituable para los productores de Sinaloa, sin embargo, no se cuenta con estadísticas oficiales en cuanto a superficies establecidas y rendimientos. De manera informal se sabe que se cultiva en superficies que van de una a cinco hectáreas. Se comercializa maduro y es muy importante debido a su alta demanda en el mercado. Se siembra por semilla que los productores colectan en el monte cerca de sus comunidades. De acuerdo con Caughey-Espinoza *et al.* (2020) al estudiar rendimiento frutos de colectas del estado de Sonora reportan que el rendimiento vario de 273 a 392 g de fruto seco por planta.

A demás de su sabor particular el chile silvestre chiltepín, es un recurso genético estrechamente vinculado con los cultivos modernos de chile serrano, jalapeño, morrón y ancho. Las poblaciones silvestres son consideradas como un recurso genético valioso, que al expandirse geográficamente (Hernández-Verdugo *et al.* 2008) proporcionan reservorios únicos de diversidad genética útiles en el mejoramiento para sus formas cultivadas (Hernández-Verdugo *et al.* 1998, Retes-Manjarrez *et al.* 2018, Alcalá-Rico *et al.* 2023).

En México existe interés por estudiar y conservar el germoplasma de las plantas de chile que han permanecido en estado silvestre pues la destrucción de su habitat amenazada por la ganadería y nuevas tierras de cultivo reducen sus poblaciones.

1.2.3. Conclusiones

El deterioro de la calidad de los suelos, debido a salinidad puede limitar la autosuficiencia y la seguridad alimentaria. Además, el cambio climático puede extenderse y agudizarse, ya que los cambios en cantidad e intensidad de precipitación y en los patrones espacio-temporales de las lluvias pueden acelerar los procesos de erosión.

Las poblaciones naturales de chile chiltepín se encuentran distribuidas en casi toda la república mexicana, mostrando una amplia adaptabilidad ambiental incluyendo áreas con problemas de sales y dada su diversidad genética por la naturaleza silvestre de la especie podría adaptarse al estrés por NaCl.

A pesar de que se ha reportado la gran variabilidad genética de *C. annuum* var. *glabriusculum*, a factores bióticos y abióticos, se cuenta con escasa información de su comportamiento al estrés por salinidad y su variación genética.

1.2.4. Literatura citada

- Acosta-Motos, J.R., Ortuño, M.F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M.J., and Hernandez, J.A. 2017. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy* 7(1):18. doi:10.3390/agronomy7010018.
- Alcalá-Rico JSGJ, Ramírez-Meraz M, Maldonado-Moreno N, Borja-Bravo M, Camposeco-Montejo N, López-Benítez A (2023) Variación morfológica en frutos de genotipos de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) del Noreste y Centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3482>
- Barboza, G.E., García, C.C., Bianchetti, L.B., Romero, M.V., and Scaldaferrro, M. 2022. Monograph of wild and cultivated chili peppers (*Capsicum* L., Solanaceae). *PhytoKeys* 200:1-423. doi:10.3897/phytokeys.200.71667.
- Caughey-Espinoza, M., Miriam, D., Buitimea-Cantúa, G. V., Buitimea-Cantúa, N. E., Ayala-Astorga, G. I., & Ochoa-Meza, A. (2020). Propiedades fisicoquímicas y rendimiento de frutos de chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum* Dunal) cultivados bajo diferentes condiciones de crecimiento. *Idesia (Arica)*, 38(3), 77-86.
- COLPOS, 2013. Suelo, protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Posgraduados. 24 pp.
- Efisue, A.A., and Igoma, E.E. 2019. Screening rice (*O. sativa* L.) in salinity gradient to identify performance during vegetative stage for salinity stressed environments. *Journal of Plant Sciences* 7(6):144-150. doi:10.11648/j.jps.20190706.13.
- Efisue, A.A., and Igoma, E.E. 2019. Screening rice (*O. sativa* L.) in salinity gradient to identify performance during vegetative stage for salinity stressed environments. *Journal of Plant Sciences* 7(6):144-150. doi:10.11648/j.jps.20190706.13.
- Gupta, B., and Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International journal of genomics*, 2014.
- Hernández-Verdugo S, López-España RG, Sánchez-Peña P, Villarreal-Romero M, Parra-Terraza S, Porras F, Corrales-Madrid JL (2008) Phenotypic variation among and within wild populations of pepper from northwest Mexico. *Revista de Fitotecnia Mexicana* 31: 323-330. <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.323>
- Hernández-Verdugo, S., Guevara-González, R.G., Rivera-Bustamante, R.F., Vázquez-Yanes, C., y Oyama, K. 1998. Los parientes silvestres del chile (*Capsicum* spp.) como recursos genéticos. *Botanical Sciences* (62):171-181. doi:10.17129/botsci.1559.

- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.
- Munns, R., Day, D. A., Fricke, W., Watt, M., Arsova, B., Barkla, B. J., ... & Tyerman, S. D. (2019). Energy costs of salt tolerance in crop plants. *New Phytologist*, 225(3), 1072-1090.
- Munns, R., James, R. A., Xu, B., Athman, A., Conn, S. J., Jordans, C., ... & Gilliam, M. (2012). Wheat grain yield on saline soils is improved by an ancestral Na⁺ transporter gene. *Nature biotechnology*, 30(4), 360-364.
- Retes-Manjarrez, J.E., Hernández-Verdugo, S., Pariaud, B., Hernández-Espinal, L.A., Parra-Terraza, S., Trejo-Saavedra, D.L., et al. 2018. Resistance to pepper huasteco yellow vein virus and its heritability in wild genotypes of *Capsicum annuum*. *Botanical Sciences* 96(1):52-62. doi:10.17129/botsci.1029.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2024. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 28 de junio 2024.
- Van Zelm, E., Zhang, Y., and Testerink, C. 2020. Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology* 71:403-433. doi:10.1146/annurev-arplant-050718-100005.
- Zhao, C., Zhang, H., Song, C., Zhu, J. K., & Shabala, S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The innovation*, 1(1)

CAPÍTULO 2.

VARIACIÓN EN LA TOLERANCIA A LA SALINIDAD EN POBLACIONES DE CHILE SILVESTRE (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*)

RESUMEN

El chile silvestre (*Capsicum annuum*) es un valioso recurso genético para la agricultura y la alimentación. En todo el mundo, la salinidad del suelo es un estrés significativo que limita y afecta la productividad agrícola. Se estimó la variación en la tolerancia a la salinidad en seis poblaciones de chile silvestre del noroeste de México en tres niveles de salinidad (sin NaCl, 25 mM y 50 mM de NaCl). Las características medidas fueron: altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, contenido relativo de clorofila, peso seco de la planta, peso seco de la raíz, peso seco del tallo y peso seco de las hojas. La tolerancia a la salinidad se estimó con un índice de tolerancia al estrés (ITS) obtenido con los valores de las características entre el tratamiento control (sin NaCl) y los tratamientos con salinidad. Los datos obtenidos se analizaron con análisis de varianza univariados y multivariados de componentes principales. Todas las características medidas fueron afectadas negativa y significativamente por la salinidad. Los análisis de varianza univariados y de componentes principales diferenciaron claramente a las poblaciones estudiadas. En el tratamiento de 50 mM, la altura de planta, diámetro del tallo, área foliar, peso seco de tallo y hojas se correlacionó positivamente con la conductividad eléctrica, y el área foliar, el contenido relativo de clorofila, el peso seco de tallo y hojas se correlacionó con el contenido de Na del suelo del sitio de origen de las poblaciones. Presa Oviachic mostró una mayor tolerancia a la salinidad en ambos tratamientos de NaCl (1,17 y 0,99), seguida de dos poblaciones más (Lo de vega y Yecorato), cada una con cada tratamiento de salinidad. El ITS promedio más alto lo presentó Presa Oviachic en ambos tratamientos, el cual fue 37.6% y 40.4% superior con respecto a Cósala y Mazocahui. Peso seco de raíz (0.427), diámetro de tallo (0.419), área foliar (0.412), peso seco de tallo (0.407) y peso seco de planta (0.345) fueron las características más importantes en ese orden y Presa Oviachic fue estadísticamente superior al resto de las poblaciones en el STI a 50 mM. El patrón de variación observado en estas características sugiere adaptación a las condiciones edáficas locales. Debido a que las plantas crecieron en un ambiente uniforme de invernadero, los resultados indican que las diferencias entre las poblaciones se deben a diferencias genéticas entre ellas.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, estrés por salinidad, índice de tolerancia al estrés, Noroeste de México, NaCl

ABSTRACT

The wild pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill) is a valuable genetic resource for agriculture and food. Around the world salinity is a significant environmental stress that limit and affect agriculture productivity. This work estimates the variation in salinity tolerance in six populations of wild pepper populations of the Northwest of Mexico at three salinity levels (without NaCl, 25 and 50 mM NaCl). The measured traits were height, stem development, foliar area, relative content of chlorophyll, dry weight of plant, root, stem, and leaves. Salinity tolerance was estimated with a stress tolerance index (STIs) obtained by comparing the values of the traits between the control treatment (without NaCl) and salinity treatments. Data were subjected to univariate and multivariate variance analysis of principal components. All measured traits were affected negatively and significantly by salinity. Univariate variance analysis and of principal components clearly differentiated the studied populations. In the 50 mM treatment, height, stem diameter, foliar area, stem and leaves dry weight correlated positively with electrical conductivity, and foliar area, relative content of chlorophyll, stem and leaves dry weight correlated with the Na of the soil at the site of origin of the populations. Presa Oviachic showed a higher salinity tolerance in both NaCl treatments (1.17 and 0.99), followed by two more populations (Lo de vega y Yecorato), each with each salinity treatment. The highest average STI was presented by Presa Oviachic in both treatments, which was 37.6% and 40.4% higher with respect to Cósala and Mazocahui. Root dry weight (0.427), stem diameter (0.419), leaf area (0.412), stem dry weight (0.407) and plant dry weight (0.345) were the most important traits in that order and Presa Oviachic was statistically superior to the rest of the populations in the STI at 50 mM. Plants of these populations could be a source of salinity resistance. The variation pattern observed in these traits suggests adaptation to the local edaphic conditions.

Key words: *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*, NaCl, northwestern Mexico, salinity stress, stress tolerance index.

2.1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la creciente escasez de agua y tierra cultivable para la agricultura y la alimentación es un problema crítico, debido a que gran parte de la producción agrícola se efectúa en tierras de riego. Uno de los principales factores abióticos que limita el crecimiento y productividad de las plantas en todo el mundo es la salinidad de los suelos (Munns y Tester, 2008), que afecta negativamente más del 20 % de la superficie agrícola bajo riego (Henderson, *et al.*, 2020). La salinidad se refiere a la concentración de sales solubles en el perfil del suelo superior a 40 mM NaCl o conductividad eléctrica mayor a 4 dS m⁻¹ (Henderson *et al.*, 2020).

México es uno de los países con mayor diversidad vegetal de chiles (*Capsicum* spp.) y uno de los principales centros de domesticación de plantas en el mundo. En particular *Capsicum* fue una de las primeras plantas domesticadas en el Continente Americano. El género *Capsicum* (Solanaceae) está conformado por alrededor de 30 especies distribuidas desde el sur de Los Estados Unidos hasta el norte de Argentina (Hernández-Verdugo, 2018). Del género *Capsicum* se han domesticado las especies *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. baccatum* y *C. pubescens*. De las especies domesticadas *C. annuum* es la de mayor importancia económica y la que presenta mayor variabilidad en el tamaño, forma y color de sus frutos. A ella pertenecen los chiles “de árbol” o “cola de rata”, “anchos”, “serranos”, “jalapeños” y “morrón”, entre otros. Se considera que *C. annuum* ha sido domesticada en México.

Los parientes silvestres de las plantas cultivadas son un recurso genético importante que constituye un acervo de genes primario de resistencia o tolerancia a factores bióticos y abióticos, cuyo conocimiento podría contribuir a mejorar la producción agrícola actual (Hernández-Verdugo *et al.*, 1998). Estudios previos con isoenzimas, marcadores moleculares RAPDs, microsatélites y de caracteres cuantitativos indican que las poblaciones de chile silvestre del noroeste de México mantienen altos niveles de variación genética entre y dentro de sus poblaciones (Oyama *et al.*, 2006). Estas poblaciones también variaron significativamente en la capacidad de resistencia contra el virus huasteco vena amarilla del chile (Hernández-Verdugo *et al.*, 2001; Retes-Manjarrez *et al.*, 2018). Sin embargo, se desconoce si estas poblaciones presentan variación en su respuesta a estrés abiótico, como la tolerancia a la salinidad. En este estudio se analizaron seis poblaciones de *Capsicum annuum* silvestre del noroeste de México en condiciones de invernadero con el objetivo de estimar la variación en la tolerancia, identificar fuentes de tolerancia a este factor, así como la naturaleza adaptativa esta variación. La hipótesis de trabajo fue que las poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dual) Heier & Pickersgill del noroeste de México mostrarán variación

en la tolerancia a la salinidad en respuesta a dos niveles de salinidad en condiciones de invernadero.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Sitios de colecta

Se tomaron muestras de frutos maduros de *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill. Las plantas se ubicaron en su hábitat silvestre, la vegetación circundante corresponde a matorral espinoso de piedemonte y selva baja caducifolia originaria del noroeste de México. Los sitios de muestreo (Figura 2) fueron elegidos para representar una amplia distribución geográfica y diferentes hábitats en los que se encuentran las poblaciones silvestres de esta especie en el noroeste de México (Hernández-Verdugo *et al.*, 2012; Díaz-Sánchez *et al.*, 2021); Los datos geográficos, climáticos y de suelo de los sitios de muestreo se muestran en el Cuadro 1.

2.2.2. Descripción de la planta

De manera silvestre *C. annuum* var. *glabriusculum* se reproduce exclusivamente a través de semillas, y estas se producen principalmente por autofecundación. Las plantas son perennes, erectas o arbustivas de 1-4 m de altura. Muestran hábito de crecimiento intermedio, erecto o trepador. El estado de mejoramiento de sus poblaciones se encuentra inexplorada. Sus frutos en estado maduro son picantes, pequeños, rojos, casi redondos y erectos que favorecerían el consumo de las aves frugívoras favoreciendo su amplia dispersión (Barboza *et al.* 2022; Votava *et al.* 2002; IPGRI, AVRDC y CATIE 1995).

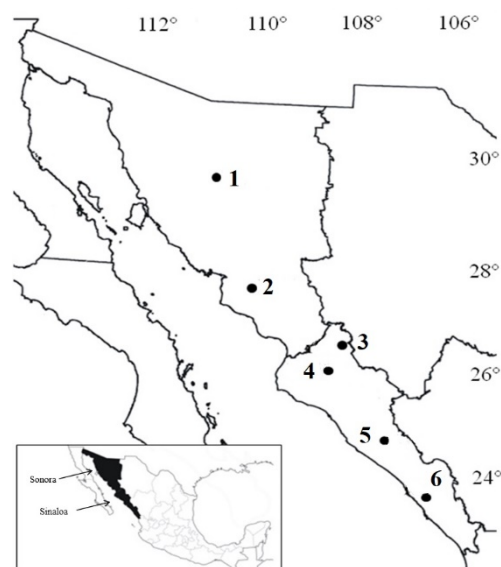


Figura 2. Localización geográfica de las 6 poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* L. colectadas en los estados de Sonora y Sinaloa, México. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.

Cuadro 1. Datos geográficos, climáticos y edáficos de las seis poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* del noroeste de México.

ID	Población	N latitude	W longitud	MaxT	MedT	MinT	PP	EC	pH	Na ⁺	Cl ⁻
				°C			mm	dS·m ⁻¹			
1	Mazocahui	29°31'	110°05'	31.6	21.3	10.8	534	0.7	6.6	0.3	4.0
2	Presa Oviachic	27°46'	109°54'	33.9	24.7	15.6	410	1.0	7.8	1.2	3.5
3	Yecorato	26°26'	108°12'	34.8	24.1	13.5	818	1.0	6.8	1.4	3.1
4	Lo de Vega	26°08'	108°32'	33.2	23.6	14.2	628	0.8	7.6	0.7	3.2
5	Cosalá	24°24'	106°36'	33.7	24.9	16.2	1098	0.8	7.5	0.4	3.4
6	El Roble	23°25'	106°17'	29.2	23.5	17.3	587	0.8	7.8	0.9	2.5

MaxT: promedio de temperatura máxima anual; MedT: promedio de temperatura media anual; MinT: promedio de temperatura mínima anual; PP: promedio de precipitación anual; EC: conductividad eléctrica. Na⁺ y Cl⁻.

2.2.3. Diseño experimental

Las semillas de los frutos recolectados se sumergieron en 1000 mg·L⁻¹ de ácido giberélico durante 24 h y se germinaron en charolas de poliestireno de 60 cavidades (cavidad individual = 230 cm³) rellenas con sustrato orgánico de turba, en condiciones de invernadero. Se observó una baja respuesta de germinación de *C. annuum* silvestre (los datos se pasaron por alto en este proceso de investigación) ya que depende en gran medida del entorno de crecimiento de las plantas madre (Hernandez-Verdugo *et al.* 2010). Después de germinadas, las plántulas con dos a

cinco hojas verdaderas se trasplantaron a nuevas charolas de poliestireno de 60 cavidades con sustrato de turba orgánica (en este punto, cada plántula ocupaba una cavidad). El número final de individuos en las poblaciones fueron: Mazocahui 36, Presa Oviachic 99, Yecorato 153, Lo de Vega 63, Cosalá 144 y El Roble 180 plantas. En cada población, las plantas se dividieron en tres grupos iguales para equilibrar el experimento de tres tratamientos con NaCl.

Se aplicaron tres tratamientos: 0 (control), NaCl 25 y 50 mM a plántulas germinadas de seis poblaciones. La solución nutritiva basada en modificaciones de la solución universal de Steiner (Steiner, 1984) y utilizando agua destilada para su preparación. El tratamiento comenzó a los 30 d después del trasplante y se continuó por 42 día más. Los estudios de tolerancia a la salinidad en la etapa de plántula son de gran relevancia en la búsqueda de genotipos tolerantes a la salinidad en diferentes especies de plantas cultivadas, debido a que esta etapa es una de las más sensibles en el crecimiento y desarrollo de una planta (Efisue e Igoma, 2019; Dong *et al.*, 2019).

El experimento consistió en un factor (NaCl) con tres niveles de variación (0, 25 y 50 mM). Para cada población se aplicaron tres condiciones experimentales de NaCl. El experimento consistió en parcelas divididas (3 charola de poliestireno) para cada tratamiento de cada población. El número de individuos (réplicas) por tratamiento (dentro de cada charola de poliestireno) en cada población varió dependiendo del número de plántulas obtenidas (Mazocahui 12, Presa Oviachic 33, Yecorato 51, Lo de Vega 21, Cosalá 48 y El Roble 60 plantas), tratando de colocar el mismo número de individuos por tratamiento para equilibrar el experimento. Las charolas de poliestireno se movieron dentro del espacio experimental para evitar el sesgo microambiental debido al efecto de la luz. Cada plántula se consideró una réplica.

2.2.4. Características evaluadas

A los 42 días después del inicio de los tratamientos con salinidad, en cada planta se midieron las características siguientes: (1) altura de la planta (cm); (2) diámetro del tallo (cm); (3) área foliar (cm²) (medida con medidor de área foliar Li-Cor3100C, Nebraska, USA); (4) contenido relativo de clorofila como índice SPAD (Soil Plant Analysis Development 502, Konica Minolta Sensing, Inc., City, Japan); (5) peso seco de la planta (g) (las plántulas se secaron a 60°-70°C por 72 h en una estufa); esta última característica se dividió en: (6) peso seco de la raíz (g); (7) peso seco del tallo (g) y (8) peso seco de las hojas (g).

2.2.5. Índice de tolerancia al estrés (ITS)

El índice de tolerancia al estrés ha sido utilizado con éxito para identificar genotipos que presenten la mejor respuesta bajo condiciones de estrés por salinidad

(Henderson *et al.*, 2020). Se estimó el índice de tolerancia a al estrés (ITS) (Negrao *et al.*, 2017; Henderson *et al.*, 2020) para todas las características analizadas:

$$ITS = (Y_{\text{control}}/Y_{\text{promedio del control}}) \times (Y_{\text{salinidad}}/Y_{\text{promedio del control}})$$

Dónde: Y_{control} y $Y_{\text{salinidad}}$ son los valores de las características evaluadas, en cada planta, en el tratamiento control y en el tratamiento con salinidad; mientras que, $Y_{\text{promedio del control}}$ es el valor promedio de la característica en la población evaluada en condiciones sin salinidad. Un ITS mayor en una población o característica indica una tolerancia mayor a la salinidad.

2.2.6. Análisis estadístico

Los efectos de los tratamientos sobre las características evaluadas se analizaron con un análisis de varianza de una vía (ANDEVA), y cuando las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

Se realizó un ANDEVA de una vía para los valores netos (0 mM) obtenidos y otro ANEVA de una vía para los ITS de los tratamientos de 25 y 50 mM de las diferentes poblaciones.

Los valores de ITS de los caracteres medidos para 25 y 50 mM en las diferentes poblaciones se sometieron a un análisis de componentes principales (APC). El APC permite identificar las características más importantes que contribuyen a la tolerancia a la salinidad en los genotipos estudiados y detectar las tendencias en la diferenciación de las poblaciones (Negrao *et al.*, 2017).

Además, se estimó el carácter adaptativo de la diferenciación en tolerancia a la salinidad entre las poblaciones mediante análisis de regresión lineal entre las medias del ITS de las poblaciones para cada rasgo y variables edáficas de los sitios de origen. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico JMP 13 (SAS Institute, Cary, North Carolina, EE. UU.).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Efecto de los tratamientos

Todas las características fueron afectadas negativa y significativamente en los niveles 25 y 50 mM de NaCl. La reducción fue mayor con la dosis más alta (Figura 3). Estos resultados coinciden con los reportados por varios investigadores quienes han mostrado que la salinidad reduce la capacidad de crecimiento y producción en varias especies vegetales expuestas a la salinidad (Talei *et al.*, 2013; Tiwari *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Talei *et al.* (2013) y Tiwari *et al.* (2013), reportaron una reducción significativa en altura y peso seco de la planta, peso seco

de la raíz y peso seco del tallo en plántulas de *Andrographis paniculata* y de una cruce de *Gossypium hirsutum* x *G. barbadense*, expuestas a diferentes concentraciones de NaCl. Dong *et al.* (2019) reportaron una reducción en altura de la planta y biomasa en plántulas de *Vigna unguiculata*, mientras que Liu *et al.* (2020) encontraron una reducción significativa en área foliar, altura y peso seco de la planta en plántulas de *Cornus alba*. Tiwari *et al.* (2013) señalan que plántulas de una cruce de *Gossypium hirsutum* x *G. barbadense* expuestas a estrés por salinidad tuvieron una reducción significativa en altura y peso seco de la planta y peso seco de la raíz. El área foliar generalmente decrece en condiciones de salinidad especialmente en estado de plántula, así como su capacidad fotosintética (Munns y Tester, 2008).

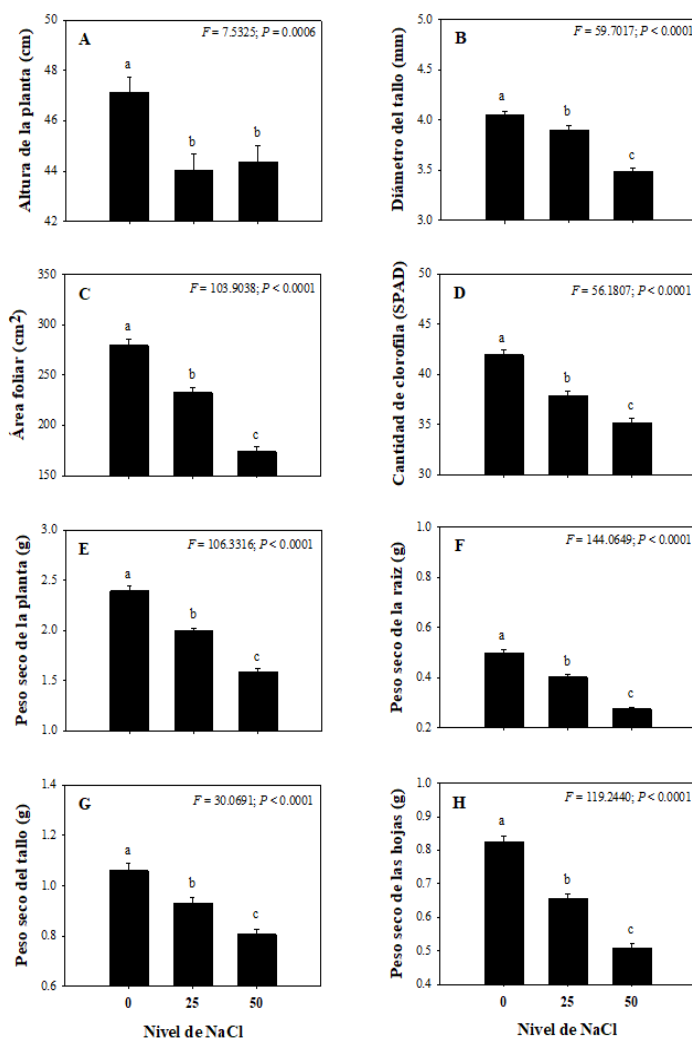


Figura 3. Medias ($\pm$ E. E.) de las características altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, cantidad de clorofila (SPAD), peso seco de la planta, peso seco de la raíz, peso seco del tallo y peso seco de las hojas en tres niveles de salinidad. Medias

El aumento de la salinidad en los suelos agrícolas afecta negativamente la función y el desarrollo de las plantas a través de efectos osmóticos e iónicos (Munns and Tester, 2008). La salinidad impide la absorción del agua por las raíces de las plantas, aun cuando el suelo contiene suficiente humedad, debido al potencial osmótico altamente negativo del suelo comparado con el potencial osmótico menos negativo de la planta. Este desbalance impide la extracción del agua por las raíces de la planta, semejante a las condiciones de sequía (Munns and Tester, 2008). En respuesta al estrés osmótico, la planta reduce su tasa de crecimiento en el tallo, hojas y raíces, aumenta el cierre de estomas y disminuye la fotosíntesis (Munns and Tester, 2008; Henderson *et al.*, 2020). Los iones Na^+ y Cl^- ingresan a la planta y se acumula en niveles tóxicos en el citoplasma celular e impide la absorción y distribución del K^+ , un ión esencial para las funciones biológicas básicas, tales como la apertura de los estomas, la actividad enzimática o metabolismo celular (Munns & Tester, 2008).

2.3.2. Variación entre las poblaciones y los ITS

Las poblaciones estudiadas mostraron diferencias significativas en los ITS en todas las características medidas, excepto en altura de la planta en ambos tratamientos de salinidad (Cuadros 2). En el nivel 25 mM de salinidad, las poblaciones Presa Oviachic y Lo de Vega presentaron los índices de salinidad promedio más altos de todas las poblaciones (Cuadro 2). En este tratamiento, la población Presa Oviachic presentó los mayores ITS en todas las características, excepto en cantidad de clorofila (SPAD), donde las poblaciones Lo de Vega y Yecorato presentaron los mayores ITS (Cuadro 2).

En el tratamiento de 50 mM de cloruro de sodio, la población Presa Oviachic, presentó los ITS promedio más altos, seguida de las poblaciones Yecorato y Lo de Vega (Cuadro 2). En este tratamiento, de nuevo la población Presa Oviachic mostró los mayores ITS en todas las características, excepto en cantidad de clorofila (SPAD), donde la población Yecorato presentó el mayor ITS (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de los rasgos evaluados en 0 mM de NaCl e índices de tolerancia al estrés por salinidad en la concentración de 25 mM y 50 mM en las características altura de la planta (API), diámetro del tallo (DTII), área foliar (AFo), clorofila (SPAD), peso seco de la planta (PSPI), peso seco de la raíz (PSRa), peso seco de los tallos (PSTII) y peso seco de las hojas (PSHo) de 6 poblaciones de *Capsicum annuum* silvestre del noroeste de México.

Population	API	DTII	AFo	SPAD	PSPI	PSRa	PSTII	PSHo	Media
0 mM	cm	mm	cm ²		----- g -----				
Mazocahui	51.83a	4.12abc	305b	41.9ab	3.13a	0.69a	1.59a	0.86b	
Presa	48.30ab	4.37a	355a	40.7b	2.94ab	0.60b	1.32b	1.03a	
Oviachic	48.02ab	4.10abc	282bc	44.7a	2.50c	0.52bc	1.15b	0.84b	
Yecorato	52.76a	4.24ab	304b	45.0a	2.75bc	0.55bc	1.27b	0.93ab	
Lo de Vega	43.45b	3.79c	230d	39.5b	2.01cd	0.46cd	0.93c	0.61c	
Cosalá	44.70b	3.87bc	252cb	41.1b	2.06cd	0.42cd	0.81c	0.83b	
El Roble	46.85	4.03	276	41.8	2.40	0.504	1.07	0.82	
Media									
25 mM									
Mazocahui	0.85a	0.95c	0.69c	0.95b	0.98b	1.18a	1.03b	0.78b	0.93
Presa	0.95a	1.14b	1.34a	0.86b	1.26a	1.25a	1.27a	1.31a	1.17
Oviachic	0.93a	0.99c	0.87c	1.05a	0.82c	0.79c	0.91b	0.77b	0.89
Yecorato	1.03a	1.01b	0.96b	1.08a	1.14a	1.01b	1.16a	1.19a	1.07
Lo de Vega	0.95a	0.82d	0.61c	0.83b	0.66c	0.69c	0.79c	0.50c	0.73
Cosalá	0.94a	0.93c	0.77c	0.79b	0.65c	0.59c	0.63c	0.70c	0.75
El Roble	0.94	0.97	0.87	0.93	0.92	0.92	0.97	0.88	0.93
Media									
50 mM									
Mazocahui	0.77a	0.79b	0.33d	0.80b	0.51c	0.54b	0.58b	0.39c	0.59
Presa	0.96a	1.05a	0.90a	0.86b	1.26a	0.89a	1.16a	0.87a	0.99
Oviachic	0.99a	0.90b	0.72b	0.94a	0.82b	0.56b	0.88b	0.71a	0.82
Yecorato	0.88a	0.87b	0.53c	0.83b	1.14b	0.61b	0.78b	0.75a	0.80
Lo de Vega	0.96a	0.78b	0.46c	0.70c	0.66c	0.48b	0.61b	0.38c	0.63
Cosalá	0.95a	0.80b	0.64b	0.83b	0.65c	0.41b	0.63b	0.60b	0.69
El Roble	0.92	0.87	0.60	0.83	0.84	0.58	0.67	0.62	0.74
Media									

Medias con letras diferentes dentro de la misma columna en cada nivel de salinidad indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Los análisis multivariado de componentes principales mostraron que las poblaciones de *C. annuum* silvestre del noroeste de México mantiene elevados niveles de variación en los índices de tolerancia a la salinidad. El análisis de componentes principales en el tratamiento de 25 mM de salinidad, mostró que los dos primeros componentes principales explicaron 82.94 % de la variación (Cuadro 3). El primer componente principal explicó 67.67 % de la variación. Todas las características mostraron signo positivo y valores relativamente altos en este primer componente principal, excepto altura de la planta y peso seco de las hojas (Cuadro 3). El segundo componente principal explicó 15.27 % de la varianza y estuvo determinado por los ITS de las características altura de la planta de signo positivo y

peso seco de la planta con signo negativo. En el tratamiento de 50 mM salinidad, el CP1 explicó 64.80 % de la varianza. Todas las características tuvieron signo positivo y valores relativamente altos, excepto altura de la planta y SPAD (Cuadro 3). El componente principal 2 explicó 19.32 % de la variación y fue determinado principalmente por las características SPAD y altura de la planta de signo positivo y peso seco de la planta de signo negativo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultado del análisis de componentes principales de los ITS de las características analizadas en seis poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* en 25 y 50 mM de salinidad. Las variables con mayor peso están en negritas.

Característica	25 mM		50 mM	
	CP1	CP2	CP1	CP2
Altura de planta	0.124	0.841	0.242	0.363
Diámetro de tallo	0.396	-0.038	0.419	-0.223
Área Foliar	0.379	0.098	0.412	0.050
SPAD	0.423	-0.080	0.169	0.674
Peso seco de planta	0.363	-0.428	0.345	-0.446
Peso seco de raíz	0.409	-0.099	0.427	-0.162
Peso seco de tallo	0.417	0.140	0.407	-0.054
Peso seco de hojas	0.181	0.249	0.316	0.365
% de varianza explicada	67.67	15.27	64.80	19.32
% de varianza acumulada	67.67	82.94	64.80	84.12

CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2.

Las poblaciones se diferenciaron claramente en el espacio bidimensional de los componentes principales 1 y 2 en ambos tratamientos (Figura 4). En el tratamiento de 25 mM, el componente principal 1 distinguió a las poblaciones Presa Oviachic y Lo de Vega en la región de plantas con mayores ITS de todas las características medidas, mientras que las poblaciones Cosalá y El Roble ocuparon la región opuesta. Las poblaciones Mazocahui y Yecorato ocuparon la región intermedia (Figura 4A, Cuadro 3). El componente principal 2 separó la población Lo de vega en la región de mayor altura de la planta y peso seco de las hojas, pero menor peso seco de la planta (Figura 4A, Cuadro 3), mientras que la población Mazocahui ocupó la región opuesta. Las demás poblaciones se distribuyeron en la región intermedia (Figura 4, Cuadro 3).

En el tratamiento de 50 mM, el componente principal 1 distinguió a las poblaciones Presa Oviachic y Yecorato en la región de plantas con mayores ITS de las todas las características medidas, mientras que las poblaciones Mazocahui y Cosalá ocuparon la región opuesta, mientras que las poblaciones El Roble y Lo de Vega ocuparon la región intermedia (Figura 4B, Cuadro 3). El componente principal 2 separó la población Yecorato en la región de mayor cantidad de clorofila, peso seco de las hojas y altura de la planta, pero menor peso seco de la planta (Figura 3B),

mientras que la población Presa Oviachic ocupó la región opuesta. Las demás poblaciones se distribuyeron en la región intermedia (Figura 4B, Cuadro 3). Debido a que las plantas crecieron en un ambiente uniforme, se considera que la variación observada tiene una base genética.

La tolerancia a la sal en las plantas generalmente se asocia con la capacidad de restringir la absorción y/o el transporte de iones salinos de las raíces a las hojas (Acosta-Motos *et al.*, 2017). Periodos de exposición prolongada de NaCl resulta en inhibición del crecimiento, cambios en el desarrollo, secuestro o exclusión de iones, reducciones metabólicas, de biomasa, de conductancia estomática y cantidad de clorofila (Negrão *et al.*, 2017; Van Zelm, Zhang *et al.*, 2020; Parra-Terraza *et al.*, 2022). La clorofila tiene un papel fundamental en la regulación de la capacidad fotosintética de las plantas, ayuda en las hojas a realizar la fotosíntesis y fijar suficiente carbono para sustentar el crecimiento general de la planta y en especial la capacidad de continuar con nuevo crecimiento (Henderson, *et al.*, 2020; Javed *et al.*, 2022).

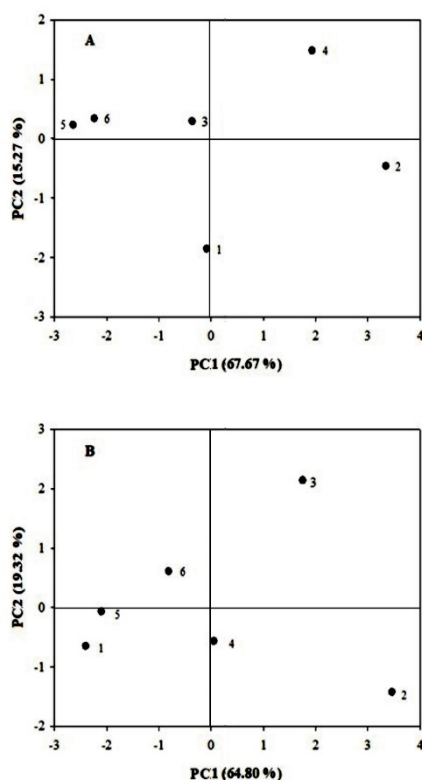


Figura 4. Diferenciación de las seis poblaciones silvestres *Capsicum annuum* silvestre sobre los componentes principales 1 y 2 obtenidos con los ITS en el tratamiento de 25 mM y 50 mM. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.

2.3.3. Relación entre el ITS y las características del suelo

Se observó una relación positiva y significativa entre los ITS y el peso seco de la raíz con la concentración de Cl del suelo de origen de las poblaciones tratadas con 25 mM NaCl (Figura 5).

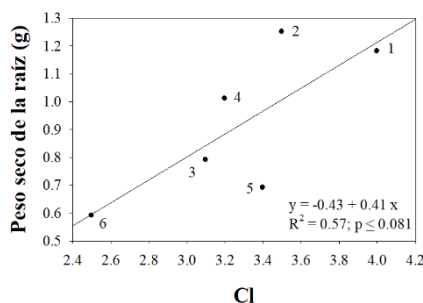


Figura 5. Relación entre el ITS de peso seco de la raíz en el tratamiento 25 mM con la concentración de Cl (en mM) en los sitios de origen. 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.

En el tratamiento de 50 mM de salinidad, los ITS de altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, peso seco del tallo y peso seco de las hojas se correlacionaron positiva y significativamente con la conductividad eléctrica (CE) de los suelos de los sitios de origen de las poblaciones (Figura 6A, 6B, 6C, 6D y 6E). Los ITS de las características área foliar, cantidad de clorofila, peso seco del tallo y peso seco de la hoja se correlacionaron positiva y significativamente con el Na de los suelos de los sitios de origen de las poblaciones (Figura 6F, 6G, 6H y 6I).

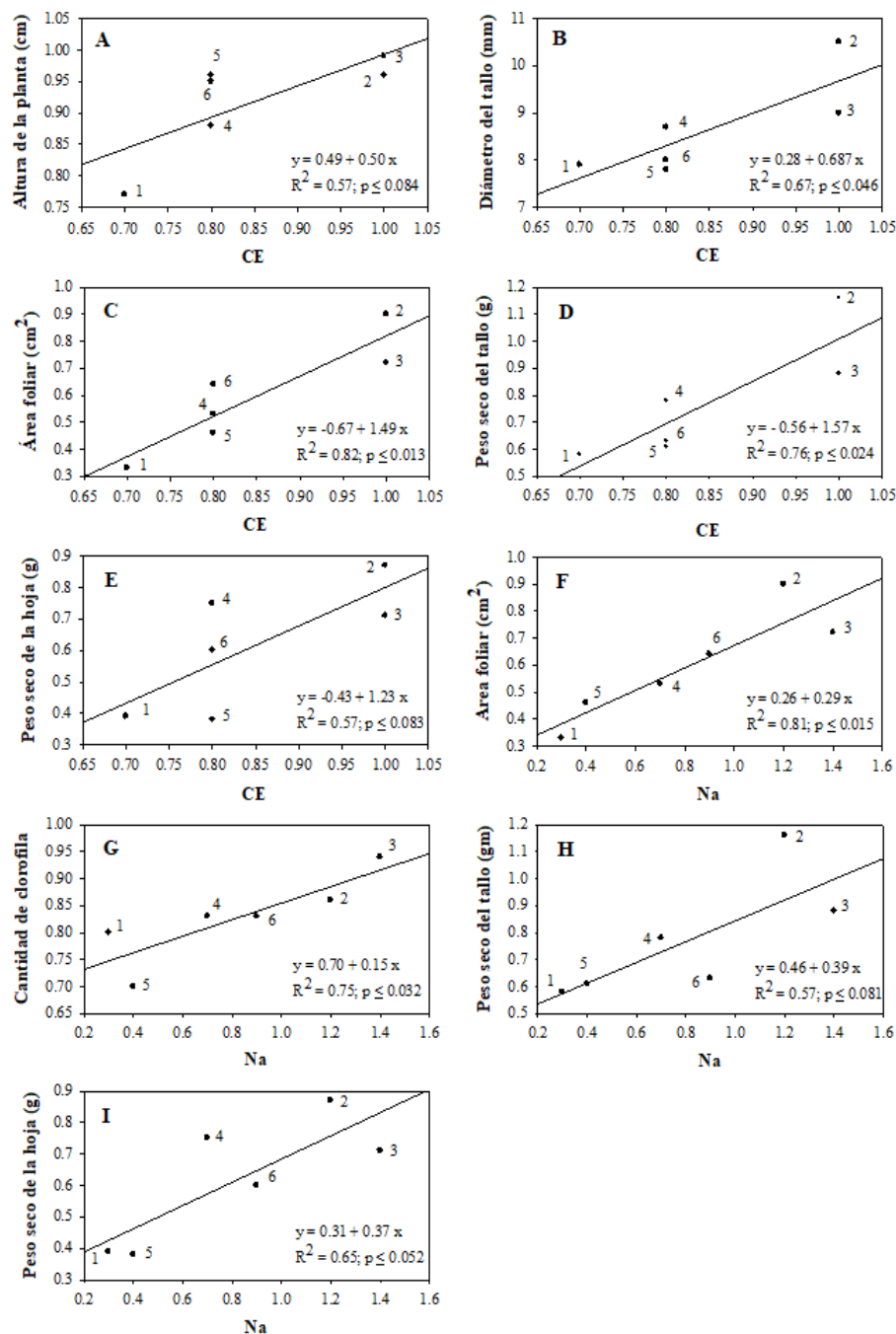


Figura 6. Relaciones entre los ITS en el tratamiento de 50 mM con algunas características del suelo en los sitios de origen: altura de la planta (A), diámetro del tallo (B), área foliar (C) peso seco del tallo (D) y peso seco de la hoja (E) con la conductividad eléctrica (CE), área foliar (F), cantidad de clorofila (G) peso seco del tallo (H) y peso seco de la hoja (I) con el Na. . 1: Mazocahui; 2: Presa Oviachic; 3: Yecorato; 4: Lo de Vega; 5: Cosalá; 6: El Roble.

La variación en los niveles de tolerancia a la salinidad de las poblaciones estudiadas puede ser atribuida a que éstas han estado bajo una presión de selección continua

de salinidad durante largos periodos de tiempo lo que ha provocado que estas plantas desarrollen tolerancia a la salinidad, y adaptación a las diferentes condiciones eco-geográficas del Noroeste de México. Otros investigadores han propuesto que las diferencias fenotípicas entre poblaciones de plantas de la misma especie que crecen en un ambiente uniforme y muestran patrones de diferenciación relacionados con los niveles de salinidad de los suelos se deben a la selección natural que actúa a lo largo de gradientes ambientales (De Frenne *et al.*, 2013). La adaptación de las plantas varía de acuerdo al nivel de salinidad, las especies, la duración de la exposición y la etapa de desarrollo del cultivo. Esta variación ha sido documentada por Wu *et al.* (2011), quienes señalan que existe una variación natural útil en varias líneas de cebada silvestre tibetana en los niveles de tolerancia a la sal en términos de acumulación de biomasa. Por lo tanto, la investigación en germoplasma de parientes silvestres de cultivos de interés agronómico, tiene un gran potencial para mejorarlos en su tolerancia a la sal. Explorar el bagaje genético de los parientes silvestres de los cultivos modernos ha servido para generar genotipos tolerantes a sodio (Munns *et al.*, 2000).

Los análisis univariados y multivariados de mostraron que la población Presa Oviachic fue las más tolerante en los dos niveles de salinidad por cloruro de sodio (25 y 50 mM), mientras que la población Lo de Vega fue la segunda población más tolerante en el tratamiento de 25 mM y la población Yecorato fue la segunda más tolerante en el tratamiento de 50 mM. Estos resultados muestran que estas tres poblaciones son fuentes prometedoras de genes de tolerancia a salinidad que puede incorporarse en futuros programas de mejoramiento.

2.4. CONCLUSIONES

Las poblaciones de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* silvestre del noroeste de México mantienen elevada variación en la tolerancia a la salinidad en las características fenotípicas medidas. Debido a que las plantas crecieron en ambiente uniforme de invernadero, puede considerarse que las diferencias observadas tienen una base genética. Adicionalmente, tres poblaciones mostraron altos niveles de tolerancia a este factor, indicando que esta especie es un recurso genético valioso que debe ser estudiado para mejorar su uso y conservación. Varias de las características medidas se correlacionaron positiva y significativamente con la salinidad de los suelos de origen de las poblaciones estudiadas, indicando que estas características son producto de adaptaciones a las condiciones edáficas locales durante el crecimiento de las plantas de *C. annuum* en su ambiente natural.

2.5. LITERATURA CITADA

- Acosta-Motos, J.R., Ortuño, M.F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sánchez-Blanco, M.J., and Hernández, J.A. 2017. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy* 7(1):18. doi:10.3390/agronomy7010018.
- Barboza, G.E., García, C.C., Bianchetti, L.B., Romero, M.V., and Scaldaferro, M. 2022. Monograph of wild and cultivated chili peppers (*Capsicum* L., Solanaceae). *PhytoKeys* 200:1-423. doi:10.3897/phytokeys.200.71667.
- Carrizo, G.C., Barfuss, M.H., Sehr, E.M., Barboza, G.E., Samuel, R., Moscone, E.A., *et al.* 2016. Phylogenetic relationships, diversification and expansion of chili peppers (*Capsicum*, Solanaceae). *Annals of Botany*. 118(1):35-51. doi:10.1093/aob/mcw079.
- De Frenne, P., Graae, B.J., Rodríguez-Sánchez, F., Kolb, A., Chabrierie, O., Decocq, G., *et al.* 2013. Latitudinal Gradients as natural laboratories to infer species' responses to temperature. *Journal of Ecology* 101:784-795. Food and Agriculture Organization of the United Nations. doi:10.1111/1365-2745.12074.
- Díaz-Sánchez, D.D., López-Sánchez, H., Silva-Rojas, H.V., Gardea-Béjar, A.A., Cruz-Huerta, N., Ramírez-Ramírez, I., and González-Hernández, V.A. 2021. Pungency and fruit quality in Mexican landraces of piquín pepper (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) as affected by plant growth environment and postharvest handling. *Chilean journal of agricultural research* 81(4):546-556. doi:10.4067/S0718-58392021000400546.
- Dong, W., Liu, X., Lv, J., Gao, T., and Song, Y. 2019. The expression of alfalfa *MsPP2CA1* gene confers ABA sensitivity and abiotic stress tolerance on *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry* 143:176-182. doi:10.1016/j.plaphy.2019.09.004
- Efissue, A.A., and Igoma, E.E. 2019. Screening rice (*O. sativa* L.) in salinity gradient to identify performance during vegetative stage for salinity stressed environments. *Journal of Plant Sciences* 7(6):144-150. doi:10.11648/j.jps.20190706.13.
- Henderson, A.N., Crim, P.M., Cumming, J.R., and Hawkins, J.S. 2020. Phenotypic and physiological responses to salt exposure in Sorghum reveal diversity among domesticated landraces. *American Journal of Botany* 107(7):983-992. doi:10.1002/ajb2.1506
- Hernández-Verdugo, S., Guevara-González, R.G., Rivera-Bustamante, R.F., and Oyama, K.J.E. 2001. Screening wild plants of *Capsicum annuum* for resistance to pepper huasteco virus (PHV): Presence of viral DNA and differentiation among populations. *Euphytica* 122(1):31-36. doi:10.1023/A:1012624830340.
- Hernández-Verdugo, S., Guevara-González, R.G., Rivera-Bustamante, R.F., Vázquez-Yanes, C., y Oyama, K. 1998. Los parientes silvestres del chile (*Capsicum* spp.) como recursos genéticos. *Botanical Sciences* (62):171-181. doi:10.17129/botsci.1559.
- Hernández-Verdugo, S., López-España, R.G., Porras, F., Parra-Terraza, S., Villarreal-Romero, M., and Osuna-Enciso, T. 2010. Variación en la germinación entre poblaciones y plantas de chile silvestre. *Agrociencia* 44(6): 667-677.

- Hernández-Verdugo, S., Porras, F., Pacheco-Olvera, A., López-España, R.G., Villarreal-Romero, M., Parra-Terraza, S., *et al.* 2012. Caracterización y variación ecogeográfica de poblaciones de chile (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) silvestre del noroeste de México. *Polibotánica* 33:175-191.
- IPGRI., AVRDC and CATIE. 1995. Descriptors for Capsicum (*Capsicum* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy; the Asian Vegetable Research and Development Center, Taipei, Taiwan, and the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Javed, M., Ashraf, M., Iqbal, M., Farooq, M.A., Zafar, Z.U., and Athar, H.U.R. 2022. Chlorophyll fluorescence, ion uptake, and osmoregulation are potential indicators for detecting ecotypic variation in salt tolerance of *Panicum antidotale* Retz. *Arid Land Research and Management* 36(1):84-108. doi:10.1080/15324982.2021.1957038.
- Liu, M., Yu, H., Ouyang, B., Shi, C., Demidchik, V., Hao, Z., *et al.* 2020. NADPH oxidases and the evolution of plant salinity tolerance. *Plant, Cell & Environment* 43(12):2957-2968. doi:10.1111/pce.13907.
- Munns, R., and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59:651. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
- Munns, R., Hare, R., James, R., and Rebetzke, G.J. 2000. Genetic variation for improving the salt tolerance of durum wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 51(1):69-74. doi:10.1071/AR99057.
- Negrão, S., Schmöckel, S., and Tester, M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany* 119(1):1-11. doi:10.1093/aob/mcw191.
- Oyama, K., Hernández-Verdugo, S., González-Rodríguez, A.G., Sánchez-Peña, P., Garzón-Tiznado, J.A., Casas, A. 2006. Genetic structure of wild and domesticated populations of *Capsicum annuum* (Solanaceae) from northwest Mexico analyzed by RAPDs. *Genet. Resour. Crop Evol.* 53:553-562. doi:10.1007/s107722-009-9448-9.
- Parra-Terraza, S., Angulo-Castro, A., Sánchez-Peña, P., Valdez-Torres, J.B., and Rubio-Carrasco, W. 2022. Effect of Cl- and Na⁺ ratios in nutrient solutions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield in a hydroponic system. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 28(1):67-78. doi:10.5154/r.rchsh.2021.01.001.
- Retes-Manjarrez, J.E., Hernández-Verdugo, S., Pariaud, B., Hernández-Espinal, L.A., Parra-Terraza, S., Trejo-Saavedra, D.L., *et al.* 2018. Resistance to pepper huasteco yellow vein virus and its heritability in wild genotypes of *Capsicum annuum*. *Botanical Sciences* 96(1):52-62. doi:10.17129/botsci.1029.
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. 633-649 p. *Proceeding of the Sixth International Congress on Soilless Culture*, Lunteren. 29 April-5 May. International Society for Soilless Culture (ISOSC), Wageningen, The Netherlands.
- Talei, D., Valdiani, A., Yusop, M.K., and Abdullah, M.P. 2013. Estimation of salt tolerance in *Andrographis paniculata* accessions using multiple regression model. *Euphytica* 189(1):147-160. doi:10.1007/s10681-012-0782-1.
- Tiwari, R.S., Picchioni, G.A., Steiner, R.L., Jones, D.C., Hughs, S.E., and Zhang, J. 2013. Genetic variation in salt tolerance at the seedling stage in an interspecific backcross

- inbred line population of cultivated tetraploid cotton. *Euphytica* 194(1):1-11. doi:10.1007/s10681-013-0927-x.
- Van Zelm, E., Zhang, Y., and Testerink, C. 2020. Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology* 71:403-433. doi:10.1146/annurev-arplant-050718-100005.
- Votava, E., Nabhan, G., and Bosland, P. 2002. Genetic diversity and similarity revealed via molecular analysis among and within an in situ population and ex situ accessions of chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*). *Conservation Genetics* 3(2):123–129. doi:10.1023/A:1015216504565.
- Wu, D., Qiu, L., Xu, L., Ye, L., Chen, M., Sun, D., *et al.* 2011. Genetic variation of *HvCBF* genes and their association with salinity tolerance in Tibetan annual wild barley. *PLoS one* 6(7):e22938. doi:10.1371/journal.pone.0022938.

CAPÍTULO 3

DIFERENCIACIÓN FENOTÍPICA EN POBLACIONES DE CHILE SILVESTRE DEL NOROESTE DE MÉXICO POR EFECTO DE SALINIDAD

RESUMEN

La salinidad es un problema en zonas agrícolas al comprometer el crecimiento de los cultivos. Las variedades modernas de chile se adaptan poco a esta condición; por lo que la búsqueda de variabilidad en plantas de chile silvestre ayudaría para crear variedades mejoradas. El objetivo fue determinar los efectos de la salinidad y la distribución de la variación fenotípica entre poblaciones, entre y dentro de familias, y estimar la proporción de esta variación fenotípica que tiene una base genética. Se probaron tres tratamientos (0, 25 y 50 mM NaCl) en seis poblaciones de chile silvestre del Noroeste de México. Se observaron diferencias significativas entre tratamientos para todos los caracteres. La salinidad redujo todos los rasgos con excepción de grosor de hoja; fue mayor con 50 mM, siendo la materia seca de raíz (45.2%), hojas (38.7%), área foliar (37.6%), biomasa total (33.7%) los rasgos más sensibles. La mayor variación fenotípica se distribuyó dentro de familias. El mayor coeficiente de variación fue en peso seco de raíz (40%). Las poblaciones mantuvieron variación en todos los rasgos excepto en altura de planta; Presa Oviachic fue superior en peso seco de planta, raíz, tallo y hojas, área foliar, número de hojas y diámetro de tallo; Mazocahui en grosor de hoja; Lo de Vega y Yecorato en lecturas SPAD. Los niveles de NaCl influyeron en la expresión fenotípica de los rasgos estudiados. La variabilidad detectada en las poblaciones resulta promisorio para iniciar un proceso de domesticación en chile silvestre.

Palabras clave: Análisis de varianza anidado; *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*; estrés; variabilidad.

ABSTRACT

Salinity is a problem in agricultural areas by compromising the growth of crops. Modern pepper varieties are poorly adapted to this condition; therefore, the search for variability in wild pepper plants would help to create improved varieties. The objective was to determine the effects of salinity and the distribution of phenotypic variation between populations, between and within families, and to estimate the proportion of this phenotypic variation that has a genetic basis. Three treatments (0, 25 and 50 mM NaCl) were tested in six wild pepper populations from Northwestern Mexico. Significant differences were observed between treatments for all traits. Salinity reduced all traits except leaf thickness; was higher with 50 mM, root dry matter (45.2%), leaves (38.7%), leaf area (37.6%), total biomass (33.7%) being the most sensitive traits. The greatest phenotypic variation was distributed within families. The highest coefficient of variation was in root dry weight (40%). The populations maintained variation in all traits except plant height; Presa Oviachic was superior in dry weight of plant, root, stem and leaves, leaf area, number of leaves and stem diameter; Mazocahui in leaf thickness; Yecorato and Lo de Vega in SPAD readings. NaCl levels influenced the phenotypic expression of the studied traits. The variability detected in the populations is promising to begin a domestication process in wild pepper.

Key words: Nested analysis of variance; *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*; stress; variability.

3.1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones de las condiciones ambientales acentuadas por el cambio climático pueden tener consecuencias importantes para la biodiversidad y el deterioro de los ecosistemas naturales (Gratani 2014). Las plantas por ser organismos sésiles están expuestas a múltiples factores bióticos y abióticos que determinan la composición genética de las poblaciones y su diferenciación, algunos de estos factores pueden ser el ensalitramiento de los suelos, fragmentación y destrucción del hábitat (Lienert 2004, Shahid *et al.* 2018). Al suceder esto, se pueden modificar los niveles de variación genética y su distribución entre y dentro de las poblaciones, favoreciendo (Young *et al.* 1993) o no esta cualidad (Fischer *et al.* 2000).

La expresión de la variación genética de una población puede diferir entre los rasgos foliares, de acumulación de biomasa, días a floración, forma, tamaño y color de fruto, entre otros, dependiendo de si están sujetos a selección natural o no y de cómo la selección varía espacialmente (Olsson y Ågren 2002). La diferenciación genética entre poblaciones puede ser impulsada por la selección natural o la deriva genética. La selección natural persiste en poblaciones donde sus individuos presentan diferencias fenotípicas y dichas diferencias son hereditarias y tienen un valor adaptativo. Por el contrario, la deriva genética produce cambios genéticos aleatorios, independientes de las presiones selectivas dadas las condiciones ambientales locales (Schmid y Guillaume 2017).

En las especies silvestres bajo condiciones naturales, sus individuos están en una continua interacción dinámica de adaptación con los factores en los que crece (Matesanz *et al.* 2020). El resultado de esta interacción adaptativa se traduce en la acumulación de la información genética que va guardando entre los miembros de su población, y que se va transmitiendo en las subsiguientes generaciones a través del tiempo (Romero-Higareda *et al.* 2022). De esta manera, aunque la población de individuos en una especie comparte características comunes y se pueden cruzar entre ellos, también es cierto que en cada una existen muchas variantes individuales ya que las presiones diferenciales de selección a través de condiciones contrastantes impulsan la evolución de los rasgos funcionales, lo que resulta en la diferenciación genética entre las poblaciones y la formación de ecotipos (Matesanz *et al.* 2020). Por lo que a partir de las colectas *in situ* de especies *Capsicum* es posible seleccionar genotipos que favorezcan los programas de mejoramiento cuando existe variación en sus rasgos (Pérez-Grajales *et al.* 2009). En las colectas, uno de los factores a revisar es la salinidad del suelo, y sus efectos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Chetelat *et al.* 2009).

Los estudios sobre efectos del ensalitramiento para investigar la variación fenotípica en poblaciones de *Capsicum*, son poco comunes, a pesar de que México cuenta

con una superficie degradada por este fenómeno de 22.3 millones de hectáreas (Etchevers-Barra *et al.* 2023). Al respecto, Félix-Lizárraga *et al.* (2023) evaluaron en estado de plántula, 180 poblaciones de maíz (*Zea mays* L.) de la raza Ratón provenientes de tres estados de la República Mexicana, usaron cloruro de sodio (NaCl) a conductividad eléctrica de 1.85 dS m⁻¹; los resultados mostraron amplia variación genética en las poblaciones. Por otra parte, López-Aguilar *et al.* (2012) probaron 50, 100, 200, y 300 mM NaCl reportando que *C. annuum* var. *glabriusculum* fue más tolerante que *C. annuum* var. *annuum* de acuerdo a biomasa de raíz, tallo y hojas. Mientras que, Bojórquez-Quintal *et al.* (2016) utilizaron sólo 150 mM NaCl, y reportan al chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) más tolerante que *C. annuum* var. *annuum*.

En la mayoría de los suelos salinos, el NaCl aporta entre 50 y 80% de las sales solubles totales y en cantidades excesivas (sales solubles de Na > 15% junto con una conductividad eléctrica > 4.0 dS m⁻¹) afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Rengasamy 2010). Su acumulación es común en suelos en donde se cultiva en condiciones de fertirriego intensivo y se agrava en regiones como el Noroeste de México, donde el cambio climático altera los patrones de lluvia, generando lluvias irregulares y deficientes provocando sequías prolongadas que evitan que las presas y mantos freáticos se recarguen (Hassani *et al.* 2021).

La especie silvestre *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill, es conocida como chiles chiltepines o piquines (Romero-Higareda *et al.* 2023). Es un recurso genético estrechamente vinculado con los cultivos modernos de chile serrano, jalapeño, morrón y ancho. Las poblaciones silvestres son consideradas como un recurso genético valioso, que al expandirse geográficamente (Rice y Mack 1991, Hernández-Verdugo *et al.* 2008) proporcionan reservorios únicos de diversidad genética útiles en el mejoramiento para sus formas cultivadas (Hernández-Verdugo *et al.* 1998, Retes-Manjarrez *et al.* 2018, Alcalá-Rico *et al.* 2023).

Varios investigadores han documentado la variabilidad de esta especie cuando se colecta en campo y de forma silvestre (Hernández-Verdugo *et al.* 2008, Romero-Higareda *et al.* 2022). Para investigar la variación cuantitativa entre y dentro de poblaciones de *C. annuum* L. var. *glabriusculum* se han combinado varias técnicas: estudios con isoenzimas (Hernández-Verdugo *et al.* 2001), RAPD (Oyama *et al.* 2006) y microsatélites (Pacheco-Olvera *et al.* 2012), con resultados que indican un elevado nivel de variación genética entre y dentro de las poblaciones. Al respecto, López-España *et al.* (2016) en condiciones de invernadero, señalaron que los rasgos foliares presentan la mayor variación fenotípica, seguidos de los rasgos reproductivos y vegetativos. Mientras que Romero-Higareda *et al.* (2022) detectaron

diferenciación fenotípica como resultado de diferentes regímenes de selección natural en cada población, considerando los factores de agua y luz.

Diversos estudios han cuantificado el nivel de variación dentro de poblaciones de *Capsicum*, seleccionando un número menor de poblaciones y aumentando el número de individuos por población (Hernández-Verdugo *et al.* (2008) en un estudio con poblaciones del Noroeste de México, documentaron que la mayor proporción de variación fenotípica de *C. annuum* var. *glabriusculum* se distribuyó dentro de familias, seguida entre familias y entre poblaciones y agregan que de la variación genética total (38.2%), la mayor proporción se detectó dentro de las poblaciones (69.9%) seguida entre poblaciones (31.9%). Mientras que Romero-Higareda *et al.* (2023) con poblaciones de varias regiones de México reportó valores de variación fenotípica dentro de familia de 49.8% y de esta 50.1% se debe a una base genética.

Por lo anterior, el objetivo fue determinar la distribución de la variación fenotípica entre poblaciones, entre y dentro de familias, y estimar la proporción de la variación fenotípica que tiene una base genética en diferentes rasgos en respuesta a tres niveles de NaCl en condiciones de invernadero.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Sitios de colecta

Se recolectaron muestras de frutos fisiológicamente maduros de seis poblaciones de *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser y Pickersgill en los meses de noviembre y diciembre de los años 2014 y 2015. Las plantas se ubicaron en su hábitat silvestre, la vegetación circundante corresponde a matorral espinoso de piedemonte y bosque bajo caducifolio nativo del noroeste de México distribuido en un gradiente latitudinal entre 29° 31' N y 23° 55' N (± 1000 km) (Figura 7).

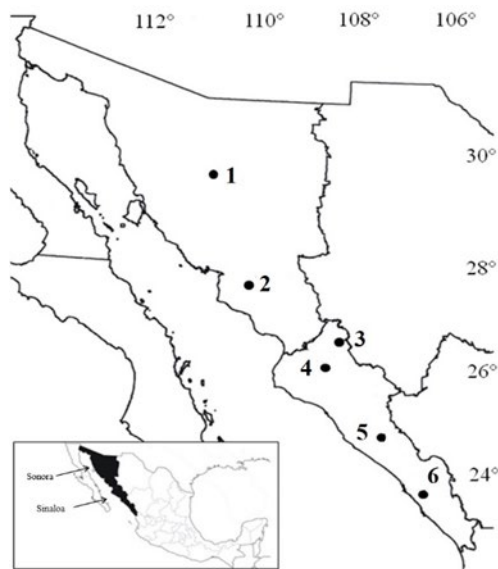


Figura 7. Localización geográfica de 6 poblaciones silvestres de *C. annuum* L. recolectadas en los estados de Sonora y Sinaloa, México. Mazocahui (1), Presa Oviachic (2), Yecorato (3), Lo de Vega (3), Cosalá (4) y El Roble (5).

En cada población se obtuvo una muestra de suelo compuesta (de 6 a 22 sub muestras individuales) se recolectaron a una profundidad de 30 cm y a una distancia promedio de 40 cm del tallo de las plantas. Previo al análisis del suelo, cada muestra se secó a temperatura ambiente (21 a 32 °C), se trituró y tamizó en malla de 2 mm. La determinación de la conductividad eléctrica, pH, Na⁺ y Cl⁻ se obtuvo por extracto de saturación con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Datos geográficos, climáticos y edáficos de las seis poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* del noroeste de México.

Población	LAT	LON	TMA	PMA	CE	pH	Na ⁺	Cl ⁻
1. Mazocahui	29°31'	110°05'	21.3	534	0.7	6.6	0.3	4.0
2. Presa Oviachic	27°46'	109°54'	24.7	410	1.0	7.8	1.2	3.5
3. Yecorato	26°26'	108°12'	24.1	818	1.0	6.8	1.4	3.1
4. Lo de Vega	26°08'	108°32'	23.6	628	0.8	7.6	0.7	3.2
5. Cosalá	24°24'	106°36'	24.9	1098	0.8	7.5	0.4	3.4
6. El Roble	23°55'	106°53'	23.5	587	0.8	7.8	0.9	2.5

LAT: Latitud Norte; LON: Longitud Oeste; TMA: temperatura media anual (°C). PMA: precipitación media anual (mm); CE: conductividad eléctrica (dS m⁻¹). pH: potencial hidrógeno. Na⁺ y Cl⁻ en mM.

Los sitios de muestreo (Figura 7) fueron elegidos para representar una amplia distribución geográfica y diferentes hábitats en los que se encuentran las poblaciones silvestres de esta especie en el Noroeste de México.

3.2.2. Descripción de la planta

El hábito de reproducción de *C. annuum* var. *glabriusculum* silvestre es exclusivamente a través de semillas. Las plantas son perenes, erectas o arbustivas de 1 a 4 m de altura. Muestran un hábito de crecimiento arbustivo y un estado reproductivo espontáneo. Sus frutos en etapa madura son picantes, pequeños, rojos, casi redondos y erectos que incentivaban el consumo por aves frugívoras favoreciendo su amplia dispersión (IPGRI, AVRDC y CATIE 1995, Votava *et al.* 2002, Barboza *et al.* 2022).

3.2.3. Diseño experimental

En campo, se seleccionaron las plantas que presentaran frutos fisiológicamente maduros o próximos a verse completamente rojos. Así, en Mazocahui fueron 4, Presa Oviachic 11, Yecorato 17, Lo de Vega 7, Cosalá 16 y El Roble 20 plantas. Los frutos se recolectaron e identificaron por planta. Se secaron a la sombra a temperatura ambiente (21 a 32 °C). Para su traslado se guardaron en bolsas de plástico a temperatura de 5 °C y se resguardaron en el Centro de Recursos Genéticos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Las semillas de los frutos se extrajeron a mano y se remojaron en 1 000 mg L⁻¹ de ácido giberélico durante 24 h. Se germinaron en charolas de poliestireno de 60 cavidades (cavidad individual = 230 cm³) rellenas con turba como sustrato, en un invernadero de ventana cenital fija, cubierta plástica con 88% de transmitancia y paredes con malla antiáfidos. Durante el experimento prevaleció una temperatura media de 22.3 °C y humedad relativa de 67%. Después de germinar, las plántulas crecieron en condiciones uniformes de riego y luz y cuando tuvieron de dos a cinco hojas verdaderas se trasplantaron a nuevas charolas de poliestireno de 60 cavidades con turba (1 plántula por cavidad). Cada planta colectada en campo representó una familia. De cada familia se sembraron sus semillas y eligieron tres individuos. Con base al número de plantas colectadas se formaron diferente número familias en cada una de las seis poblaciones: Mazocahui 4, Presa Oviachic 11, Yecorato 17, Lo de Vega 7, Cosalá 16 y El Roble 20 familias. En estas seis poblaciones se analizaron tres tratamientos diseñados a partir de la solución universal de Steiner (Steiner 1984) expresada en mM: 12 NO³⁻, 1 H₂PO⁴⁻, 3.5 SO₄²⁻, 7 K⁺, 4.5 Ca²⁺, 2 Mg²⁺. Se usó agua destilada para su preparación. Esta solución no contiene cloruro de sodio, por lo que se les incorporó, formando los tratamientos: 1) 0 (control), 2) 25 y 3) 50 mM NaCl obteniendo una conductividad eléctrica de 2.0, 4.5 y 7.0 dS m⁻¹ y un pH de 6.78, 6.71 y 6.47, respectivamente. El número de repeticiones en cada tratamiento fue de 225. Dando un total de 675 plantas en el experimento. La unidad experimental consistió en una planta. Los tratamientos se iniciaron a los 30 días después del trasplante y se continuó durante 42 días más. Los tratamientos iniciaron al 25% de las dosis de NaCl durante los primeros 10 días

hasta llegar al 100% 15 días después. Los riegos fueron por inmersión hasta el punto de escurrimiento y durante la mañana. Por el tipo de sustrato empleado y contenedor, cada planta tenía disponible 150 mL de agua (Delgado *et al.* 2016). Las sales fertilizantes utilizadas fueron: cloruro de sodio grado analítico; mientras que, el nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, fosfato monopotásico y complejo de microelementos fueron grado comercial.

3.2.4. Rasgos evaluados

A los 42 días de aplicados los tratamientos de salinidad, en cada planta se midieron los siguientes caracteres: (1) peso seco de la planta (g) se usó una balanza analítica marca Sartorius® con precisión 0.01 g, el secado se hizo a 60-70 °C durante 72 h en un horno de secado Felisa® FE-292; este rasgo se dividió en (2) peso seco de raíz, (3) de tallo y (4) de hojas (g); (5) área foliar (cm²), se obtuvo con el medidor de área foliar Li-3100C, LI-COR® Biosciences, Lincoln, Ne, EE. UU.; (6) número de hojas total en cada planta; (7) grosor de hoja (µm), esta medición se hizo en hojas completamente maduras e hidratadas usando un micrómetro DRAPER® SM-510 con precisión 0.01-12.5 mm; (8) índice de verdor en lecturas SPAD (Soil Plant Analysis Development 502, Konica Minolta Sensing®, Tokyo, Japan); (9) altura de planta (cm) medida desde la superficie del sustrato hasta el meristemo apical más alto, con un flexometro, y (10) diámetro de tallo (mm), medido a dos centímetros por encima del nivel del suelo obtenido con vernier digital Truper® CALDI-6MP.

3.2.5. Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza anidado para evaluar la distribución de las cantidades relativas de variación fenotípica en cada tratamiento en donde se determinó la variación entre poblaciones, entre familias dentro de poblaciones y la variación dentro de familias para cada característica fenotípica medida. Tanto las poblaciones como las familias dentro de las poblaciones fueron considerados factores aleatorios. Para estimar las contribuciones genéticas en relación al ambiente en la variación de las características, se usó la varianza ambiental o componente de plasticidad, y la suma de la variación entre población y entre familia como un estimador del componente genético (Venable y Búrquez 1989, Hernández-Verdugo *et al.* 2008). Los efectos de los tratamientos de la concentración de sal en los rasgos evaluados y las diferencias entre poblaciones se analizaron con un ANOVA de una vía, cuando las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) se realizó la comparación múltiple de medias Tukey ($\alpha = 0.05$). Para evaluar el nivel de variación de la diferenciación fenotípica entre rasgos estimamos se utilizó el coeficiente de variación (CV) de los rasgos medidos.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Efecto de la salinidad

En todas las características morfológicas de plantas de *C. annuum* se observaron diferencias significativas por efecto de la salinidad (Figura 8). La mayoría de los rasgos evaluados tendieron a disminuir con niveles de 25 y 50 mM de NaCl (Figura 8A, 8B, 8C, 8D, 8E, 8F, 8H, 8I y 8J), excepto el grosor de hoja, que aumentó de forma significativa con algún nivel de salinidad (25 y 50 mM). Cabe mencionar que, ambos niveles de NaCl fueron estadísticamente diferentes en los caracteres de peso seco total, raíz y hojas; así como, área foliar, número de hojas, lectura SPAD y diámetro de tallo (Figura 8A, 8B, 8D, 8E, 8F, 8H, 8I y 8J, respectivamente). Mientras que, el peso seco de tallo, grosor de hoja y altura de planta se comportaron estadísticamente igual (Figura 8B, 8G y 8I). Por otro lado, las plantas crecidas sin condiciones de salinidad (0 mM) presentaron mayor biomasa de raíz, tallo y hojas, así como, mayor área foliar, número de hojas, lecturas SPAD, altura y diámetro de tallo (Figura 8G).

Es importante señalar que la reducción de los rasgos analizados fue mayor con el nivel más alto (50 mM) de salinidad. En este sentido, los rasgos más sensibles en este nivel de salinidad fueron la materia seca de raíz (45.2%), materia seca de hojas (38.7%), área foliar (37.6%), biomasa total (33.7%) y materia seca de tallos (24.4%).

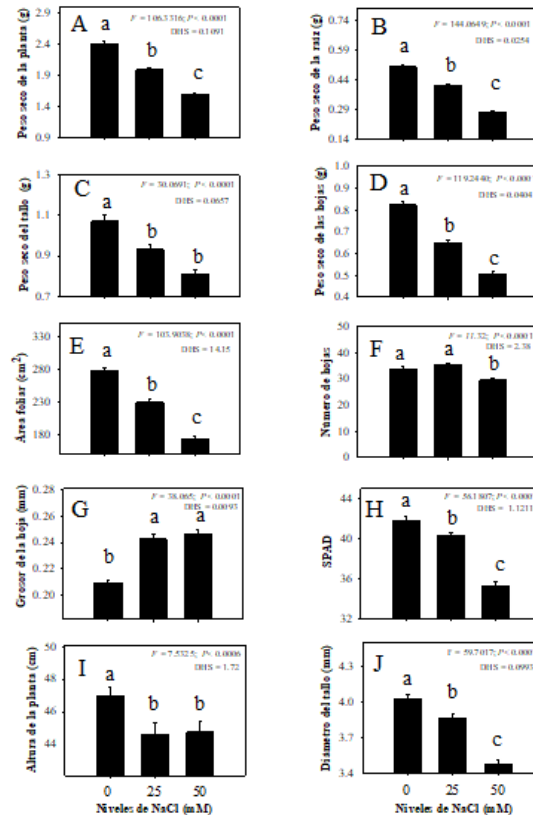


Figura 8. Promedios de los rasgos ($\pm$ E. E.) de *C. annuum* silvestre con diferentes niveles de NaCl: 0 mM, 25 mM, y 50 mM. Barras con misma literal dentro de cada parámetro (rasgo) no son estadísticamente diferentes, (Tukey, $\alpha = 0.05$).

3.3.2. Variación dentro de familias

En los tres niveles de NaCl, la mayor cantidad relativa de variación total se distribuyó dentro de familias (VFDF) (Cuadro 5). En el nivel de 0 mM, el valor promedio total fue de 54.6%; mientras que, en 25 mM se redujo a 52.8%, en 50 mM fue de 50.8%. Todas las características evaluadas presentaron mayor variación dentro de familia a excepción de altura de planta, que se registró entre familias (VFEF) en los tres niveles, y el peso seco de hoja que fue en VFEP con 25 mM. Los valores de variación dentro de familias oscilaron desde el 41.5% en peso seco total hasta 83.5% en grosor foliar en 0 mM. Mientras que, en 25 mM, fueron entre 34.2% en altura de planta a 71% en lecturas SPAD. Finalmente, en las condiciones de 50 mM de NaCl, el valor más bajo fue en la altura de planta con 22.4% y el más elevado fue de 67.3% en lecturas SPAD.

3.3.3. Variación entre familias

La variación fenotípica dentro de cada población, en cada tratamiento, presentó rasgos que aumentaron con el incremento del nivel de NaCl como el área foliar, grosor de hoja y la altura de planta (Cuadro 5). De ellos, el grosor de hoja fue el rasgo que más aumentó, ya que pasó de 14.2 a 28.7% en el nivel de 0 mM; mientras que, en las dos condiciones de salinidad (25 y 50 mM) se obtuvo el 30%. En cuanto a la altura de planta se registraron valores altos en los tres niveles de salinidad; 47% en 0 mM, 63% en 25 mM y 64.4% en 50 mM. Por otra parte, la lectura SPAD y diámetro de tallo fueron rasgos que redujeron su variación fenotípica en ambos niveles de NaCl. En este sentido, las lecturas SPAD en el nivel 0 mM tuvo 26.4%, 16.1% en 25 mM y 12.8% en 50 mM. El diámetro de tallo en 0 mM fue de 26.1%, 16.7% en 25 mM y 13.8% en 50 mM.

Es importante señalar que, en los tres niveles de salinidad la menor variación fenotípica total promedio se presentó entre poblaciones (VFEP), ya que en 0 mM se obtuvo el 17.7%, en 25 mM el 16.1% y en 50 mM el 20.1%. Los extremos de variación por nivel de NaCl fueron de 2.3% en grosor de hoja a 30.2% en peso seco de tallo en 0 mM. En el nivel intermedio de salinidad (25 mM), la altura de planta presentó 2.5 a 43.8% en peso seco de hojas. Finalmente, en el nivel más alto (50 mM) se detectó 2.9% en grosor de hoja a 35.6% en peso seco total.

3.3.4. Variación genética

De la variación fenotípica total observada, el 45.4% en 0 mM, 47.2% en 25 mM y 49.2% en 50 mM tiene una base genética (VGT). Para los tres niveles de salinidad (0, 25 y 50 mM) la mayor variación se distribuyó dentro de poblaciones (63.0, 65.8 y 59.1%, respectivamente) y el resto (37.0, 34.2 y 40.9%, respectivamente) entre poblaciones. En 0 mM, el peso seco total, peso de tallo, altura de planta, peso de hoja y área foliar presentaron valores superiores al 50%; mientras que, el grosor de hoja tuvo el valor más bajo (16.5%). En 25 mM, la altura de planta, peso seco de hojas, área foliar, peso seco de raíz y peso seco total presentaron variación genética superiores al 50%; en cambio, las lecturas SPAD registró el valor más bajo (29.0%). En 50 mM, la altura de planta, peso seco total, peso seco de tallo, área foliar y peso seco de raíz presentaron valores mayores al 50%; en contraste, el grosor de hoja y lecturas SPAD presentaron valores promedios por debajo de 35%.

Cuadro 5. Porcentaje de variación fenotípica entre poblaciones (VFEP), entre familias (VFEF) y dentro de familias (VFDF). Variación genética total (VGT = VFEP + VFEF)/VFEP + VFEF + VFDF), variación genética entre poblaciones (VGP = VFEP / VFEP + VFEF) y variación genética entre familias (VGF = VFEF / VFEP + VFEF), para diez caracteres medidos en poblaciones de *C. annuum* silvestre del Noroeste de México bajo tres niveles de NaCl.

Rasgos	VF_{EP}	VF_{EF}	VF_{DF}	V_{GT}	V_{GP}	V_{GF}
0 mM						
Peso seco total	29.2	29.3	41.5	58.5	50.0	50.0
Raíz	20.6	22.6	56.8	43.2	47.7	52.3
Tallo	30.2	27.3	42.5	57.5	52.6	47.4
Hoja	21.6	32.3	46.1	53.9	40.1	59.9
Área foliar	23.6	30.2	46.2	53.8	43.9	56.1
Número de hojas	16.7	21.6	61.7	38.3	43.5	56.5
Grosor de hoja	2.3	14.2	83.5	16.5	13.8	86.2
SPAD	11.2	26.4	62.4	37.6	29.7	70.3
Altura de planta	8.7	47.2	44.1	55.9	15.6	84.4
Diámetro de tallo	12.9	26.1	61.0	39.0	33.1	66.9
Media	17.7	27.7	54.6	45.4	37.0	63.0
25 mM						
Peso seco total	24.7	29.5	45.8	54.2	45.6	54.4
Raíz	18.4	37.5	44.1	55.9	32.9	67.1
Tallo	4.2	35.1	60.7	39.3	10.6	89.4
Hoja	43.8	15.2	41.0	59.0	74.2	25.8
Área foliar	22.6	33.4	44.0	56.0	40.3	59.7
Número de hojas	7.3	35.6	57.1	42.9	17.1	82.9
Grosor de hoja	11.5	28.7	59.8	40.2	28.7	71.3
SPAD	13.0	16.1	71.0	29.0	44.7	55.3
Altura de planta	2.5	63.3	34.2	65.8	3.8	96.2
Diámetro de tallo	13.4	16.7	69.9	30.1	44.5	55.5
Media	16.1	31.1	52.8	47.2	34.2	65.8
50 mM						
Peso seco total	35.6	25.9	38.5	61.5	57.9	42.1
Raíz	29.9	22.1	48.0	52.0	57.6	42.4
Tallo	27.1	33.8	39.1	60.9	44.6	55.4
Hoja	20.4	21.7	57.9	42.1	48.5	51.5
Área foliar	22.8	35.4	41.8	58.2	39.1	60.9
Número de hojas	3.3	30.4	66.3	33.7	9.7	90.3
Grosor de hoja	2.9	30.8	66.4	33.6	8.5	91.5
SPAD	19.9	12.8	67.3	32.7	60.7	39.3
Altura de planta	13.2	64.4	22.4	77.6	17.0	83.0
Diámetro de tallo	25.7	13.8	60.4	39.6	65.0	35.0
Media	20.1	29.1	50.8	49.2	40.9	59.1

3.3.5. Variación entre poblaciones

Las comparaciones de medias muestran que las poblaciones difieren en todas las características con excepción de altura de planta (Figura 9). Mientras que la población Mazocahui presentó las hojas más gruesas y menor área foliar (Figura 9G y 9E). En tanto que Presa Oviachic se caracterizó por tener la mayor producción de biomasa total, raíz, tallo y hoja (Figura 9A, 9B, 9C y 9D); así como, los valores más altos en área foliar, número de hojas, diámetro de tallo y el menor grosor de hojas (Figura 9E, 9F, 9J y 9G). La población Yecorato destacó por presentar hojas con altas lecturas SPAD; pero, bajos contenidos de biomasa en raíz (Figura 9H y 9B). En lo referente a la población Lo de Vega tuvo el mayor contenido de clorofila (Figura 9H) y valores intermedios en los demás rasgos. Los individuos de la población Cosalá mostraron los valores más bajos de peso seco de hoja, contenido de clorofila y diámetro de tallo (Figura 9D, 9H y 9J). Por último, El Roble exhibió los menores promedios en peso seco total, de raíz, peso seco de tallo y número de hojas (Figura 9A, 9B, 9C y 9D).

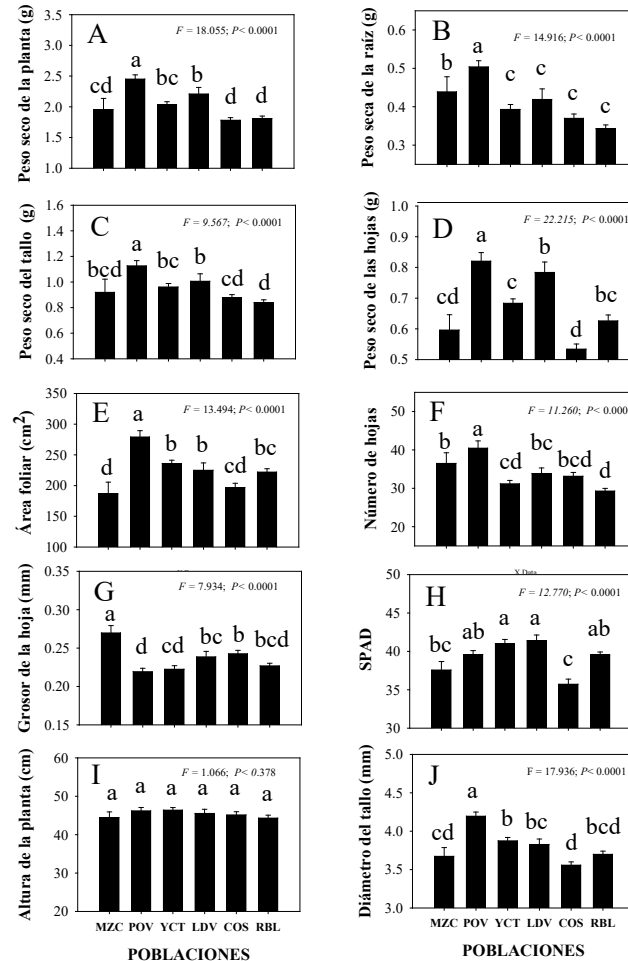


Figura 9. Promedios de los rasgos ($\pm$ E. E.) en plantas de seis poblaciones de *C. annuum* silvestre del Noroeste de México. MZC: Mazocahui, POV: Presa Oviachic, YCT: Yecorato, LDV: Lo de Vega, COS: Cosalá y RBL: El roble. Datos agrupados de tres niveles de NaCl. Letras diferentes en minúsculas indican diferencias de medias entre poblaciones. (Tukey, $\alpha = 0.05$).

3.3.6. Variación fenotípica

Los resultados obtenidos indican que las poblaciones silvestres de *C. annuum* estudiadas con los tres niveles de salinidad, expresaron altos niveles de variación fenotípica (Cuadro 6). De diez rasgos morfológicos, ocho mantuvieron coeficientes de variación por arriba de 20%. Los caracteres más variables fueron materia seca de raíz (41.8%), número de hojas (39.8%), peso seco de tallo (39.6%), área foliar (38.7%), peso seco de hojas (38.5%), peso seco total (33.9%), grosor de hoja (22.8%), altura de planta (20.8%). El promedio general de variación fue de 30.9% para los rasgos fenotípicos. Entre las poblaciones, la que presentó la mayor variación fue Mazocahui (41.3%), seguida de Lo de Vega (31.8%), Cosalá (29.4%), El Roble (27.9%), Presa Oviachic (27.7%) y Yecorato (26.9%).

Cuadro 6. Coeficientes de variación (%) de rasgos en poblaciones silvestres de *C. annuum* del noroeste de México. Datos agrupados de tres tratamientos de NaCl.

Rasgo	Mazocahui	Presa Oviachic	Yecorato	Lo de Vega	Cosalá	El Roble	Promedio
Peso seco total	56.0	28.0	27.6	38.6	28.7	30.0	33.9
Raíz	53.5	31.5	40.9	52.2	36.6	35.9	41.8
Tallo	67.4	35.6	34.7	45.9	32.6	35.2	39.6
Hoja	50.3	34.0	26.1	34.2	37.5	40.8	38.5
Área foliar	61.4	36.5	29.7	42.1	42.3	32.7	38.7
Número de hojas	46.0	46.6	34.7	33.8	36.1	32.4	39.8
Grosor de hoja	21.4	20.3	25.7	23.4	22.0	19.9	22.8
SPAD	17.5	12.8	17.4	14.3	22.2	13.1	17.2
Altura de planta	20.4	19.1	18.5	18.9	21.7	23.5	20.8
Diámetro de tallo	18.5	12.9	13.9	14.6	14.5	15.3	15.4
Promedio	41.3	27.7	26.9	31.8	29.4	27.9	30.9

3.4. DISCUSIÓN

3.4.1. Efecto de la salinidad

Bajo estrés salino, las plantas reducen su crecimiento por diferentes alteraciones bioquímicas y fisiológicas. En las primeras encontramos el metabolismo enfocado a acumulación de osmolitos de bajo peso molecular como prolina, mientras que en las segundas está el cierre de estomas que reducen la asimilación de CO₂. Así también, el cierre de estomas es ocasionado por moléculas como el ácido abscísico, sintetizado en hojas y raíces (Munns *et al.* 2010, Zhao *et al.* 2020, Javed *et al.* 2022). En este contexto, las raíces permiten a las plantas obtener agua y nutrientes; sin embargo, son las primeras en exponerse al exceso de sales, y en altas concentraciones detienen la división celular y el crecimiento (Acosta-Motos *et al.* 2017, Van-Zelm *et al.* 2020); efecto similar ocurre en la parte aérea de la planta reduciendo el área foliar (Fang *et al.* 2021). Lo descrito anteriormente, se observó en las plantas de *C. annuum* expuestas a NaCl ya que presentaron disminución de la materia seca de raíz, hojas, y área foliar; no obstante, el grosor de hoja fue favorecido significativamente con la salinidad, este incremento también se ha reportado en otras plantas como *Imperata cylindrica* (Hameed *et al.* 2009) cuando fueron colectadas en sitios donde el suelo presentó conductividad eléctrica de 15.42 dS m⁻¹ y en *Parthenium argentatum* A. Gray cuando fue sometida a niveles crecientes de NaCl (43 a 684 mM) en un sistema hidropónico con raíces flotantes (Di-Baccio *et al.* 2024).

Una adaptación relacionada con el estrés salino en periodos prolongados es el aumento del grosor de la hoja (Hameed *et al.* 2009). En nuestro estudio las plántulas

expuestas a los tratamientos 25 y 50 mM NaCl incrementaron este valor en 16.1 y 17.8%, respectivamente. Tal comportamiento se puede relacionar con lo reportado por Fernández-García *et al.* (2014) donde estudiaron plantas de *Lawsonia inermis* L. regadas con altas concentraciones de sal y mencionan que el nivel de 75 mM NaCl las hojas aumentaron su grosor como estrategia para maximizar el potencial de la fotosíntesis, pero ello implicó una mayor inversión en tejido asimilatorio.

3.4.2. Distribución de la variación fenotípica y genética

3.4.2.1. Variación fenotípica

La mayor variación fenotípica ocurrió dentro de familias, en los tres niveles de NaCl, seguida de dentro de poblaciones (entre familias) y entre poblaciones. Estos resultados coinciden con Hernández-Verdugo *et al.* (2008) al estudiar la variación en la germinación en chile silvestre, reportan el mayor porcentaje de variación fenotípica dentro de familias (61.8%), seguida de entre familias (24.7%) y entre poblaciones (13.5%). La variación dentro de familias fue afectada por el nivel de estrés, se redujo en 3.3% con 25 mM y 7.0% con 50 mM, con respecto a 0 mM, esta reducción en la variabilidad fenotípica al aumentar el estrés, coincide con lo reportado por Kano-Nakata *et al.* (2019) quienes señalan que la variabilidad fenotípica del sistema radical de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) se vio afectada por las intensidades del estrés por sequía; los límites en la variabilidad fenotípica antes señalados, también son señalados por Baeza *et al.* (2013) en plantas de *Typha domingensis* y *Schoenoplectus americanus* usando 6 niveles de salinidad (0 - 12 g L⁻¹ de sólidos disueltos totales) al medir biomasa y altura de planta.

Entre familias, los caracteres grosor de hojas y número de hojas mostraron aumentos en sus niveles de variación; en el nivel de 25 mM se obtuvo 102.1 y 64.8%, respectivamente, con respecto a 0 mM; mientras que, en 50 mM fue de 116.9 y 40.7%, respectivamente. Bajo condiciones de estrés, la variación en la morfología de la hoja juega un papel muy importante en la adaptabilidad de la planta (Verhoeven y van Gurp 2012, Stotz *et al.* 2021, Romero-Higareda *et al.* 2022). Bajo pequeñas escalas espaciales (población), se han reportado importantes fuentes de heterogeneidad en las plantas silvestres de *C. annuum* (Hernández-Verdugo *et al.* 2008). El exceso de sales en los suelos es un factor que reduce la absorción de agua de las plantas, por lo que adaptarse a esta limitante favorece al reducir el riesgo de morir, estas adaptaciones incluyen el aumento del grosor de la hoja y reducción del área foliar (Acosta-Motos *et al.* 2017).

3.4.2.2. Variación genética (VGT)

De la variación fenotípica total observada el 45.4% en 0 mM, 47.2% en 25 mM y 49.2% en 50 mM, tiene una base genética. Conforme aumentó el nivel de NaCl, la

proporción de VGT se incrementó, evidenciando la importancia del componente genético en la diferenciación de las poblaciones estudiadas (Figura 9). El incremento de variación genética en los caracteres de grosor de hoja y peso seco de la raíz fue de 143.6 y 29.4% en 25 mM y de 103.6 y 20.4% en 50 mM, respectivamente. Este componente genético ha sido importante para la adaptación de las plantas de chile silvestre en ambientes heterogéneos, ya sean abióticos como luz (Hernández-Verdugo *et al.* 2015) y bióticos como virus (Retes-Manjarrez *et al.* 2018). La detección de VGT en colectas de Maíz ha permitido la selección de genotipos tolerantes con base en el peso seco de la raíz cuando se ha usado una conductividad eléctrica de 18.5 dS m⁻¹ de NaCl en estado de plántula (Félix-Lizárraga *et al.* 2023).

3.4.3. Variación entre poblaciones

La población Presa Oviachic fue significativamente superior al resto de las poblaciones en la unidad de medida de siete rasgos (peso seco de planta, peso seco de raíz, peso seco de tallo, peso seco de hojas, área foliar, número de hojas y diámetro de tallo); mientras que, Mazocahui, Cosalá y El Roble fueron más afectadas al presentar menor peso seco de la planta, peso seco de la raíz, peso seco del tallo, peso seco de las hojas, área foliar, número de hojas, lecturas SPAD y diámetro de tallo. La supresión del crecimiento de las plantas bajo estrés salino puede deberse a la disminución de la división y elongación celular reduciendo la actividad del meristemo apical aéreo y radical (Efisue e Igoma 2019, Henderson *et al.* 2020). La reducción de los rasgos morfológicos es algo reportado en plantas de *Capsicum annuum*, *Zea mays* y *Parthenium argentatum* A. Gray ya que genera un estrés osmótico (disminución del potencial hídrico externo) que compromete la capacidad de la planta para absorber agua que a nivel macroscópico reduce la expansión de las células de la raíz y los brotes, también se compromete su capacidad fotosintética al ser insuficiente para generar nuevos tejidos (Aktas *et al.* 2006, Félix-Lizárraga *et al.* 2023, Di-Baccio *et al.* 2024). Al respecto, Ghonaim *et al.* (2021) reportaron que la longitud de brotes y raíces fue diferente en seis genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) con 200 mM de NaCl, en la misma investigación señalan que algunos genotipos fueron más sensibles que otros coincidiendo con lo encontrado en este trabajo (Figura 9). Por otra parte, un mayor follaje es determinante para un mejor rendimiento en condiciones de NaCl, al respecto Efisue y Dike (2020) indicaron que las variedades de arroz que mejor rendimiento de grano presentaron en cuatro condiciones de NaCl (0, 2, 3 y 6 dS m⁻¹) fueron las que desarrollaron mayor área foliar.

La población Mazocahui generó hojas más gruesas y puede explicarse por la necesidad de mantener una mejor eficiencia, favorecida por un mayor contenido del agua foliar, y un parénquima más esponjoso, lo que podría mejorar la conductividad hídrica y la difusión de CO₂ de estas plantas (Velikova 2020). Esta adaptación es reportada en plantas de *Atriplex patula* (tolerante al exceso de sales) (Glenn *et al.* 2012) y *Lawsonia inermis* L. (Fernández-García 2014). De acuerdo con Acosta-Motos *et al.* (2017) esta adaptación puede implicar una mayor inversión en tejido asimilatorio como estrategia para maximizar el potencial fotosintético; es decir, un costo para una adaptación, que afecta el crecimiento de otras partes de la planta, fenómeno visto en la población Mazocahui.

La variabilidad de las plantas a factores abióticos cambiantes, tiende a aumentar la aptitud para crecer y desarrollarse en diversos ambientes. La baja o nula variabilidad incluso puede ser adaptativa cuando el cambio ambiental no es predecible o cuando ninguna respuesta fenotípica puede superar el desafío ambiental (Valladares *et al.* 2007). En la presente investigación hubo rasgos, a nivel poblaciones, que no mostraron aumentos en la variabilidad como ocurrió en la altura de planta. Sin embargo, si se diferenciaron poblaciones que se adaptaron mejor a los dos niveles de NaCl. En la Figura 9 Presa Oviachic destacó en rasgos importantes como la acumulación de biomasa total y de raíz, tallo y hojas. Probablemente el entorno en el que ha estado creciendo y reproduciéndose le presentó ventajas bajo estrés por NaCl. Otros factores de estrés como la falta de agua o luz ha beneficiado a otras poblaciones como lo reporta Romero-Higareda *et al.* (2022), donde las poblaciones Lo de Vega y Yecorato fueron las de mayor acumulación de biomasa.

3.4.4. Variación fenotípica (CV)

El carácter adimensional del CV permite una fácil comparación de la magnitud de la variación fenotípica entre rasgos y poblaciones. Los resultados mostraron que las poblaciones de *C. annuum* silvestre expresan altos niveles de variación fenotípica. Entre poblaciones, Mazocahui presentó el valor más alto. Tal comportamiento, se puede relacionar con lo reportado por Romero-Higareda *et al.* (2022) quienes encontraron una variación de 23.6% en esta población, al medir 9 caracteres morfológicos en seis poblaciones de *C. annuum* silvestre sometidas a cuatro tratamientos de agua y luz. Estos autores también registraron un CV similar en los rasgos de altura de planta (19.3%), diámetro de tallo (13.2%) y área foliar (35.4%).

El peso seco de la raíz (41.8%) fue la variable que presentó la mayor variación promedio. Varios estudios han documentado que la variabilidad de los rasgos de las raíces es una ventaja para la adaptación efectiva al estrés por sequía y salinidad (Sandhu *et al.* 2016, Schneider *et al.* 2020, Shelden y Munns 2023). En condiciones

naturales, las plantas generan adaptaciones del sistema radical a condiciones irregulares de lluvia excesiva o la escasa humedad favorecen condiciones contrastantes que impulsan la evolución de los rasgos funcionales, con resultado en diferenciación genética entre las poblaciones (Rewald *et al.* 2013). Las técnicas de fenotipado de alta resolución permiten ahora visualizar y medir los rasgos de las raíces en los sistemas edáficos para mejorar la captura de agua, nitrógeno y restringir la absorción de Na^+ (Shelden y Munns 2023). En este sentido, identificar materiales silvestres con alta variación su sistema radical, contribuye al mejoramiento genético de los cultivos, ya que se tiene la oportunidad de seleccionar o generar un ideotipo radical, profundo y económico en términos de energía para la planta.

El carácter peso seco de raíz destacó por tener la mayor variación (41.8%) (Cuadro 6). Otros caracteres que estuvieron por encima de 30% fueron el número de hojas (39.8%), peso seco de tallo (39.6%), área foliar (38.7%), peso seco de hojas (38.5%) y peso seco total (33.9%). De acuerdo con Hernández-Verdugo *et al.* (2012) en plantas de *C. annuum* con valores mayores de 30% coeficiente de variación presentan amplia variación; otros investigadores consideran que un CV superiores a 20% indica la presencia de alta variación (Romero-Higareda *et al.* 2023). El valor de variación en el peso seco de la raíz es importante ya que se tienen limitaciones en la base genética en chiles modernos cultivados, por lo que ha orillado a los fitomejoradores a buscar en sus parientes silvestres, variación genética natural con el fin de seleccionar plantas tolerantes a NaCl que puedan usarse como porta injertos (Penella *et al.* 2016, Osuna-Rodríguez *et al.* 2023).

3.5. CONCLUSIONES

Los niveles de NaCl influyeron en la expresión fenotípica de los rasgos estudiados de *Capsicumm annuum* silvestre. La mayor cantidad de ésta se encontró dentro de familias y tiene su precedente en la variación genética. El aumento de NaCl contribuyó a incrementar la variación fenotípica entre poblaciones. La variación fenotípica y genética varió considerablemente entre rasgos morfológicos. El coeficiente de variación más alto fue para peso seco de raíz, rasgo que superó el 40%; mientras que, el resto de los rasgos superó el 20% con excepción de diámetro de tallo y lecturas SPAD que tuvieron valores inferiores. La salinidad redujo todos los rasgos con excepción de grosor de hoja. La población Mazocahui destacó por presentar hojas gruesas pero menor área foliar y lecturas SPAD. Por otro otra parte, la población Presa Oviachic desarrolló hojas menos gruesas y presentó los valores más altos de biomasa en raíz, tallo y hoja.

3.6. LITERATURA CITADA

- Acosta-Motos JR, Ortuño MF, Bernal-Vicente A, Diaz-Vivancos P, Sanchez-Blanco MJ (2017) Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy* 7: 18. <https://doi.org/10.20944/preprints201702.0083.v2>
- Aktas H, Abak K, Cakmak I (2006) Genotypic variation in the response of pepper to salinity. *Scientia Horticulturae* 110(3): 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.07.017>
- Alcalá-Rico JSGJ, Ramírez-Meraz M, Maldonado-Moreno N, Borja-Bravo M, Camposeco-Montejo N, López-Benítez A (2023) Variación morfológica en frutos de genotipos de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) del Noreste y Centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3482>
- Baeza K, Lopez-Hoffman L, Glenn EP, Flessa K, Garcia-Hernandez J (2013) Salinity limits of vegetation in Cienega de Santa Clara, an oligotrophic marsh in the delta of the Colorado River, Mexico: implications for an increase in salinity. *Ecological Engineering* 59: 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.019>
- Barboza GE, García CC, Bianchetti LB, Romero MV, Scaldaferrero M (2022) Monograph of wild and cultivated chili peppers (*Capsicum* L., *Solanaceae*). *PhytoKeys* 200: 1-423. <https://doi.org/10.3897%2Fphytokeys.200.71667>
- Bojórquez-Quintal E, Ruiz-Lau N, Velarde-Buendía A, Echevarría-Machado I, Pottosin I, Martínez-Estévez M (2016) Natural variation in primary root growth and K⁺ retention in roots of habanero pepper (*Capsicum chinense*) under salt stress. *Functional Plant Biology* 43(12): 1114-1125. <https://doi.org/10.1071/FP15391>
- Chetelat RT, Pertuzé RA, Faúndez L, Graham EB, Jones CM (2009) Distribution, ecology and reproductive biology of wild tomatoes and related nightshades from the Atacama Desert region of northern Chile. *Euphytica* 167: 77–93. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9863-6>
- Delgado AMDM, Miralles IHR, Masaguer RA, Martín SJV (2016). Estudio de turbas y residuos avícolas procedentes de pollo de engorde como componente de sustratos de cultivo. *Revista Iinternacional de Contaminación Ambiental* 32(4): 455-462. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.09>.
- Di-Baccio D, Lorenzi A, Scartazza A, Rosellini I, Franchi E, Barbafieri M (2024) Morphophysiological Characterisation of Guayule (*Parthenium argentatum* A. Gray) in Response to Increasing NaCl Concentrations: Phytomanagement and Phytodesalinisation in Arid and Semiarid Areas. *Plants* 13(3): 378. <https://doi.org/10.3390/plants13030378>
- Efisue AA, Igoma EE (2019) Screening rice (*O. sativa* L.) in salinity gradient to identify performance during vegetative stage for salinity stressed environments. *Journal of Plant Sciences* 7: 144-150. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20190706.13>
- Efisue AA, Dike CC (2020) Screening rice (*Oryza sativa* L.) for salinity tolerance for yield and yield components in saline stressed environment. *American Journal*

- of Agriculture and Forestry 8(1): 15-21.
<https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20200801.13>
- Etchevers-Barra JD, Cruz-Gaistardo O, Gallardo JF (2023) La degradación del suelo y el futuro de la humanidad. MIX TEC 4(6): 29-39.
- Fang S, Hou X, Liang X (2021) Response mechanisms of plants under saline-alkali stress. Frontiers in Plant Science 12: 667458.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667458>
- Félix-Lizárraga JU, Ruiz-Torres NA, Rincón-Sánchez F, Sánchez-Ramírez FJ, Borrego-Escalante F, Benavides MA (2023) Selección de poblaciones de maíz con base en la producción temprana de biomasa bajo condiciones de estrés salino. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 14(3): 449-458.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3091>
- Fernández-García N, Olmos E, Bardisi E, García-De la Garma J, López-Berenguer C, Rubio-Asensio JS (2014) Intrinsic water use efficiency controls the adaptation to high salinity in a semi-arid adapted plant, henna (*Lawsonia inermis* L.). Journal of Plant Physiol 171: 64-75.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.11.004>
- Fischer M, Husi R, Prati D, Peintinger M, van Kleunen, M, Schmid B (2000) RAPD variation among and within small and large populations of the rare clonal plant *Ranunculus reptans* (Ranunculaceae). American Journal of Botany 87: 1128-1137. <https://doi.org/10.2307/2656649>
- Ghonaim MM, Mohamed HI, Omran AA (2021) Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) salt stress tolerance using physiological parameters and retrotransposon-based markers. Genetic Resources and Crop Evolution 68: 227-242. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00981-w>
- Glenn EP, Nelson SG, Ambrose B, Martinez R, Soliz D, Pabendinskas V, Hultine K (2012) Comparison of salinity tolerance of three *Atriplex* spp. in well-watered and drying soils. Environmental and Experimental Botany 83: 62-72.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.010>
- Gratani L (2014) Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors. Advances in Botany 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/208747>
- Hameed M, Ashraf M, Naz N (2009) Anatomical adaptations to salinity in cogon grass [*Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel] from the salt range, Pakistan. Plant and Soil 322: 229-238. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9911-6>
- Hassani A, Azapagic A, Shokri N (2021) Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. Nature Communications 12: 6663. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3>
- Henderson AN, Crim PM, Cumming JR, Hawkins JS (2020) Phenotypic and physiological responses to salt exposure in *Sorghum* reveal diversity among domesticated landraces. American Journal of Botany 107: 983-992. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1506>
- Hernández-Verdugo S, González-Sánchez RA, Porras F, Parra-Terraza S, Valdez-Ortiz A, Pacheco-Olvera A, López-España RG (2015) Plasticidad fenotípica de poblaciones de chile silvestre (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) en respuesta a disponibilidad de luz. Botanical Sciences 93(2): 231-240. <https://doi.org/10.17129/botsci.237>

- Hernández-Verdugo S, Guevara-González RG, Rivera-Bustamante RF, Vázquez-Yáñez C, Oyama K (1998) Los parientes silvestres del chile (*Capsicum* spp.) como recursos genéticos. Boletín de la Sociedad Botánica de México 62: 171-181. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1559>
- Hernández-Verdugo S, López-España RG, Sánchez-Peña P, Villarreal-Romero M, Parra-Terraza S, Porras F, Corrales-Madrid JL (2008) Phenotypic variation among and within wild populations of pepper from northwest Mexico. Revista de Fitotecnia Mexicana 31: 323-330. <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.323>
- Hernández-Verdugo S, Luna-Reyes R, Oyama K (2001) Genetic structure and differentiation of wild and semidomesticated populations of *Capsicum annuum* (Solanaceae) from Mexico. Plant Systematics and Evolution. 226: 129-142. <https://doi.org/10.1007/s006060170061>
- Hernández-Verdugo S, Porras F, Pacheco-Olvera A, López-España RG, Villarreal-Romero M, Parra-Terraza S, Osuna Enciso T (2012) Caracterización y variación ecogeográfica de poblaciones de chile (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) silvestre del noroeste de México. Polibotánica (33): 175-191.
- IPGRI, AVRDC, CATIE (1995) Descriptors for *Capsicum* (*Capsicum* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy; the Asian Vegetable Research and Development Center, Taipei, Taiwan, and the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 114p <https://cgspace.cgiar.org/items/ef0f3bcd-4878-4025-90ed-098a4c1b2918>. Fecha de consulta: 21 de mayo 2024.
- Javed M, Ashraf M, Iqbal M, Farooq MA, Zafar ZU, Athar HUR (2022) Chlorophyll fluorescence, ion uptake, and osmoregulation are potential indicators for detecting ecotypic variation in salt tolerance of *Panicum antidotale* Retz. Arid Land Research and Management 36(1): 84-108. <https://doi.org/10.1080/15324982.2021.1957038>
- Kano-Nakata M, Nakamura T, Mitsuya S, Yamauchi A (2019) Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile. Plant Production Science 22(4): 501-509. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1608836>
- Lienert J (2004) Habitat fragmentation effects on fitness of plant populations—a review. Journal for Nature Conservation 12: 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2003.07.002>
- López-Aguilar R, Medina-Hernández D, Ascencio-Valle F, Nieto-Garibay A, Arce-Montoya M, Larrinaga-Mayoral JA, Gómez-Anduro GA (2012) Differential responses of Chiltepin (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) and Poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum*) hot peppers to salinity at the plantlet stage. African Journal of Biotechnology 11(11): 2642. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2542>
- López-España RG, Hernández-Verdugo S, Parra-Terraza S, Pacheco-Olvera A, Valdéz-Ortiz A, Osuna-Enciso T, Muy-Rangel MD (2016) Diferenciación geográfica de poblaciones de chiles silvestres (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) del noroeste de México. Phytion - International Journal of Experimental Botany 85: 131-141. <https://doi.org/10.32604/phyton.2016.85.131>

- Matesanz S, Ramos-Muñoz M, Moncalvillo B, Rubio TML, García DSL, Romero J, Iriondo JM (2020) Plasticity to drought and ecotypic differentiation in populations of a crop wild relative. *AoB Plants* 12(2): plaa006. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plaa006>
- Munns R, Wallace PA, Teakle NL, Colmer T D (2010) Measuring soluble ion concentrations (Na⁺, K⁺, Cl⁻) in salt-treated plants. *Plant stress tolerance: Methods and Protocols*: 371-382. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_23
- Olsson K, Ågren J (2002) Latitudinal population differentiation, life history and flower morphology in perennial herb *Lythrum salicaria*. *Journal of Evolutionary Biology* 15: 983-996. <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2002.00457.x>
- Osuna-Rodríguez, JM, Hernández-Verdugo S, Osuna-Enciso T, Pacheco-Olvera A, Parra-Terraza S, Romero-Higareda CE, Retes-Manjarrez JE (2023) Variations in salinity tolerance in wild pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) populations. *Chilean Journal of Agricultural Research* 83(4): 432-443. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392023000400432>
- Oyama K, Hernández-Verdugo S, Sánchez C, González-Rodríguez A, Sánchez-Peña P, Garzón-Tiznado JA, Casas A (2006) Genetic structure of wild and semidomesticated populations of *Capsicum annuum* (Solanaceae) from northwestern Mexico analyzed by RAPDs. *Genetic Resources and Crop Evolution* 53: 553-562. <https://doi.org/10.1007/s10722-004-2363-1>
- Pacheco-Olvera A, Hernández-Verdugo S, Rocha-Ramírez V, González-Rodríguez A, Oyama K (2012) Genetic diversity and structure of pepper (*Capsicum annuum* L.) from northwestern Mexico analyzed by microsatellites markers. *Crop Science* 52: 231-241. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.06.0319>
- Penella C, Landi M, Guidi L, Nebauer SG, Pellegrini E, San Bautista A, Remorini D, Nali C, López-Galarza S, Calatayud A (2016) Salt-tolerant rootstock increases yield of pepper under salinity through maintenance of photosynthetic performance and sinks strength. *Journal of Plant Physiology* 193: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.02.007>
- Pérez-Grajales M, González-Hernández VA, Peña-Lomelí A, Sahagún-Castellanos J (2009) Aptitud combinatoria y heterosis en rendimiento y calidad de frutos de chile manzano (*Capsicum pubescens* R & P) criollo. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 15(1): 103-109. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.014>
- Rengasamy P (2010) Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology* 37(7): 613-620. <https://doi.org/10.1071/FP09249>
- Retes-Manjarrez JE, Hernández-Verdugo S, Pariaud B, Hernández-Espinal LA, Parra-Terraza S, Trejo-Saavedra D, Rivera-Bustamente RF, Garzón-Tiznado J (2018) Resistance to pepper Huasteco yellow vein virus and its heritability in wild genotypes of *Capsicum annuum*. *Botanical Sciences* 96: 52-62. <https://doi.org/10.17129/botsci.1029>
- Rewald B, Shelef O, Ephrath JE, Rachmilevitch S (2013) Adaptive plasticity of salt-stressed root systems. *Ecophysiology and Responses of Plants Under Salt Stress* 169-201. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_6

- Rice KJ, Mack RN (1991) Ecological genetics of *Bromus tectorum* L. A hierarchical analysis of phenotypic variation. *Oecologia* 88: 77-83. <https://doi.org/10.1007/BF00328406>
- Romero-Higareda CE, Hernández-Verdugo S, Pacheco-Olvera A, Retes-Manjarrez JE, Osuna-Enciso T, Valdéz-Ortiz Á (2023) Phenotype differentiation of *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* of three regions in Mexico and its relation to climate. *Botanical Sciences* 101: 744-760. <https://doi.org/10.17129/botsoci.3289>
- Romero-Higareda, CE, Hernández-Verdugo S, Pacheco-Olvera A, Núñez-Farfán J, Retes-Manjarrez E, López-Orona C, Osuna-Enciso T (2022) ttADAPTIVE PHNEOTYPIC plasticity of wild *Capsicum annuum* (Solanaceae) to variable environments of water-light availability. *Acta Oecologica* 114: 103807. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2021.103807>
- Sandhu N, Raman KA, Torres RO, Audebert A, Dardou A, Kumar A, Henry A (2016) Rice root architectural plasticity traits and genetic regions for adaptability to variable cultivation and stress conditions. *Plant Physiology* 171(4): 2562-2576. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00705>
- Schmid M, Guillaume F (2017) The role of phenotypic plasticity on population differentiation. *Heredity* 119: 214-225. <https://doi.org/10.1038/hdy.2017.36>
- Schneider HM, Lynch JP (2020) Should root plasticity be a crop breeding target? *Frontiers in Plant Science* 11: 534260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00546>
- Shahid SA, Zaman M, Heng L (2018) Soil salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. In: Zaman M, Shahid SA, Heng L (ed) *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Vienna, Australia. pp: 43-53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Shelden MC, Munns R (2023) Crop root system plasticity for improved yields in saline soils. *Frontiers in Plant Science* 14: 1120583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1120583>
- Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. *Proceeding of the Sixth International Congress on Soilless Culture*, Lunteren. 29 April-5 May. International Society for Soilless Culture (ISOSC), Wageningen, The Netherland. p. 633-649.
- Stotz GC, Salgado-Luarte, C, Escobedo VM, Valladares F, Gianoli E (2021) Global trends in phenotypic plasticity of plants. *Ecology Letters* 24: 2267-2281. <https://doi.org/10.1111/ele.13827>
- Valladares F, Gianoli E, Gómez JM (2007) Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist* 176: 749-763. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x>
- Van-Zelm E, Zhang Y, Testerink C (2020) Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology* 71: 403-433. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>
- Velikova V, Arena C, Izzo LG, Tsonev T, Koleva D, Tattini M, Roeva O, De Maio A, Loreto FV (2020) Functional and structural leaf plasticity determine photosynthetic performances during drought stress and recovery in two

- Platanus orientalis populations from contrasting habitats. International Journal of Molecular Sciences 21: 3912. <https://doi.org/10.3390/ijms21113912>
- Venable DL, Búrquez A (1989) Quantitative genetics of size, shape, life-history and fruit characteristics of the seed heteromorphic composite *Heterosperma pinnatum*. Evolution 43: 113-124. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1990.tb05246.x>
- Verhoeven KJ, van Gurp TP (2012) Transgenerational effects of stress exposure on offspring phenotypes in apomictic dandelion. PLOS ONE 7: e38605. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038605>
- Votava E, Nabhan G, Bosland P (2002) Genetic diversity and similarity revealed via molecular analysis among and within an *in situ* population and *ex situ* accessions of chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*). Conservation Genetics 3: 123-129. <https://doi.org/10.1023/A:1015216504565>
- Young AG, Merriam HG, Warwick SI (1993) The effects of forest fragmentation on genetic variation in *Acer saccharum* Marsh. (sugar maple) populations. Heredity 71: 277-289. <https://doi.org/10.1038/hdy.1993.136>
- Zhao C, Zhang H, Song, C, Zhu JK, Shabala S (2020) Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. The innovation 1(1). <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN GENERAL

Efecto de los tratamientos

El estudio mostro que las plantas de chile chiltepín analizadas fueron afectadas por los tratamientos de 25 y 50 mM de NaCl. Redujeron su altura, diámetro de tallo, área foliar, valores SPAD y acumulación de biomasa de los órganos raíz, tallo y hoja. Los valores estimados con el índice de tolerancia al estrés (un ITS mayor en una población o característica indica una tolerancia mayor a la salinidad) en 50 NaCl, señalan al peso seco de la raíz como el carácter menos tolerante (0.58), seguido del área foliar (0.60) y del peso seco de hojas (0.62), mientras que altura de planta (0.92) y diámetro de tallo (0.87) fueron rasgos más tolerantes.

Bajo estrés salino, las plantas reducen su crecimiento por diferentes alteraciones bioquímicas y fisiológicas. En las primeras encontramos el metabolismo enfocado a acumulación de osmolitos de bajo peso molecular como prolina, mientras que en las segundas está el cierre de estomas que reducen la asimilación de CO₂. Así también, el cierre de estomas es ocasionado por moléculas como el ácido abscísico, sintetizado en hojas y raíces (Munns *et al.* 2010, Zhao *et al.* 2020, Javed *et al.* 2022).

Con el análisis multivariado de componentes principales en el tratamiento de 25 mM el componente principal 1 explicó 67.67 % de la variación en el primer componente, teniendo todas características valores positivos y relativamente altos con excepción de altura de planta y peso seco de hojas.

En el tratamiento de 50 mM, el componente principal 1 explicó el 64.80 % de la varianza. Todas las características tuvieron signo positivo y valores relativamente altos, excepto altura de la planta y valores SPAD.

Efecto de las poblaciones

Con los valores estimados de ITS, las poblaciones se diferenciaron al someterlas a los tratamientos de NaCl. Los promedios generales de los tratamientos de 25 y 50 mM muestran a Cosalá y El Roble como las poblaciones más susceptibles, mientras que Presa Oviachic, Lo de Vega y Yecorato las más tolerantes.

Al utilizar los valores de los componentes principales, también existió diferenciación entre las poblaciones en ambos tratamientos de NaCl. En el tratamiento de 25 mM, el componente principal uno distinguió a las poblaciones Presa Oviachic y Lo de Vega en la región de plantas con mayores ITS; en el tratamiento de 50 mM, el componente principal uno distinguió a las poblaciones Presa Oviachic y Yecorato en la región de plantas con mayores ITS (mayor tolerancia).

La adaptación de las plantas varía de acuerdo al nivel de salinidad, las especies, la duración de la exposición y la etapa de desarrollo del cultivo. Esta variación ha sido

documentada por Wu *et al.* (2011), quienes señalan que existe una variación natural útil en varias líneas de cebada silvestre tibetana en los niveles de tolerancia a la sal en términos de acumulación de biomasa. Esta adaptación también se encontró en este trabajo. En el tratamiento de 50 mM de salinidad, los ITS de altura de la planta, diámetro del tallo, área foliar, peso seco del tallo y peso seco de las hojas se correlacionaron positiva y significativamente con la conductividad eléctrica (CE) de los suelos de los sitios de origen de las poblaciones (Figura 6A, 6B, 6C, 6D y 6E). Los ITS de las características área foliar, cantidad de clorofila, peso seco del tallo y peso seco de la hoja se correlacionaron positiva y significativamente con el Na de los suelos de los sitios de origen de las poblaciones (Figura 6F, 6G, 6H e 6I). El patrón de variación observado en estas características sugiere adaptación a las condiciones edáficas locales.

Distribución de la variación fenotípica y genética

Variación fenotípica

Los resultados de este estudio indican que las poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* del noroeste de México mantienen elevados niveles de variación entre y dentro de sus poblaciones.

La mayor variación fenotípica se presentó dentro de familias, en los tres niveles de NaCl, seguida de dentro de poblaciones (entre familias) y entre poblaciones. Resultados similares documentan Hernández-Verdugo *et al.* (2008) al estudiar la variación en la germinación en chile silvestre. Los autores señalan el mayor porcentaje de variación fenotípica dentro de familias (61.8%), seguida de entre familias (24.7%) y entre poblaciones (13.5%). La variación dentro de familias fue afectada por el nivel de estrés, se redujo en 3.3% con 25 mM y 7.0% con 50 mM, con respecto a 0 mM, esta reducción en la variabilidad fenotípica al aumentar el estrés, coincide con lo reportado por Kano-Nakata *et al.* (2019) quienes señalan que la variabilidad fenotípica del sistema radical de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) se vio afectada por las intensidades del estrés por sequía; los límites en la variabilidad fenotípica antes señalados, también son señalados por Baeza *et al.* (2013) en plantas de *Typha domingensis* y *Schoenoplectus americanus* usando 6 niveles de salinidad (0 a 12 g L⁻¹ de sólidos disueltos totales) al medir biomasa y altura de planta.

Al estudiar la variación de los caracteres evaluados, grosor de hojas y el número de hojas mostró aumentos en sus niveles de variación; en el nivel de 25 mM, aumentó 102.1 y 64.8%, respectivamente, con respecto a 0 mM; mientras que, en 50 mM fue de 116.9 y 40.7% en los mismos caracteres de grosor de hojas y número de hojas. Bajo condiciones de estrés, la variación en la morfología de la hoja juega un papel importante en la adaptabilidad de la planta (Verhoeven y van Gurp 2012, Stotz *et al.* 2021, Romero-Higareda *et al.* 2022). Bajo pequeñas escalas espaciales (población),

se han reportado importantes fuentes de heterogeneidad en las plantas silvestres de *C. annuum* (Hernández-Verdugo *et al.* 2008).

De la variación fenotípica total observada el 45.4% en 0 mM, 47.2% en 25 mM y 49.2% en 50 mM, tiene una base genética. Es decir, conforme aumentó el nivel de NaCl, la proporción de VGT se incrementó, evidenciando la importancia del componente genético en la diferenciación de las poblaciones estudiadas. Este componente genético ha sido importante para la adaptación de las plantas de chile silvestre en ambientes heterogéneos como sucedió en esta investigación; en los caracteres de grosor de hoja y peso seco de la raíz fue de 143.6 y 29.4% en 25 mM y de 103.6 y 20.4% en 50 mM, respectivamente.

La diferenciación genética entre poblaciones se presentó en todas las características con excepción en altura de planta. La población Presa Oviachic fue significativamente superior al resto de las poblaciones en la unidad de medida de siete rasgos (peso seco de planta, peso seco de raíz, peso seco de tallo, peso seco de hojas, área foliar, número de hojas y diámetro de tallo); mientras que, Mazocahui, Cosalá y El Roble fueron más afectadas al presentar menor peso seco de la planta, peso seco de la raíz, peso seco del tallo, peso seco de las hojas, área foliar, número de hojas, lecturas SPAD y diámetro de tallo.

La población Mazocahui generó hojas más gruesas y puede explicarse por la necesidad de mantener una mejor eficiencia, favorecida por un mayor contenido de agua foliar, y un parénquima más esponjoso, lo que podría mejorar la conductividad hídrica y la difusión de CO₂ de estas plantas (Velikova 2020). Esta adaptación es reportada en plantas de *Atriplex patula* (tolerante al exceso de sales) (Glenn *et al.* 2012) y *Lawsonia inermis* L. (Fernández-García 2014).

En este estudio el coeficiente de variación facilitó la comparación de la magnitud de la variación fenotípica entre rasgos y poblaciones. Entre poblaciones, Mazocahui presentó el valor más alto (41.3%). Este resultado coincide con Romero-Higareda *et al.* (2022) quienes encontraron una variación de 23.6% en esta población, al medir 9 caracteres morfológicos en seis poblaciones de *C. annuum* silvestre sometidas a cuatro tratamientos de agua y luz. El peso seco de la raíz (41.8%) fue la variable que presentó la mayor variación promedio. Otros caracteres que estuvieron por encima de 30% fueron el número de hojas (39.8%), peso seco de tallo (39.6%), área foliar (38.7%), peso seco de hojas (38.5%) y peso seco total (33.9%). De acuerdo con Hernández-Verdugo *et al.* (2012) plantas de *C. annuum* con valores mayores de 30% de coeficiente de variación presentan amplia variación; otros investigadores consideran que un CV superiores a 20% indica la presencia de alta variación (Romero-Higareda *et al.* 2023).

4.1. LITERATURA CITADA

- Baeza K, Lopez-Hoffman L, Glenn EP, Flessa K, Garcia-Hernandez J (2013) Salinity limits of vegetation in Cienega de Santa Clara, an oligotrophic marsh in the delta of the Colorado River, Mexico: implications for an increase in salinity. *Ecological Engineering* 59: 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.019>
- Fernández-García N, Olmos E, Bardisi E, García-De la Garma J, López-Berenguer C, Rubio-Asensio JS (2014) Intrinsic water use efficiency controls the adaptation to high salinity in a semi-arid adapted plant, henna (*Lawsonia inermis* L.). *Journal of Plant Physiol* 171: 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.11.004>
- Glenn EP, Nelson SG, Ambrose B, Martinez R, Soliz D, Pabendinskas V, Hultine K (2012) Comparison of salinity tolerance of three *Atriplex* spp. in well-watered and drying soils. *Environmental and Experimental Botany* 83: 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.010>
- Hernández-Verdugo S, López-España RG, Sánchez-Peña P, Villarreal-Romero M, Parra-Terraza S, Porras F, Corrales-Madrid JL (2008) Phenotypic variation among and within wild populations of pepper from northwest Mexico. *Revista de Fitotecnia Mexicana* 31: 323-330. <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.323>
- Hernández-Verdugo S, Porras F, Pacheco-Olvera A, López-España RG, Villarreal-Romero M, Parra-Terraza S, Osuna Enciso T (2012) Caracterización y variación ecogeográfica de poblaciones de chile (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) silvestre del noroeste de México. *Polibotánica* (33): 175-191.
- Javed, M., Ashraf, M., Iqbal, M., Farooq, M.A., Zafar, Z.U., and Athar, H.U.R. 2022. Chlorophyll fluorescence, ion uptake, and osmoregulation are potential indicators for detecting ecotypic variation in salt tolerance of *Panicum antidotale* Retz. *Arid Land Research and Management* 36(1):84-108. doi:10.1080/15324982.2021.1957038.
- Kano-Nakata M, Nakamura T, Mitsuya S, Yamauchi A (2019) Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile. *Plant Production Science* 22(4): 501-509. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1608836>
- Munns R, Wallace PA, Teakle NL, Colmer T D (2010) Measuring soluble ion concentrations (Na⁺, K⁺, Cl⁻) in salt-treated plants. *Plant stress tolerance: Methods and Protocols*: 371-382. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_23
- Romero-Higareda CE, Hernández-Verdugo S, Pacheco-Olvera A, Retes-Manjarrez JE, Osuna-Enciso T, Valdéz-Ortiz Á (2023) Phenotype differentiation of *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* of three regions in Mexico and its relation to climate. *Botanical Sciences* 101: 744-760. <https://doi.org/10.17129/botsci.3289>
- Romero-Higareda, CE, Hernández-Verdugo S, Pacheco-Olvera A, Núñez-Farfán J, Retes-Manjarrez E, López-Orona C, Osuna-Enciso T (2022) ttADAPTIVE PHNEOTYPIC plasticity of wild *Capsicum annuum* (Solanaceae) to variable

- environments of water-light availability. *Acta Oecologica* 114: 103807.
<https://doi.org/10.1016/j.actao.2021.103807>
- Velikova V, Arena C, Izzo LG, Tsonev T, Koleva D, Tattini M, Roeva O, De Maio A, Loreto FV (2020) Functional and structural leaf plasticity determine photosynthetic performances during drought stress and recovery in two *Platanus orientalis* populations from contrasting habitats. *International Journal of Molecular Sciences* 21: 3912.
<https://doi.org/10.3390/ijms21113912>
- Verhoeven KJ, van Gurp TP (2012) Transgenerational effects of stress exposure on offspring phenotypes in apomictic dandelion. *PLOS ONE* 7: e38605.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038605>
- Stotz GC, Salgado-Luarte, C, Escobedo VM, Valladares F, Gianoli E (2021) Global trends in phenotypic plasticity of plants. *Ecology Letters* 24: 2267-2281.
<https://doi.org/10.1111/ele.13827>
- Wu, D., Qiu, L., Xu, L., Ye, L., Chen, M., Sun, D., et al. 2011. Genetic variation of HvCBF genes and their association with salinity tolerance in Tibetan annual wild barley. *PLoS one* 6(7):e22938. doi:10.1371/journal.pone.0022938.
- Zhao C, Zhang H, Song, C, Zhu JK, Shabala S (2020) Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The innovation* 1(1).
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Las poblaciones de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* silvestre del noroeste de México mantienen elevada variación en la tolerancia a la salinidad en las características fenotípicas medidas. Debido a que las plantas crecieron en ambiente uniforme de invernadero, puede considerarse que las diferencias observadas tienen una base genética. Adicionalmente, tres poblaciones mostraron altos niveles de tolerancia a este factor, indicando que esta especie es un recurso genético valioso que debe ser estudiado para mejorar su uso y conservación. Varias de las características medidas se correlacionaron positiva y significativamente con la salinidad de los suelos de origen de las poblaciones estudiadas, indicando que estas características son producto de adaptaciones a las condiciones edáficas locales durante el crecimiento de las plantas de *C. annuum* en su ambiente natural.

Los niveles de NaCl influyeron en la expresión fenotípica de los rasgos estudiados de *Capsicum annuum* silvestre. La mayor cantidad de ésta se encontró dentro de familias y tiene su precedente en la variación genética. El aumento de NaCl contribuyó a incrementar la variación fenotípica entre poblaciones. La variación fenotípica y genética varió considerablemente entre rasgos morfológicos. El coeficiente de variación más alto fue para peso seco de raíz, rasgo que superó el 40%; mientras que, el resto de los rasgos superó el 20% con excepción de diámetro de tallo y lecturas SPAD que tuvieron valores inferiores. La salinidad redujo todos los rasgos con excepción de grosor de hoja. La población Mazocahui destacó por presentar hojas gruesas pero menor área foliar y lecturas SPAD. Por otra parte, la población Presa Oviachic desarrolló hojas menos gruesas y presentó los valores más altos de biomasa en raíz, tallo y hoja.

CAPÍTULO 6

ANEXOS

A continuación, se presenta la primera página de dos artículos derivados de la presente tesis doctoral.

CHILEAN JOURNAL
of AGRICULTURAL RESEARCH



RESEARCH ARTICLE

Variations in salinity tolerance in wild pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) populations

José M. Osuna-Rodríguez^{1*}, Sergio Hernández-Verdugo¹, Tomas Osuna-Enciso², Antonio Pacheco-Olvera¹, Saúl Parra-Terraza¹, César E. Romero-Higareda³, and Jesús E. Retes-Manjarrez¹

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía, 80000, Culiacán, Sinaloa, México.

²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), Coordinación Culiacán, 80110, Culiacán, Sinaloa, México.

³Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Biología, 80013, Culiacán, Sinaloa, México.

*Corresponding author (joseosuna@uas.edu.mx).

Received: 13 December 2022; Accepted: 23 February 2023, doi:10.4067/S0718-58392023000400432

ABSTRACT



Osuna-Rodríguez *et al.*
Efecto de la salinidad en *Capsicum*
Ecosist. Recur. Agropec. 11(3): e4092, 2024
<https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4092>

Efecto de la salinidad en poblaciones de chile silvestre del Noroeste de México

Effect of salinity on wild pepper populations from Northwest Mexico

José Manuel Osuna-Rodríguez^{1*}, Sergio Hernández-Verdugo¹, Antonio Pacheco-Olvera¹, Tomás Osuna-Enciso¹, Saúl Parra-Terraza¹, César Enrique Romero-Higareda²

¹Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Agronomía. Km 17.5 Carretera Culiacán-El dorado s/n, CP. 80000. Culiacán Rosales, Sinaloa, México.

²Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Biología. Ciudad universitaria, calzada de las Américas y calle Universitarios s/n, CP. 80013. Culiacán Rosales, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: joseosuna@uas.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 21 de marzo 2024

Aceptado: 22 de junio 2024

RESUMEN. La salinidad es un problema en zonas agrícolas al comprometer el crecimiento de los cultivos. Las variedades