



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

**RESPUESTA AL ESTRÉS SALINO DE CHILE  
HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.), EN  
BIOMASA, INDICADORES BIOQUÍMICOS,  
FISIOLÓGICOS Y RENDIMIENTO BAJO CULTIVO  
HIDROPÓNICO**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias**

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación en Agricultura Sustentable)

P r e s e n t a

**Guillermo Portillo Hurtado de Mendoza**

La Paz, Baja California Sur, septiembre de 2018.

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 09:00 horas del día 24 del Mes de Agosto del 2018, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"Respuesta al estrés salino de chile habanero, (*Capsicum chinense* L.), en biomasa, indicadores bioquímicos, fisiológicos y rendimiento bajo cultivo hidropónico"**

Presentada por el alumno:

**Guillermo Portillo Hurtado de Mendoza**

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Agricultura sustentable**

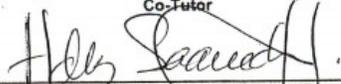
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

  
Dr. Juan Angel Larrinaga Mayoral  
Director de Tesis

  
Dra. Tania Zenteno Savin  
Co-Tutor

  
Dr. Andrés Orduño Cruz  
Co-Tutor

  
Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos

## **Conformación de Comités**

### **Comité Tutorial**

Dr. Juan Ángel Larrinaga Mayoral

Director de Tesis (CIBNOR)

Dra. Tania Zenteno Savín

Co-tutor (CIBNOR)

Dr. Andrés Orduño Cruz

Co-Tutor (CIBNOR)

### **Comité Revisor de Tesis**

Dr. Juan Ángel Larrinaga Mayoral

Dra. Tania Zenteno Savín

Dr. Andrés Orduño Cruz

### **Jurado de Examen**

Dr. Juan Ángel Larrinaga Mayoral

Dra. Tania Zenteno Savín

Dr. Andrés Orduño Cruz

### **Suplente**

Dr. Bernardo Murillo Amador

## Resumen

Se evaluó la respuesta de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itza al estrés salino en un sistema hidropónico, dado por cuatro niveles de salinidad (6.6, 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup>) y dos fuentes de sal (NaCl y agua de mar), mediante la evaluación de parámetros morfométricos, fisiológicos, contenido mineral en tejido foliar y la respuesta bioquímica antioxidante. Se encontró que las variables morfométricas y de crecimiento (biomasa seca en raíz, tallo, hoja, fruto, área foliar, tasa de crecimiento y relación vástago raíz) disminuyeron en los niveles de salinidad más altos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> en ambas fuentes de salinas. Por otra parte, se encontró que las variables para evaluar la respuesta fisiológica como la fluorescencia de clorofilas (SPAD), conductividad estomática y la concentración de CO<sub>2</sub> intracelular, presentaron diferencias por la concentración de sales, mientras que la tasa fotosintética y la tasa de transpiración no mostraron respuestas ante los niveles de salinidad evaluados. La concentración de minerales en el tejido foliar mostró que el contenido de sodio fue mayor en los tratamientos donde la fuente de salinidad fue NaCl en comparación con los tratamientos con agua de mar. De forma general, se encontró que el contenido de potasio disminuyó a medida que el nivel de salinidad aumentó. No se observaron diferencias significativas entre el nivel más bajo de salinidad (6.6 dS m<sup>-1</sup>) y el tratamiento control. La interacción de los niveles de salinidad y la fuente salina mostró diferencias significativas para el contenido de sodio, potasio, magnesio y calcio, mientras que la relación de sodio/potasio, sodio/calcio, sodio/magnesio mostró diferencias estadísticamente significativas. Los resultados de la defensa antioxidante enzimática en tejido foliar indican que hay diferencias estadísticamente significativas para la actividad de SOD para el factor de conductividad eléctrica, presentando mayor actividad a 13.6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl como fuente salina; la actividad de POX se incrementó en el nivel de salinidad de 6.6 dS m<sup>-1</sup> de las soluciones a partir de NaCl y agua de mar respectivamente. La peroxidación de lípidos aumentó debido al nivel de salinidad, alcanzando su valor máximo en 9.4 dS m<sup>-1</sup> de la solución con NaCl. El contenido de capsaicinas en el pericarpio de los frutos, en los niveles de salinidad de 6.6 dS m<sup>-1</sup> no mostraron diferencias respecto al grupo control. Se concluye que la respuesta diferencial mostrada por los tratamientos estudiados depende principalmente del nivel de salinidad independientemente de la fuente de salina. Se establece que el umbral para la producción chile habanero, se encuentra entre en el rango de 3.6 y 6.6 dSm<sup>-1</sup>, indicando la posibilidad del uso de aguas salobres para la producción de alimentos bajo agricultura protegida en un sistema hidropónico.

Palabras clave: *Capsicum chinense*, habanero, salinidad, estrés oxidativo, agua de mar.

Vo.Bo. Dr Juan Ángel Larrinaga Mayoral.

## Summary

The response of habanero pepper (*C. chinense*) cv. Chichén Itzá to salt stress in a hydroponic system, given by four levels of salinity (6.6, 9.4 and 13.6 dS m<sup>-1</sup>) and two salt sources (NaCl and seawater), through the evaluation of morphometric parameters, physiological, mineral content in foliar tissue and the antioxidant biochemical response. The morphometric and growth variables (dry biomass in the root, stem, leaf, fruit, leaf area, growth rate and root stem ratio) were found to decrease in the highest salinity levels of 9.4 and 13.6 dS m<sup>-1</sup> in both sources of salinity. On the other hand, the variables to evaluate the physiological response such as chlorophyll fluorescence (SPAD), stomatal conductivity and intracellular CO<sub>2</sub> concentration, shows differences by the salt concentration, the photosynthetic rate and the transpiration rate don't showed differences to the salinity levels evaluated. The concentration of minerals in the foliar tissue showed that the sodium content was higher in the treatments where the source of salinity was NaCl compared to the treatments with seawater. In general, it was found that the potassium content decreased as the salinity level increased. No significant differences were observed between the lowest level of salinity (6.6 dS m<sup>-1</sup>) and the control treatment. The interaction of salinity and saline levels showed significant differences for the content of sodium, potassium, magnesium and calcium, while the ratio of sodium/potassium, sodium/calcium and sodium/magnesium showed statistically significant differences. The results of the enzymatic antioxidant defense in leaf tissue indicate that there are statistically significant differences for the SOD activity for the electrical conductivity factor, presenting greater activity at 13.6 dS m<sup>-1</sup> with NaCl as a saline source. The activity of POX was increased in the salinity level of 6.6 dS m<sup>-1</sup> of the solutions from NaCl and seawater respectively. Lipid peroxidation increased due to the salinity level, reaching its maximum value in 13.6 dS m<sup>-1</sup> of the solution with NaCl. The content of capsaicins in the pericarp of the fruits at the salinity levels of 6.6 dS m<sup>-1</sup> did not show differences in comparison to the control group. It is concluded that the differential response shown by the treatments studied depends mainly on the salinity level independently of the saline source. It is established that the threshold for habanero chile production is between the range of 3.6 and 6.6 ds m<sup>-1</sup>, indicating the possibility of the use of brackish water for the production of food under protected agriculture in a hydroponic system.

Keywords: Capsicum chinense, habanero, salinity, oxidative stress, seawater.

  
Vo.Bo. Dr Juan Ángel Larrinaga Mayoral.

**Dedicatoria**

A mi familia.

A mis amigos.

En especial a Reginald Winter †, Oscar Aragón Fonseca †

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgar la beca No. 591482 para realizar mis estudios de posgrado. Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) por permitir llevar a cabo mis estudios de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales.

A mi director de tesis, el Dr. Juan Ángel Larrinaga Mayoral y a mis tutores, la Dra. Tania Zenteno Savín y el Dr. Andrés Orduño Cruz; gracias por su apoyo y consejos que contribuyeron a mi formación como maestro en ciencias.

Al personal de Posgrado, es especial a la Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra, Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, a la Lic. Leticia González Rubio Rivera, Jefa del Departamento de Becas y Apoyo Estudiantil, a Tania Verónica Núñez Valdez, Secretaria del Departamento de Control Escolar y al Ingeniero Horacio Sandoval Gómez, Responsable del Laboratorio de Cómputo de Posgrado. A todos ellos, muchas gracias por las facilidades otorgadas durante el desarrollo de mis actividades académicas.

Al personal técnico del campo agrícola, Ing. Saúl Edel Briseño Ruíz, Tec. Pedro Luna García, Tec. Adrián Jordán Castro y Tec. José Raymundo Ceseña Núñez, por la capacitación, asesoría y enseñanzas durante el desarrollo de mi experimento en el campo agrícola.

Al personal técnico del Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal, M.C. María del Carmen Mercado Guido y la Lic. Lidia Hiraes Lucero, por la capacitación y asesorías en el uso de equipos para realizar mi experimento.

A I.B.Q. Orlando Lugo Lugo, técnico del Laboratorio de Estrés Oxidativo por la capacitación y asesorías en técnicas de análisis bioquímico y procesamiento de la información.

Al Dr. Pedro Arturo Sierra Beltrán, técnico del Laboratorio de Proteómica por su apoyo y capacitación en técnicas de análisis y facilidades brindadas para la obtención de resultados.

Al personal de la biblioteca, Ana María Talamantes Cota, Susana Luna García, María Esther Ojeda Castro por las facilidades y apoyo otorgado para la adquisición de artículos científicos, libros y documentos que contribuyeron a la formación de mi trabajo de tesis.

A todos mis compañeros y amigos de la maestría y de doctorado, muchas gracias por su apoyo, consejos y los grandes momentos de alegría brindados.

Muchas gracias a todos.

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Summary</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	vi
<b>Lista de figuras</b> .....	x
<b>Lista de tablas</b> .....	xv
<b>Abreviaturas</b> .....	xvi
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	2
2.1 Origen.....	2
2.1.2 Chile habanero.....	2
2.1.3 Producción de chile mundial.....	3
2.1.4 Producción y consumo de chile en México .....	3
2.1.5 Producción de chiles en el estado de Baja California Sur.....	4
2.2 Salinidad.....	4
2.3 Estrés salino en plantas.....	5
2.4 Hidroponía .....	6
2.4.1 Ventajas del cultivo sin suelo.....	6
2.4.2 Desventajas del cultivo sin suelo .....	7
2.5 Cultivo hidropónico en agua.....	7
2.6 Nutrición mineral.....	7
2.6.1 Macronutrientes.....	8
2.7 Estrés oxidativo .....	11
2.8 Antioxidantes .....	11
2.9 Mecanismos antioxidantes de las plantas contra el estrés .....	12
2.9.1 Sistema antioxidante enzimático .....	12
2.9.2 Sistema antioxidante no enzimático .....	13
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	15
3.1 Importancia científica.....	15
3.2 Importancia tecnológica .....	15
3.3 Importancia para el desarrollo.....	15

3.3.1 Pertinencia económica y ambiental .....	15
3.3.2 Pertinencia social .....	15
<b>4. HIPÓTESIS .....</b>	<b>17</b>
<b>5. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
5.1 Objetivo general.....	18
5.2 Objetivos particulares .....	18
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
6.1 Descripción del sitio de estudio.....	20
6.2 Material Biológico .....	20
6.3 Diseño del sistema hidropónico .....	20
6.3.1 Diseño de raíz flotante (RF).....	20
6.4 Metodología para germinación y trasplante .....	21
6.4.1 Germinación.....	21
6.4.2 Trasplante para sistema raíz flotante.....	21
6.5 Diseño experimental .....	22
6.6 Fertilización .....	23
6.7 Variables morfométricas .....	24
6.8 Variables fisiológicas .....	24
6.9 Contenido mineral.....	24
6.10 Respuesta antioxidante .....	25
6.10.1 Preparación de muestras de tejido vegetal.....	25
6.10.2 Análisis de la actividad de las enzimas antioxidantes .....	26
6.10.3 Análisis de la peroxidación de lípidos .....	27
6.10.4 Proteínas totales .....	27
6.10.5 Concentración de capsaicina.....	27
6.11 Análisis estadísticos.....	29
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
7.1 Efecto de los tratamientos salinos en variables morfométricas y parámetros de crecimiento de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	30
7.1.1 Efecto de los tratamientos salinos en la biomasa seca de raíz, tallo, fruto, hojas y área foliar de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante .....	30
7.2 Efecto del estrés salino en la morfometría de frutos de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante .....	35

7.2.1 Producción de frutos.....	36
7.2.2 Producción de frutos maduros.....	37
7.2.3 Producción de frutos verdes.....	38
7.2.4 Longitud de frutos.....	39
7.2.5 Diámetro de frutos.....	40
7.2.6 Grosor de pulpa.....	41
7.3 Efecto del estrés salino en los parámetros de crecimiento de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	41
7.3.1 Tasa de Crecimiento (T.C.).....	43
7.3.2 Tasa Asimilación Neta (TAN).....	44
7.3.3. Relación vástago/raíz.....	45
7.3.4. Relación Órganos Fotosintéticos/No Fotosintéticos.....	46
7.4 Efecto de los tratamientos salinos en parámetros fisiológicos de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	47
7.4.1 Fluorescencia de clorofilas (SPAD).....	48
7.4.2 Tasa fotosintética.....	49
7.4.3 Conductividad estomática.....	50
7.4.4 CO <sub>2</sub> intracelular.....	51
7.4.5 Tasa de transpiración.....	52
7.4.6 Temperatura de la hoja.....	53
7.5 Efecto del estrés salino en el contenido mineral de tejido foliar de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	54
7.5.1 Sodio.....	55
7.5.2 Potasio.....	56
7.5.3 Calcio.....	57
7.5.4 Magnesio.....	58
7.5.5 Hierro.....	59
7.5.6 Relación Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> .....	60
7.5.7 Relación Na <sup>+</sup> /Ca <sup>+</sup> .....	61
7.5.8 Relación Na <sup>+</sup> /Mg <sup>+</sup> .....	62
7.6 Efecto del estrés salino en las defensas antioxidantes enzimáticas en tejido foliar de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	63
7.6.1 Actividad de SOD en tejido foliar.....	64
7.6.2 Actividad de POX en tejido foliar.....	65

7.6.3 Peroxidación de lípidos .....	66
7.7 Efecto del estrés salino en variables bioquímicas antioxidantes en pericarpio de fruto de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.....	67
7.7.1 Contenido de capsaicina en frutos.....	67
7.7.2 Contenido de dihidrocapsaicina en frutos .....	67
<b>8. DISCUSIÓN .....</b>	<b>69</b>
8.1 Efecto del estrés salino en variables morfométricas y parámetros de crecimiento ..	69
8.2 Efecto del estrés salino en producción y morfometría de frutos .....	70
8.3 Efecto del estrés salino en variables fisiológicas.....	71
8.4 Efecto del estrés salino en el contenido mineral foliar .....	72
8.5 Efecto del estrés salino en la respuesta antioxidante enzimática y peroxidación de lípidos .....	79
8.6 Efecto del estrés salino en el contenido de capsaicinas en frutos de chile habanero .....	82
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>10. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>85</b>

## Lista de figuras

- Figura 1.** Distribución de biomasa seca en plantas de chile habanero (*C. chinense*) cultivado en hidroponía por raíz flotante bajo condiciones de estrés salino. Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 33
- Figura 2.** Área foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 34
- Figura 3.** Número de frutos en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 36
- Figura 4.** Número de frutos maduros en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 37
- Figura 5.** Número de frutos verdes en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 38
- Figura 6.** Longitud de chiles en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 39
- Figura 7.** Diámetro ecuatorial de chiles en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 40

- Figura 8.** Grosor de pulpa de frutos de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 41
- Figura 9.** Tasa de crecimiento en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 43
- Figura 10.** Tasa de asimilación neta en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas(n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 44
- Figura 11.** Relación vástago/raíz en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ) ..... 45
- Figura 12.** Relación órganos fotosintéticos/ no fotosintéticos en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la sal (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 46
- Figura 13.** Relación de la fluorescencia de clorofilas por unidades SPAD en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 48
- Figura 14.** Tasa fotosintética en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas(n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 49
- Figura 15.** Conductividad estomática en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas(n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 50

- Figura 16.** Concentración de dióxido de carbono intracelular en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 51
- Figura 17.** Tasa de transpiración en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas(n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 52
- Figura 18.** Temperatura de la hoja en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 53
- Figura 19.** Contenido de sodio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas(n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 55
- Figura 20.** Contenido de potasio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 56
- Figura 21.** Contenido de calcio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 57
- Figura 22.** Contenido de magnesio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 58

- Figura 23.** Contenido de hierro en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 59
- Figura 24.** Relación sodio/potasio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 60
- Figura 25.** Relación del contenido de sodio/calcio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 61
- Figura 26.** Relación del contenido de sodio/magnesio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 62
- Figura 27.** Actividad de SOD en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponia. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 64
- Figura 28.** Actividad de POX en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponia. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 65
- Figura 29.** Peroxidación de lípidos en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponia. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 66
- Figura 30.** Contenido de capsaicina en frutos de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en un sistema hidropónico de raíz flotante. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ). ..... 68

**Figura 31.** Contenido de dihidrocapsaicina en frutos de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponia. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ). ..... 68

## Lista de tablas

<b>Tabla I.</b> Localización subcelular de enzimas antioxidantes en organelos celulares. ....	14
<b>Tabla II.</b> Localización de antioxidantes no enzimáticos en compartimentos celulares.....	14
<b>Tabla III.</b> Composición del fertilizante por elementos.....	23
<b>Tabla IV.</b> Resumen del análisis de varianza para variables morfométricas de plantas de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	31
<b>Tabla V.</b> Resumen del análisis de varianza para la morfometría de frutos de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	35
<b>Tabla VI.</b> Resumen del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	42
<b>Tabla VII.</b> Resumen del análisis de varianza para variables fisiológicas de plantas de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	47
<b>Tabla VIII.</b> Resumen del análisis de varianza para el contenido mineral en tejido foliar de plantas de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) bajo estrés salino en hidroponia.....	54
<b>Tabla IX.</b> Resumen del análisis de varianza para los indicadores de estrés oxidativo en tejido foliar de plantas de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	63
<b>Tabla X.</b> Resumen del análisis de varianza para variables bioquímicas antioxidantes no enzimáticos en tejido de fruto de chile habanero ( <i>C. chinense</i> ) bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.....	67

## Abreviaturas

A	Tasa Fotosintética
AM	Agua de Mar
ANOVA	Análisis de Varianza
C.	<i>Capsicum</i>
C.E.	Conductividad eléctrica
CAT	Catalasa
Cia.	Compañía
CIBNOR	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
cv.	Cultivar
E	Tasa de transpiración
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
ERO	Especies reactivas de oxígeno
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FS	Fuente Salina
gs	Conductividad estomática
MDHAR	Monodehidroarcorbatoperoxidasa
mM	Milimoles
NaCl	Cloruro de sodio
NBT	Nitroazul de tetrazolio
nM	Nanómetros
POX	Peroxidasas totales
ppm	Partes por millón
PVPP	Polivinil-pirrolidona
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera
SOD	Superóxido dismutasa
SPAD	Fluorescencia de clorofilas
TAN	Tasa de Asimilación Neta
TBA	Ácido Tiobarbitúrico
TBARS	Sustancias reactivas al Ácido Tiobarbitúrico
TC	Tasa de Crecimiento
V/R	Relación Vástago/Raíz

## 1. INTRODUCCIÓN

El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanácea, incluyendo diversas especies de chile, siendo México el país donde se encuentra la mayor diversidad de chiles conocidos a nivel mundial. Esta hortaliza es cultivada en diferentes regiones de México, formando parte de los principales productos de exportación y de consumo interno, es utilizado como sazonador de alimentos en una gran diversidad de platillos de la cocina tradicional. Además, es un alimento rico en vitaminas y minerales (Eshbaugh, 2012).

Existen diversos tipos de estrés ambiental que afectan el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos (Oliva *et al.*, 2008), éstos son ocasionados por una variedad de factores, dentro de los cuales se incluye la sequía, la salinidad y la temperatura (Garzón y García, 2011).

La salinidad del suelo es uno de los factores ambientales más importantes que produce estrés en las plantas. Se incrementa año con año en las regiones áridas y semiáridas del mundo como consecuencia de una baja precipitación, irrigación de cultivos en suelo salinos y el uso excesivo de fertilizantes (FAO, 2011; González, 2008; Inzunza *et al.*, 2006). Así, la presencia de iones sodio ( $\text{Na}^+$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ), magnesio ( $\text{Mg}_2$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en concentraciones altas en los suelos salinos inhiben el crecimiento de muchas plantas, causando un efecto similar en la producción de cultivos (FAO, 2011; Lamber *et al.*, 2008; Munns *et al.*, 2015). García y Jáuregui (2008) además, mencionan que la mayoría de las plantas cultivadas son sensibles a la salinidad.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto del uso de agua salobre sobre el crecimiento, desarrollo y producción en el cultivo de chile bajo condiciones de

agricultura protegida y utilizando técnicas de cultivos sin suelo para prevenir daños al ambiente por la liberación de agua salobre.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Origen

El género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae* la cual consta de al menos 98 géneros y cerca de 2716 especies. A este género pertenecen cerca de 36 especies, con al menos 5 taxas del sureste de Brasil que no han sido clasificados (Nee *et al.*, 2006). Este se reconoce por ser de los primeros géneros domesticados del Nuevo Mundo. Los registros arqueológicos indican que los chiles tienen una larga historia en diferentes localidades en Latinoamérica (Pickersgill, 1969). El género *Capsicum* fue endémico para América en la etapa precolombina; cuando los Europeos descubrieron el Nuevo Mundo, iniciaron el intercambio y la transferencia de plantas desconocidas, de las cuales, algunas como las del género *Capsicum* se convirtieron en especies económicamente importantes que en muchos sentidos, superó su importancia en el Nuevo Mundo, cinco siglos después, los frutos de distintos chiles (*Capsicum*) dominaron el comercio de las especies picosas que son cultivadas en los trópicos y en regiones con temperaturas cálidas (Bosland, 2012). Este género cambió la dieta del mundo y continúa haciéndolo.

#### 2.1.2 Chile habanero

Los frutos de chile habanero son descritos con forma de linterna, de color naranja o rojo a su madurez, y su característica principal es que son picosos. Esta variedad fue originalmente cultivada en la Península de Yucatán, México y en Belice. La producción comercial de estos chiles se ha expandido a diversos países como Estados Unidos y Costa Rica. Los frutos son utilizados en salsas frescas, cocinados

directamente en platillos o fermentados para hacer salsas picantes y se utilizan deshidratados para la fabricación de gas mostaza (Eshbaugh, 2012).

### 2.1.3 Producción de chile mundial

En la producción mundial de chiles, China ocupa el primer lugar, con una superficie para su cultivo de más de 612,800 hectáreas (ha), es decir el 36% de la superficie mundial cultivada, lo que representa más de la mitad de la producción en el mundo. Después le sigue México ocupando el segundo lugar con una producción de 1,853,610 toneladas (t) y el tercero en superficie total cosechada. En conjunto, Turquía, Estados Unidos, España e Indonesia, representan el 25% del volumen total de la producción de chile en el mundo. Aunque los rendimientos más grandes son logrados por los países con mejor tecnología como Holanda y Reino Unido, con alrededor de 250 t ha<sup>-1</sup>. Estados Unidos y Alemania representan el 46% de las importaciones totales de chile (FAOSTAT, 2014).

### 2.1.4 Producción y consumo de chile en México

Según el Sistema de Información de Agricultura y Pesca (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en el año 2015 en México se sembraron 153,565.06 ha para la producción de chiles verdes; con una producción de 2,782,340.75 t, y un rendimiento promedio de 18.71 t ha<sup>-1</sup> con un valor de producción de \$ 2,258,548,719,000 pesos. Destacaron en los primeros lugares de producción, los estados de Sinaloa, Chihuahua y Zacatecas.

### 2.1.5 Producción de chiles en el estado de Baja California Sur

El estado de Baja California Sur ocupa el décimo lugar de producción de chiles verdes, con una superficie de 1,268.25 ha con una producción de 53,902.15 t y un rendimiento promedio de 42.5 t ha<sup>-1</sup>. También cabe mencionar que no se reportan superficies siniestradas, puesto que la mayoría de la superficie utilizada se encuentra como agricultura protegida (SIAP, 2015). Dentro de estas estadísticas el SIAP (2015) indica que en el estado se sembraron 7 ha de chile habanero con una producción de 200 t; presentando un rendimiento de 28.5 t ha<sup>-1</sup> con un valor de producción de \$1,280,000 pesos mn.

## 2.2 Salinidad

La formación de suelos salinos en zonas áridas es un rasgo característico en México, estas regiones suelen estar predominantemente en áreas donde la evaporación excede la precipitación y donde la infiltración de aguas marinas es común (Lamber *et al.*, 2008). Aproximadamente el 60% del territorio nacional está conformado por zonas áridas (Rivera *et al.*, 2004). En el 2007 se intensificó este problema, aumentando el área afectada por la formación de suelos salinos a un 10% y, de ésta, el 64% se localiza en la parte norte del país, que corresponde a las zonas áridas y semiáridas (González *et al.*, 2004; Ramírez *et al.*, 2008).

Los problemas de salinidad y sodicidad (contenido de Na) en Baja California Sur se agudizan como consecuencia del riego con las aguas duras características de los pozos de la región, algunos con un contenido superior a las 500 ppm (SEMARNAT, 2005). Uno de los efectos que tiene el sodio (Na<sup>+</sup>) en el suelo es la dispersión de sus partículas; como consecuencia, los vientos constantes de la región agudizan la erosión eólica de las tierras de labranza (Carrillo *et al.*, 2012).

### 2.3 Estrés salino en plantas

El estrés hídrico y salino producidos por la sequía y la salinidad del suelo limitan la producción de cultivos en el mundo. La sequía no se puede evitar, y la salinidad puede ser reducida sólo temporalmente. La escasez de agua aumentará en un futuro próximo en muchas regiones del mundo debido al cambio climático y como consecuencia de la urbanización (IPCC, 2007). Adicionalmente, en respuesta al desarrollo de zonas urbanas y suburbanas, aumentará la necesidad de suministrar más agua para las poblaciones crecientes, lo que se traducirá en una reducción de agua disponible para el riego de los cultivos (IPCC, 2007).

Para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos, surge la necesidad de aumentar la productividad en zonas ambientales desfavorables (Passioura y Angus, 2010). En consecuencia, se estima que una mayor proporción de los alimentos cultivados provendrán de zonas áridas.

La salinidad reduce el crecimiento de los cultivos al afectar negativamente la germinación y la emergencia de las plántulas (Parés *et al.*, 2008). Entre los síntomas más comunes, se puede observar necrosis en el tejido foliar que se presenta en los bordes de las hojas adultas en mayor frecuencia que en las hojas jóvenes. Por ejemplo, para el cultivo de fresa, los iones de NaCl, se acumulan en las hojas adultas lo que ocasiona que las hojas presentan necrosis por completo y se caigan (Casierra-Posada y García, 2005). Se han reportado diferencias morfométricas entre variedades de albahaca en condiciones de estrés salino; cada variedad presentó diferente susceptibilidad a este tipo de estrés (Reyes-Pérez, *et al.*, 2013). En chile ancho, se reporta una disminución del contenido de calcio ( $\text{Ca}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^+$ ) en respuesta a estrés salino, registrando incluso daño (necrosis) en los frutos (Ramírez-Serrano *et al.*, 2008). También se ha reportado un aumento en la succulencia de las hojas de pimiento morrón, expresado como incremento del grosor de la lámina foliar, en la epidermis y mesófilo, así como

la capacidad de mantener el índice estomático; se ha sugerido que esto podría ser una estrategia para reducir el efecto adverso de las sales en plantas jóvenes (Valera y García, 2014). El umbral de tolerancia para el género *Capsicum* se establece a 1.5 dS m<sup>-1</sup> en términos de conductividad eléctrica, considerándolo como moderadamente sensible (Grieve, 2011); sin embargo dentro de este género existen especies que son sensibles y otras tolerantes; tal como lo exponen Bojorquez-Quintal *et al.* (2014) en un estudio con dos variedades de chile habanero: Rex (tolerante) y Chichen Itzá (Sensible), donde señalan que existen diferencias en la producción de biomasa seca de raíz y la acumulación de minerales en raíz y hoja.

## 2.4 Hidroponía

El término cultivo hidropónico proviene de las palabras griegas *hydro* (agua) y *ponos* (trabajo); literalmente significa trabajo en agua. Sin embargo, se consideran sistemas de cultivo hidropónico a aquellos que se desarrollan en una solución nutritiva o en sustratos totalmente inertes; los cuales pueden ser sólidos (fibra de coco, perlita, vermiculita, arena) que se caracterizan por no reaccionar con la solución nutritiva, lo cual permite un manejo controlado de la nutrición en las diferentes etapas de crecimiento; a esta técnica también se le conoce como cultivo sin suelo, entendiéndose cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo (Soria *et al.*, 2010).

### 2.4.1 Ventajas del cultivo sin suelo

Se obtiene una relación óptima en aire y agua en el sistema radicular de las plantas, favoreciendo el desarrollo del cultivo; al utilizar sustratos inertes, sin actividad química o con baja capacidad de intercambio catiónico, la nutrición vegetal se presenta de una manera controlada, puesto que a diferencia del suelo no existen interacciones. Al utilizar estos sustratos, disminuyen las enfermedades relacionadas al suelo; de esta forma, el cultivo sin suelo es una buena alternativa al empleo de

desinfectantes; se obtienen cultivos uniformes, facilitando las labores de cosecha, podas, tutorado, deshierbes, así como el laboreo de la tierra y la incorporación de abonos; Generalmente, se puede obtener una mejor calidad de cultivo y, por lo tanto, del rendimiento (Soria *et al.*, 2010).

#### 2.4.2 Desventajas del cultivo sin suelo

El sistema requiere de una mayor precisión en el manejo del riego y la nutrición; los cultivos están expuestos a posibles cambios de temperatura ambiental, ya que el suelo cumple un papel de amortiguamiento; existe mayor costo de instalación del sistema de riego, de los contenedores para la solución nutritiva, y de los sustratos; por ser una técnica novedosa para el agricultor, requiere un asesoramiento técnico (Soria *et al.*, 2010).

### 2.5 Cultivo hidropónico en agua

De todos los métodos de cultivo sin suelo, el cultivo en agua, por definición es el auténtico cultivo hidropónico; en éste se incluye el cultivo aeropónico. En esta técnica de cultivo, las raíces de las plantas están suspendidas directamente en la solución nutritiva (Resh, 2006).

### 2.6 Nutrición mineral

El suelo es una mezcla de sólidos orgánicos e inorgánicos, aire, agua microorganismos y las raíces de las plantas, todas estas fases se influyen unas a otras: El desgaste y adsorción del suelo afecta el aire y la calidad del agua, el aire y el agua desgastan el suelo, los microorganismos catalizan muchas de las reacciones (de desgaste) mientras que las raíces absorben y exudan sustancias orgánicas e inorgánicas (Marschner, 2012).

Se considera que existen 16 elementos esenciales para el crecimiento y reproducción vegetal (Marschner, 2012); los que son requeridos en grandes cantidades se denominan macronutrientes mientras que los micronutrientes, que también son esenciales, los necesita las plantas en cantidades menores; como el cloruro (Cl), hierro (Fe), boro (B), manganeso (Mn), sodio (Na), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) y molibdeno (Mb) (Daroub, 2007; Marschner, 2012). Los elementos esenciales para el crecimiento vegetal también son llamados elementos minerales esenciales, sin embargo, estrictamente hablando, no son verdaderos minerales (a excepción del carbono, hidrogeno y oxígeno), estos son derivados, en última instancia, de los productos de descomposición de materiales minerales más largos por causa de la mineralización por acción del agua, viento y microorganismos (Rice, 2007)

### 2.6.1 Macronutrientes

Las plantas obtienen tres macronutrientes oxígeno (O), hidrógeno (H) y carbono (C) del aire y del agua, los otros como nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), azufre (S) y silicio (Si) son absorbidos del suelo en sus formas iónicas, algunos como cationes y otros como aniones, los cuales interactúan en el suelo de diversas formas (Bohn *et al.*, 2001; Daroub, 2007).

#### 2.6.1.1 Carbono, oxígeno e hidrógeno

Estos elementos se presentan en las plantas a niveles superiores de los otros nutrientes, mientras los nutrientes entran típicamente a la planta por absorción radicular en su forma iónica, quelatos, o pequeños constituyentes a nivel molecular de la solución del suelo (Rice, 2007) las plantas obtienen el carbono a través de sus hojas del dióxido de carbono atmosférico, por otro lado el oxígeno puede ser absorbido por dos vías, las raíces y hojas, pero siempre en su estado gaseoso (O<sub>2</sub>); el hidrógeno entra a la planta como un componente del agua (H<sub>2</sub>O); así que mientras

exista suficiente agua para mantener la turgencia de la planta, habrá suficiente hidrógeno para las necesidades metabólicas (Daroub, 2007).

#### 2.6.1.2 Nitrógeno

Este elemento es absorbido por las plantas en sus formas iónicas: amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), en su forma de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) es tóxico para las plantas. El amonio resulta de la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo (Daroub, 2007). EL papel del nitrógeno en las plantas es extenso, este es un constituyente esencial de aminoácidos, aunque la importancia principal de este elemento se basa en su rol como componente de enzimas, las cuales catalizan prácticamente cada reacción anabólica (formación) y reacciones catabólicas (descomposición) (Rice, 2007). El 80 a 85% del nitrógeno total en las plantas es secuestrado en proteínas, el 10% es distribuido en ácidos nucleicos y en los grupos metabólicos solubles de aminoácidos el 5% (Mengel y Kirkby, 2001).

#### 2.6.1.3 Fósforo

Este elemento se encuentra en las formas orgánicas e inorgánicas del suelo, aunque los porcentajes de cada una pueden variar ampliamente; las plantas lo absorben mediante las raíces principalmente como aniones de fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Para que la absorción de este elemento ocurra, es necesaria la mineralización, proceso por el cual los microorganismos transforman la materia orgánica del suelo en aniones de fosfato (Daroub, 2007). El fósforo en las plantas puede encontrarse básicamente en 4 estados, 1) como un ortofosfato (sal inorgánica) libre ( $\text{P}_i$ ), la forma que lo absorben las raíces; 2) como enlaces de pirofosfatos ricos en energía como Adenosintrifosfato (ATP); 3) como  $\text{P}_i$  ligado por un enlace éster a un grupo hidroxilo de azúcares o alcoholes orgánicos como la fructosa-6-fosfato; 4) como  $\text{P}_i$  formando enlaces diéster entre moléculas orgánicas (Rice, 2007).

### 2.6.1.2 Potasio

A diferencia del nitrógeno y del fósforo el potasio en el suelo está presente en formas inorgánicas; sin embargo, éste es absorbido por las plantas en su forma catiónica ( $K^+$ ). Por otra parte, el potasio en los fertilizantes suele presentarse en forma de sales solubles, como el cloruro de potasio y sulfato de potasio (Daroub, 2007). El potasio juega un papel fundamental en la función osmótica celular, en general la turgencia está dictaminada por la concentración celular de  $K^+$  regulando la apertura estomática (Rice, 2007).

### 2.6.1.3 Calcio y Magnesio

Ambos minerales son absorbidos por las plantas en su forma catiónica divalente ( $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ). De manera similar a lo descrito anteriormente para potasio, estos elementos se presentan en el suelo en sus formas minerales. El calcio juega un papel fundamental en la estructura de las plantas, principalmente en la estabilización de la pared celular, y estabiliza la estructura de la bicapa de fosfolípidos al unir los complejos de fosfatos y aniones ubicados en la superficie hidrofílica de la membrana; una deficiencia de calcio puede comprometer el funcionamiento de la membrana permitiendo la fuga de solutos orgánicos e inorgánicos por la bicapa lipídica lo que subsecuentemente compromete los procesos metabólicos (Rice, 2007). El calcio también activa directamente algunas enzimas, incluyendo las de la síntesis de la membrana celular aunque principalmente se reconoce el papel del calcio como un "segundo mensajero", las señales ambientales recibidas en la superficie de la célula son retransmitidas por la influencia del  $Ca^{2+}$  citoplasmático libre, el cual se dirige a proteínas específicas de unión al calcio (Mengel y Kirkby, 2001; Rice, 2007). Las reacciones de luz fotosintética resultan en el contratransporte de  $Mg^{2+}$  y  $H^+$  a través de la membrana tilacoidal, elevando el pH y los niveles de  $Mg^{2+}$  en el estroma, lo que mejora la fijación de carbono por RuBisCO (Rice, 2007).

## 2.7 Estrés oxidativo

El estrés oxidativo resulta de las condiciones que promueven la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales pueden dañar e incluso matar a las células. Dentro de los factores ambientales que causan estrés oxidativo se encuentran la contaminación del aire, la presencia de metales pesados en el suelo o agua de riego, la sequía, extremos térmicos (calor o congelamiento), salinidad, luz ultravioleta, alta irradiación y la infección por patógenos. La producción de ERO es una consecuencia de las reacciones metabólicas de las plantas (Halliwell y Gutteridge; 2006; Buchanan, 2015). Las ERO son productos altamente reactivos, generados como consecuencia de la reducción gradual del oxígeno molecular ( $O_2$ ) por la exposición a alta energía o como consecuencia de las reacciones químicas de la transferencia de electrones (Sharma, 2011). Las ERO incluyen radicales libres, como el anión superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ) y el radical hidroxilo (OH), así como moléculas de alta reactividad, como el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y el oxígeno singulete ( $^1O_2$ ) (Halliwell y Gutteridge, 2006).

## 2.8 Antioxidantes

Las ERO tienen un papel biológico en la defensa contra microorganismos y también pueden servir como reguladores del crecimiento y desarrollo celular; sin embargo, a niveles excesivos pueden causar toxicidad en la célula por el daño oxidativo a biomoléculas (Halliwell y Gutteridge, 2007; Sharma, 2011).

El balance entre la producción y depuración de ERO puede ser perturbada por distintos factores ambientales, generando un incremento en los niveles de ERO intracelular. Para evitar el daño oxidativo, los seres vivos poseen un complejo sistema de defensa antioxidante que incluye componentes enzimáticos y no enzimáticos (Halliwell y Gutteridge, 2007). Se conocen como antioxidantes a las sustancias que presentan la capacidad de inhibir la oxidación de moléculas que

provocan la aparición de ERO. La acción de los antioxidantes se entendía como el consumo de oxígeno, pero posteriormente se relacionó la actividad antioxidante de algunas sustancias con el deterioro de la calidad de los productos alimenticios, principalmente de los lípidos (German, 1999). La identificación de la actividad antioxidante de las vitaminas A, C y E le dio importancia a la investigación sobre los compuestos antioxidantes (Montero, 1996) ya que estos no son sintetizados por los humanos y se obtienen directamente de la ingesta de alimentos que los contienen.

## **2.9 Mecanismos antioxidantes de las plantas contra el estrés**

En las células vegetales, la producción de ERO se encuentra en distintos organelos celulares, como los cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas (Halliwell y Gutteridge, 2007). En consecuencia, los antioxidantes de las plantas, que incluyen compuestos no enzimáticos y enzimas, no se distribuyen homogéneamente y varían en los compartimentos celulares (Buchanan, *et al.*, 2015; Procházková, 2011) (Tablas I y II).

### **2.9.1 Sistema antioxidante enzimático**

Las plantas utilizan el  $O_2$  como aceptor final de electrones, que bajo condiciones normales u óptimas la reducción de  $O_2$  a  $H_2O$  procede lentamente; sin embargo bajo condiciones demandantes (estrés) se convierte en varios químicos altamente reactivos ROS, los cuales son dañinos en altas concentraciones (Sharma, 2011). Los componentes enzimáticos del sistema de defensa antioxidante incluyen enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GPX), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR), enzimas del ciclo ascorbato-glutatión y monodehidroascorbato peroxidasa (MDHAR) (Buchanan *et al.*, 2015). Estas enzimas operan en distintos organelos celulares (Tabla I) y responden en conjunto en una serie de reacciones bioquímicas, cuando las células son expuestas al estrés oxidativo (Procházková, 2011).

La enzima SOD (E.C.1.15.1.1) pertenece al grupo de las metaloenzimas y cataliza el  $O_2^{\cdot-}$  a  $O_2$  y  $H_2O_2$  (Buchanan *et al.*, 2015; Halliwell y Gutteridge 2006). Dentro de la célula, la SOD constituye la primer línea de defensa contra las ERO. En plantas, se han reportado 3 isoenzimas de SOD; Cu,Zn-SOD la cual es predominante en el citoplasma, cloroplastos y mitocondrias, Mn-SOD que se encuentra predominantemente en mitocondrias y peroxisomas, y Fe-SOD que se encuentra en los cloroplastos (Procházcová, 2011). La actividad de SOD incrementa bajo diversas situaciones de estrés, como la sequía, salinidad, temperaturas elevadas, alta irradiación.

### 2.9.2 Sistema antioxidante no enzimático

Los fitoquímicos antioxidantes provienen principalmente de los compuestos polifenólicos presentes en la mayoría de las frutas, vegetales y plantas, tales como los flavonoides, tocoferoles, carotenoides y clorofilas (Borowska, 2003; Haworth, 2003). Éstos interactúan con numerosos organelos celulares y, además de jugar un papel importante en la defensa y como cofactores de enzimas, estos antioxidantes influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas, modulando procesos de mitosis y elongación celular, hasta la senescencia y muerte celular (Procházcová, 2011).

**Tabla I.** Localización de enzimas antioxidantes en organelos celulares.

<b>Enzima Antioxidante</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Localización</b>
<b>Ascorbato peroxidasa</b>	APX	Citosol, mitocondria, plástidos, peroxisomas, nódulo de raíces
<b>Catalasa</b>	CAT	Peroxisoma, nódulo de raíces
<b>Dehidroascorbato reductasa</b>	DHAR	Citosol
<b>Glutación reductasa</b>	GR	Citosol, mitocondria, plástidos nódulo de raíces
<b>Glutación peroxidasa</b>	GPX	Citosol, mitocondria, plástidos
<b>Monodehidroascorbato reductasa</b>	MNDAR	Citosol, mitocondria, plástidos nódulo de raíces
<b>Perioxiredoxina</b>	PrxR	Cloroplasto, mitocondria
<b>Superóxido dismutasa</b>	SOD	Citosol, plástidos, peroxisomas, nódulo de raíces

**Tabla II.** Localización de antioxidantes no enzimáticos en compartimentos celulares.

<b>Antioxidante</b>	<b>Localización en la célula</b>
<b>Ascorbato (Vitamina C)</b>	Apoplasto, citoplasma, mitocondria, núcleo, peroxisoma, plástidos vacuolas
<b><math>\beta</math>- caroteno</b>	Plástidos
<b>Glutación (GSH)</b>	Citoplasma, mitocondria, plástidos, núcleo
<b>Poliaminas</b>	Citoplasma, mitocondria, plástidos, núcleo
<b><math>\alpha</math>- tocoferol (Vitamina E)</b>	Membranas
<b>Zeaxantina</b>	Cloroplasto

### **3. JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1 Importancia científica**

El uso de aguas salobres o residuales de sistemas agrícolas o dulceacuícolas como una alternativa ante la condición de cambio climático en las zonas áridas en un contexto regional, nacional y mundial como una alternativa para plantear sistemas agrícolas innovadores y sustentables, sin duda plantea una problemática compleja que deberá ser resuelta desde un punto de vista multidisciplinario por la ciencia.

#### **3.2 Importancia tecnológica**

La implementación de sistemas hidropónicos para el cultivo de vegetales bajo agricultura protegida reduce el impacto al medio ambiente y permite el uso de aguas salobres que no se pueden utilizar para la producción vegetal y animal.

#### **3.3 Importancia para el desarrollo**

##### **3.3.1 Pertinencia económica y ambiental**

Aprovechar aguas de baja calidad para el desarrollo de cultivos agrícolas es una estrategia sustentable para la optimización de recursos hídricos en zonas con recursos limitados. Además, al no liberar aguas de baja calidad al ambiente, puede prevenir la salinización de nuevas tierras.

##### **3.3.2 Pertinencia social**

Se estima que el crecimiento exponencial de la población humana ejercerá presión sobre los recursos naturales; por ejemplo, la provisión de agua será insuficiente para el uso agrícola, industrial y urbano; además, se considera que para proveer de

alimento a la población se transformarán los sistemas naturales en áreas agrícolas (FAO, 2003; Pimienta *et al.*, 2000; Vörösmarty, 2000).

La salud nutricional y el bienestar del humano son dependientes de los alimentos de origen vegetal; directamente, ya que son una fuente primaria para la obtención de minerales y aminoácidos e indirectamente, cuando las plantas son consumidas por otros animales (Martínez-Ballesta *et al.*, 2008).

#### **4 HIPÓTESIS**

Si el estrés salino causa diferencias morfométricas, fisiológicas, bioquímicas y de contenido mineral en *C. chinense*, entonces existirá una respuesta por la concentración de sales y/o por la fuente salina.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Conocer la respuesta a estrés salino en chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo condiciones hidropónicas en un sistema de raíz flotante a distintas concentraciones de salinidad utilizando dos fuentes salinas.

### 5.2 Objetivos particulares

1. Evaluar el crecimiento a través de parámetros morfológicos de las plantas de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo un sistema hidropónico de raíz flotante a diferentes concentraciones de salinidad.
2. Evaluar la translocación de los iones sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio (K), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en el tejido foliar de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo un sistema hidropónico de raíz flotante a diferentes concentraciones de salinidad.
3. Cuantificar la actividad de antioxidantes enzimáticos (SOD, POX) en el tejido foliar, y evaluar la concentración de antioxidantes no enzimáticos (Capsaicina) en el pericarpio de frutos, y los niveles de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) como indicadores de estrés oxidativo en chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá cultivado bajo sistema hidropónico de raíz flotante a diferentes concentraciones de salinidad.

4. Determinar el rendimiento de las plantas de *C. chinense* cultivado bajo un sistema hidropónico de raíz flotante a diferentes concentraciones de salinidad.
  
5. Determinar las variables fisiológicas (tasa fotosintética, conductividad estomática, tasa de transpiración, y el déficit de presión de vapor basado en la temperatura foliar) de las plantas de *C. chinense* cultivadas bajo un sistema hidropónico de raíz flotante a diferentes concentraciones de salinidad.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1 Descripción del sitio de estudio**

El cultivo de *C. chinense* se realizó bajo condiciones semi-controladas en una casa sombra tipo invernadero con malla antiáfidos, en un área de 30 m<sup>2</sup>, situado en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste (CIBNOR), S.C. El campo experimental se localiza en los terrenos litorales de El Comitán, en la porción meridional de la península de Baja California Sur, a 24°08' latitud norte y 110°24' longitud oeste, ubicada a 17 km al oeste de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México.

### **6.2 Material Biológico**

Semillas procedentes de la Cia. SIEMENS clasificado como un híbrido de chile picoso, variedad Chichen Itzá, lote: 140733702, fueron proporcionadas por el Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal, del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. para el desarrollo de este trabajo de tesis.

### **6.3 Diseño del sistema hidropónico**

#### **6.3.1 Diseño de raíz flotante (RF)**

Se utilizaron 16 cajas de plástico con capacidad de 63 L (marca NOVATEC, modelo Mérida) con las siguientes dimensiones externas; 71.5 cm de largo, 41.5 cm de ancho y 25.5 cm de alto. Para dar soporte mecánico a las plantas, se utilizaron placas de poliestireno extruido recortadas a medida de los contenedores para evitar la evaporación de agua. A cada placa se le hicieron cinco perforaciones con una sierra de corona de 2 pulgadas de diámetro, separadas 30 cm una de otra. En estos huecos se colocaron vasos negros ranurados (que permiten el contacto de las raíces

de las plantas con la solución nutritiva) en los que posteriormente se colocaron las plantas. Adicionalmente, se realizó una perforación de 2 pulgadas de diámetro al centro, a través de la cual se repuso el agua y/o solución nutritiva del sistema, y dos perforaciones de 5/16 de pulgada para colocar las mangueras de aireación.

## **6.4 Metodología para germinación y trasplante**

### **6.4.1 Germinación**

Las semillas fueron sembradas en charolas de germinación de unicel de 200 cavidades el día 26 de septiembre del 2016, emergiendo el día 11 de octubre del mismo año. Las plántulas recibieron una fertilización basal de 50 ppm de N-P-K en una sola aplicación (día 20 de octubre del 2016), sumergiendo la charola de germinación en la solución nutritiva hasta que se humedece el sustrato; para mantener la charola con humedad constante, se sumergía en una caja de plástico con capacidad de 63 L (marca NOVATEC, modelo Mérida) con agua proveniente del campo agrícola experimental del CIBNOR.

### **6.4.2 Trasplante para sistema raíz flotante**

Cuando las plántulas alcanzaron 12-15 cm de altura (60 días después de la germinación), fueron retiradas de las charolas, se tomaron con cepellón y se enjuagaron con agua destilada para eliminar los restos del sustrato de germinación. Así, las raíces al descubierto permitieron mayor contacto con la solución nutritiva del sistema.

## 6.5 Diseño experimental

Se estableció un diseño en bloques al azar, con dos fuentes salinas: cloruro de sodio (NaCl) y diluciones de agua de mar (AM) y gradientes de salinidad a una conductividad eléctrica (C.E.) de 3.5, 6.6, 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> para ambas fuentes de salinidad. Para los tratamientos con NaCl, se utilizó como control la solución nutritiva a 3 g L<sup>-1</sup> con una C.E. de 3.5 dS m<sup>-1</sup>; a esta solución se agregaron 25, 50 y 100 mM de NaCl (0.73, 1.46 y 2.92 g L<sup>-1</sup>) para alcanzar los niveles de salinidad determinados (3.5 {control}, 6.6, 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup>). Para los tratamientos con agua de mar, a la solución nutritiva se agregó agua de mar en proporciones tales que aportaran equivalencias en la conductividad eléctrica 3.5 dS m<sup>-1</sup> con 3 g L<sup>-1</sup> de fertilizante HydroEnvironment® {control}, 6.6 dS m<sup>-1</sup> con 50 mL de agua de mar por L de solución nutritiva (SN), 9.4 dS m<sup>-1</sup> 100 mL de agua de mar por L de SN y 13.6 dS m<sup>-1</sup> con 150 mL de agua de mar por L de SN respectivamente. Los recipientes para colocar las plantas fueron de material plástico con capacidad de 63 L (marca Novatec, modelo Mérida) con las siguientes dimensiones externas: 71.5 cm de largo, 41.5 cm de ancho y 25.5 cm de alto, aunque los tratamientos salinos con la solución nutritiva se aforan a los 40 L. Para otorgar un soporte mecánico a las plantas se utilizaron placas de poliestireno extruido recortadas a medida de los contenedores, se realizaron 5 perforaciones con una sierra de 2 pulgadas de diámetro, separadas 30 cm una de otra; en estas perforaciones se colocaron vasos negros ranurados (para permitir el contacto de las raíces con la solución nutritiva) en donde finalmente se colocaron las plantas. Adicionalmente se realizó una perforación de 2 pulgadas de diámetro en el centro de la placa para reponer el agua y/o la solución nutritiva con los tratamientos salinos. También se realizaron dos perforaciones de 5/16 de pulgada, por el cual entraban las mangueras de aireación.

## 6.6 Fertilización

Se utilizó el fertilizante compuesto HydroEnvironment®, que contiene una concentración porcentual de 10-8-18 de N-P-K, para realizar los cálculos para utilizar una dosis de nitrógeno constante a 300 ppm (3 g L<sup>-1</sup>). El agua para formular la SN provenía de la planta desalinizadora del campo experimental del CIBNOR, mientras que el AM provenía del llenado de los estanques acuícolas del centro.

**Tabla III.** Composición del fertilizante por elementos.

<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Por 1 g de HEnv (mg)</b>
<b>Nitrógeno (N)</b>	10	100
<b>Fósforo (P)</b>	3.49	34.93
<b>Potasio (K)</b>	14.94	149.36
<b>Calcio (Ca)</b>	5.9	59
<b>Azufre (S)</b>	2.5	25
<b>Cobre (Cu)</b>	0.0002	0.002
<b>Manganeso (Mn)</b>	0.002	0.02
<b>Hierro (Fe)</b>	0.1	1
<b>Zinc (Zn)</b>	0.01	0.1
<b>Boro (B)</b>	0.002	0.02
<b>Magnesio (Mg)</b>	1.8	18

## 6.7 Variables morfológicas

Al momento del trasplante, tiempo inicial ( $t_i$ ) se tomaron 5 plantas de chile habanero, provenientes de la charola de germinación, para estimar los valores iniciales de área foliar con un equipo de medición de área foliar LI-3000A (LI-COR Bioscience, Lincoln, NE), peso fresco y peso seco de raíz, tallo, hojas por el método gravimétrico utilizando una balanza con sensibilidad de 0.1g (AND HF- 6000G) Al finalizar el experimento, se muestrearon 6 plantas y se les midieron las mismas características, agregando el peso fresco y peso seco de los frutos, lo que sería el tiempo final del experimento ( $t_f$ ). A cada planta, se le determinó la tasa de crecimiento (TC), la tasa de asimilación neta (TAN), relación Vástago/Raíz (V/R), y la relación entre los órganos fotosintéticos y no fotosintéticos (F/NF). Para la obtención del peso seco de las muestras de tallo, raíz hoja y fruto, se colocaron las muestras en bolsas de papel y fueron secadas en una estufa a 70°C durante 48 horas (TERLAB TE-H80DM) y se registró el peso en una balanza (AND HF- 6000G).

## 6.8 Variables fisiológicas

La tasa fotosintética, conductividad estomática, tasa de transpiración,  $\text{CO}_2$  intracelular y temperatura de la hoja, fueron obtenidas mediante un equipo portable de fotosíntesis LI-6400XT (Li-Cor), a los 98 días del experimento; siete días previos a la cosecha. Para el registro de la fluorescencia de la clorofila se utilizó un equipo portátil SPAD-502 (Minolta, Tokio, Japón) el cual registra la fluorescencia como medida indirecta del contenido total de clorofilas. Se realizaron 4 mediciones por tratamiento, las cuales representaban el promedio de 3 puntos de cada hoja, entre las 10:00 y 11:30 AM, seleccionando el segundo punto de crecimiento, donde se seleccionaron hojas completamente desarrolladas y fotosintéticamente activas, si estas presentaban algún daño físico se descartaron.

## 6.9 Contenido mineral

De las muestras provenientes de la estufa de secado, se tomaron 0.5 g de hoja, procediendo a pulverizarlas en un mortero hasta homogeneizar el polvo fino. Para la digestión de las muestras, se adicionó una mezcla de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$ , (10 mL) y peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  (2 mL) durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente a la digestión, las muestras fueron filtradas, diluidas y aforadas a un volumen de 50 mL con agua desionizada. Se cuantificó la concentración de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica con flama de aire acetileno, los resultados fueron reportados en  $\text{g mg}^{-1}$  de muestra seca de tejido.

## **6.10 Respuesta antioxidante**

### **6.10.1 Preparación de muestras de tejido vegetal**

Se tomaron 4 muestras de 2 g de tejido foliar fresco por tratamiento, las muestras se congelaron por inmersión en nitrógeno líquido y se almacenaron en un ultracongelador a  $-80^\circ\text{C}$  hasta su procesamiento. Se tomaron 0.1 g de tejido y se le adicionaron 2 mL de solución amortiguadora de fosfatos de potasio ( $\text{NaPKi}$ , 50 mM, pH 7.8) y 20  $\mu\text{L}$  de fluoruro-fenil-metil-sulfenil (PMSF, 0.1 mM). Esta mezcla se homogenizó en un vortex manteniendo una temperatura de  $4^\circ\text{C}$ . La mezcla homogenizada fue centrifugada a  $1000 \times g$  durante 15 minutos manteniendo la temperatura a  $4^\circ\text{C}$ . El sobrenadante fue utilizado para el análisis de los indicadores de estrés oxidativo.

## 6.10.2 Análisis de la actividad de las enzimas antioxidantes

### 6.10.2.1 Superóxido dismutasa (SOD)

La actividad enzimática de SOD (E.C. 1.15.1.1) se midió siguiendo el método descrito por Paoletti *et al.* (1986). Se utilizó el sistema xantina/xantina oxidasa como generador constante del radical superóxido el cual, al entrar en contacto con el nitroazul de tetrazolio (NBT) lo reduce y forma un producto llamado formazán el cual puede ser detectado siguiendo el cambio de absorbancia a 560 nm cuando la SOD inhibe la reducción del NBT. Se midió el cambio de absorbancia a 560 nm en un espectrofotómetro de microplaca (Thermo Scientific, MULTISKAN FC). Las cantidades de SOD se expresan en unidades de SOD  $\text{mg}^{-1}$  proteína. Una unidad de actividad de SOD se define como la cantidad de enzima requerida para inhibir la reacción de  $\text{O}_2^{\cdot-}$  con NBT al 50%.

### 6.10.2.2 Peroxidasas totales (POX)

La actividad enzimática de las POX (E.C. 1.11.1.7) se midió de acuerdo al método descrito por Kar y Mishra (1976). El principio de este método es la oxidación de pirogalol por peróxido de hidrógeno, lo cual genera un compuesto llamado purpogalina cuya absorbancia es medida a 420 nm. La mezcla del ensayo se compuso por 135  $\mu\text{L}$  de agua desionizada, 12.5  $\mu\text{L}$  de solución reguladora de fosfatos 100 mM, pH 7.0, 2.5  $\mu\text{L}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 M, 50  $\mu\text{L}$  de pirogalol 250 mM y 250  $\mu\text{L}$  del extracto de la muestra. Se adicionaron 50  $\mu\text{L}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Se midió el cambio de absorbancia a 405 nm y a 450 nm en un espectrofotómetro de microplaca (Thermo Scientific, MULTISKAN FC). Una unidad de POX se define como la cantidad de peroxidasa que genera 1 mg de purpogalina en 20 segundos. Cada muestra se analizó por triplicado. Los resultados se expresan como unidades de POX  $\text{mg}^{-1}$  proteína.

### 6.10.3 Análisis de la peroxidación de lípidos

Para cuantificar los niveles de peroxidación de lípidos, como un indicador de daño oxidativo, se analizó el contenido de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) siguiendo el método descrito por Persky *et al.* (2000). Se tomó 0.1 g de tejido fresco previamente homogenizado con una solución amortiguadora de fosfato a una concentración de 0.1 M, pH de 6.8, seguido de una centrifugación a 2124 x g por un minuto a 4°C. Se adicionó ácido tiobarbitúrico (TBA) al 1 % en relación peso/volumen y se incubó a 90°C durante 10 minutos. Los resultados se expresan en mmol de proteínas mg<sup>-1</sup> de tejido fresco.

### 6.10.4 Proteínas totales

El contenido de proteínas totales se determinó de acuerdo al método descrito por Bradford (1976), el cual consiste en utilizar el colorante azul (Bio-Rad, Cat. 500-0006) que, en respuesta a la concentración de proteína reacciona con los residuos de los aminoácidos básicos, especialmente la arginina. La determinación de proteínas totales se realizó por triplicado, expresándose en mg mL<sup>-1</sup>.

### 6.10.5 Concentración de capsaicina

Para determinar la concentración de capsaicinoides, se utilizó una variante del método de extracción descrito por Perucka y Oleszek (2005). Utilizando tejido fresco del pericarpio, se pesó 1 g de tejido, adicionando 3 mL de acetona fría y 250 µL de IS, homogenizando por un minuto a 20,000 rpm (Pro250 BioHomogenizer. Biospec Products, Bartlesville, OK, USA). Se adicionaron 12 mL de acetona:éter de petróleo (v/v), sonicando por 15 minutos a 144W, 50 Hz (Sonorex TK30, Bandelin Electronic, Berlin, Germany) y, finalmente, se filtró el material al vacío con papel Whatman 541 (GE Healthcare, Buckinghamshire, UK), pasando el filtrado a un embudo de separación. Se agregó 1 mL de 10% NaCl en agua para separar la acetona, recuperando la fase éter (superior) a la que se agregó un poco de sulfato de sodio anhidro, para secar, concentrando posteriormente el éter con presión reducida a

37°C. El residuo se disolvió en 1 mL de MeOH:ACN (1:1, v/v), se filtró (0.22 µM) y se depositó en un vial color ámbar para HPLC. Se utilizó como estándar interno (IS) 5- $\alpha$ -colestano; éste se disolvió en 50 mL de ACN (Acetona):MeOH:cloroformo (18:7.5:74.5, v/v) (20 µg/mL final) y estándar de capsaicina (8-metil-N-vanillil-6-nonenamida) ó [(E)-N-(4-hidroxi-3-metoxibenzil)-8-metil-6-nonenamida], mismos que se disolvieron 100 ml de ACN:agua (95:5, v/v) (1 mg/mL final). El estándar está compuesto de 51.59% capsaicina, 39.37% dihidrocapsaicina, 7.44% nordihidrocapsaicina y 1.6% homocapsaicina (515.9 ng/mL, 393.7 ng mL<sup>-1</sup>, 74.4 ng mL<sup>-1</sup> y 16.0 ng mL<sup>-1</sup>, respectivamente).

La separación y detección de capsaicinoides se realizó mediante HPLC con detección por UV. Se utilizó un equipo Agilent 1260 Infinity compuesto por una bomba binaria 1260 BinPump, un automuestreador termostatzado 1260 ALS y 1290 Thermostat, un horno para columnas 1260 TCC y un detector de arreglo de diodos 1260 DAD, controlado con el software Open LAB CDS, ver. C.01.07(27) (Agilent Technologies, Inc., Waldenbronn, Germany). La columna empleada fue una Synergi™ 4 µm Fusion-RP 80 Å 50 x 2 mm (Phenomenex, Inc., Torrance, CA, USA). Se utilizó un gradiente de solución A agua y solución B ACN, a un flujo de 500 µL/min, con 25% de solución B al minuto 0 variando a 65% de solución B en 19 minutos, subiendo inmediatamente a 100% B e incrementando el flujo a 1000 µL min<sup>-1</sup> retornando gradualmente a 25% de B en el minuto 23, disminuyendo el flujo a 500 µL min<sup>-1</sup> y manteniéndolo por 5 minutos. Se inyectaron 3 µL tanto de los estándares como de las muestras. La detección se realizó por 28 minutos con arreglo de diodos a 227 nm, con una referencia a 360 nm. La cromatografía y la detección fueron realizadas a temperatura ambiente, en tanto que las muestras se mantuvieron a 5°C previo a la inyección.

### **6.11 Análisis estadísticos**

Se realizaron pruebas de homocedasticidad y normalidad de los datos. Posteriormente, se analizaron mediante un análisis de varianza multifactorial, si éstas presentaron diferencias estadísticamente significativas, se realizaron pruebas de comparaciones múltiples de Tukey. El nivel de significancia estadístico se definió como  $\alpha$  0.05. Los análisis se procesaron en el programa STATISTICA ver 8.0, y los gráficos fueron elaborados en SigmaPlot ver. 12.0.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Efecto de los tratamientos salinos en variables morfométricas y parámetros de crecimiento de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

Al finalizar el experimento los tratamientos de salinidad aplicados a las unidades experimentales tuvieron un efecto en las variables morfométricas y de crecimiento evaluadas. En general, en los tratamientos con NaCl, las plantas presentaron mayor defoliación y clorosis. Mostrando efectos adversos en el crecimiento y desarrollo de las plantas de chile habanero a medida que el nivel de salinidad aumentaba.

#### 7.1.1 Efecto de los tratamientos salinos en la biomasa seca de raíz, tallo, fruto, hojas y área foliar de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

El análisis de varianza mostró que para el factor fuente de salinidad (FS) ninguna de las variables evaluadas presentó diferencias significativas al comparar los tratamientos salinizados con cloruro de sodio (NaCl) o con diluciones de agua de mar (AM). El factor nivel de salinidad (C.E.) mostró diferencias significativas entre los niveles de salinidad en todas las variables evaluadas. La interacción de los factores Fuente de salinidad y niveles de salinidad (F.S.\*C.E.) mostró diferencias significativas en las variables peso seco de tallos, peso seco de hojas y el área foliar como se muestra en la tabla IV.

**Tabla IV.** Resumen del análisis de varianza para variables morfométricas de plantas de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.

Factor	Peso Seco Raíz (g)	Peso Seco Tallos (g)	Peso Seco Frutos (g)	Peso Seco Hojas (g)	Área Foliar (cm <sup>2</sup> )	Peso Seco Total (g)
FS						
CE	*	*	*	*	*	*
FS*CE		*		*	*	

FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ ).

#### 7.1.1.1 Peso seco total

Para el peso seco total se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40} = 40.88$ ,  $p \leq 0.00001$ ) para el factor niveles de salinidad (C.E) (Tabla I). En general, para la variable peso seco total hay un decremento a medida que el nivel de salinidad (C.E.) aumenta (Fig.1). Así, al comparar el nivel de salinidad control  $3.5 \text{ dS m}^{-1}$  con el nivel más alto de salinidad  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  se observó una disminución de 52.5 y 56.1% en soluciones con NaCl y soluciones con agua de mar respectivamente.

#### 7.1.1.2 Peso seco de raíz

Para el peso seco de raíz se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40} = 7.66$ ,  $p = 0.003$ ) en el factor nivel de salinidad (CE) (Tabla I). El peso seco de raíz disminuyó a medida que la salinidad de la solución expresada en C.E. aumento (Fig.1). Sin embargo, la prueba de comparación de medias pudo detectar la existencia de dos grupos independientemente de la fuente de salinidad, un grupo formado por los controles, y otro grupo por los tratamientos de  $6.6$ ,  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  sin diferencias significativas entre ellos, los cuales presentaron una reducción del 12, 19 y 23 % comparados con el grupo control. No se observaron diferencias significativas en la interacción (F.S.\*C.E.).

#### 7.1.1.3 Peso seco de frutos

La evaluación final de la variable peso seco de frutos mostró diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40}= 63.84$ ,  $p \leq 0.00001$ ) en el factor nivel de salinidad (CE) como se muestra en la tabla I. Para el caso de esta variable (Fig.1) se observa una disminución del peso seco de los frutos a medida que la C.E de la solución aumenta independientemente de fuente de salinidad. En los tratamientos de control salinizados con NaCl o agua de mar, el peso seco de los frutos fue de 104 y 102 g respectivamente, siendo el mayor rendimiento, disminuyendo hasta 46.7 y 47.8%, en los tratamientos de 6.6 dS m<sup>-1</sup> y 90.4 o 85.4 % en los niveles de salinidad de 13.6 dS m<sup>-1</sup> de NaCl respectivamente.

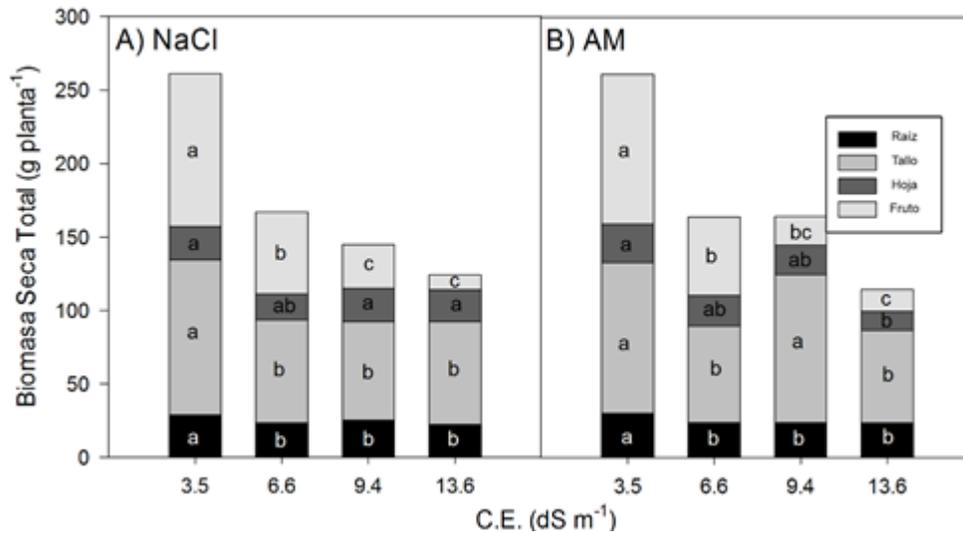
#### 7.1.1.4 Peso seco de hoja

Para la variable de peso seco de la hoja, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40}=4.82$ ,  $p= 0.0058$ ) para la interacción entre los factores FS\*C.E. (Tabla IV), considerando esta interacción el tratamiento de NaCl a 6.6 dS m<sup>-1</sup> se presentó disminución del 19% respecto a su grupo control (Fig. 1), mientras que el tratamiento de AM a 13.6 dS m<sup>-1</sup> muestra un decremento del 50% también comparado con su grupo control.

#### 7.1.1.5 Peso seco de tallo

Para el peso seco del tallo, el análisis de varianza muestra que existen diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40}= 16.54$ ,  $p \leq 0.00001$ ), para el factor nivel de salinidad (CE), y para la interacción FS\*C.E ( $F_{3,40}= 4.90$ ,  $p =0.005$ ) (Tabla IV). En la figura 1, se observa que los tratamientos de control de ambas fuentes de salinidad y el tratamiento de 9.4 dS m<sup>-1</sup> salinizado con agua de mar (AM) resultaron con el mayor peso seco de tallo y sin diferencias significativas en la prueba de comparación de medias. El grupo mayormente afectado por la salinidad, se observó en los tratamientos de 6.6 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> independientemente de la fuentes salinidad,

reduciéndose hasta 33.5% y 38.5% para los tratamientos de 13.6 dS m<sup>-1</sup> en ambas fuentes de salinidad.



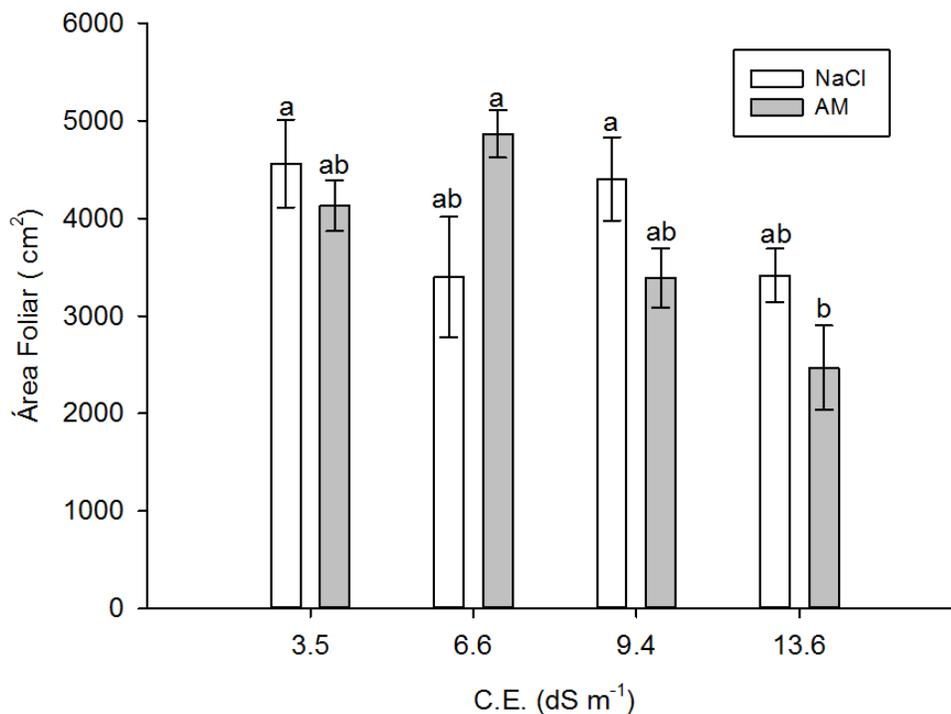
**Figura 1.** Distribución de biomasa seca en plantas de chile habanero (*C. chinense*) cultivado en hidroponía por raíz flotante bajo condiciones de estrés salino. Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

#### 7.1.1.6 Área foliar

Para la variable de Área Foliar (ÁF), se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40} = 4.31$ ,  $p = 0.009$ ) para la interacción entre los factores FS\*C.E. (Tabla I).

En la figura 2 se puede observar que el área foliar de las plantas de chile habanero de los tratamientos salinizados con NaCl no muestran diferencias significativas entre ellos. Mientras que para los tratamientos salinizados con agua de mar AM si muestran una tendencia a disminuir a medida que el nivel de salinidad aumenta a 13.6 dS m<sup>-1</sup> y con diferencias estadísticas altamente significativas solo para este nivel

de salinidad, disminuyendo su área foliar hasta un 40% con respecto al tratamiento control.



**Figura 2.** Área foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

## 7.2 Efecto del estrés salino en la morfometría de frutos de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

Las variables morfológicas de los frutos se agrupan en el apartado de la morfometría de fruto. El análisis de varianza permitió mostrar diferencias estadísticamente significativas para el factor fuente de salinidad (FS) solo en la variable diámetro de fruto ( $F_{3,40}= 16.38$ ,  $p \leq 0.00001$ ), en el factor gradiente o nivel de salinidad (CE) C.E. en las variables: número de frutos ( $F_{3,40}= 58.15$ ,  $p \leq 0.00001$ ), frutos maduros ( $F_{3,40}= 18.34$ ,  $p \leq 0.00001$ ), frutos verdes ( $F_{3,40}= 61.72$ ,  $p \leq 0.00001$ ), longitud ( $F_{3,40}=7.20$ ,  $p=0.00056$ ), diámetro ( $F_{3,40}= 26.92$ ,  $p \leq 0.00001$ ), grosor de pulpa ( $F_{3,40}= 7.64$ ,  $p = 0.00037$ ) y en la interacción de ambos factores sólo en la variable grosor de pulpa del fruto F.S.\*C.E. ( $F_{3,40}= 9.4$ ,  $p \leq 0.00007$ ) resultó con diferencias estadísticamente significativas. Hay evidencia clara que la morfología del fruto es afectada por los niveles o gradientes de salinidad (CE), independientemente de las fuentes de la salinidad (F.S) como se observa en la tabla II.

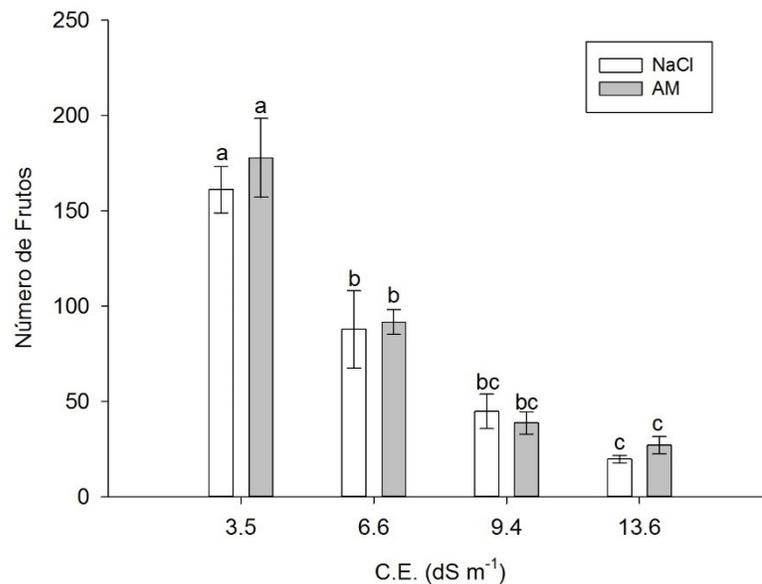
**Tabla V.** Resumen del análisis de varianza para la morfometría de frutos de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.

Factor	Número de frutos	Frutos Maduros	Frutos Verdes	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Grosor de pulpa (mm)
FS					*	
CE	*	*	*	*	*	*
FS*CE						*

FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ ).

### 7.2.1 Producción de frutos

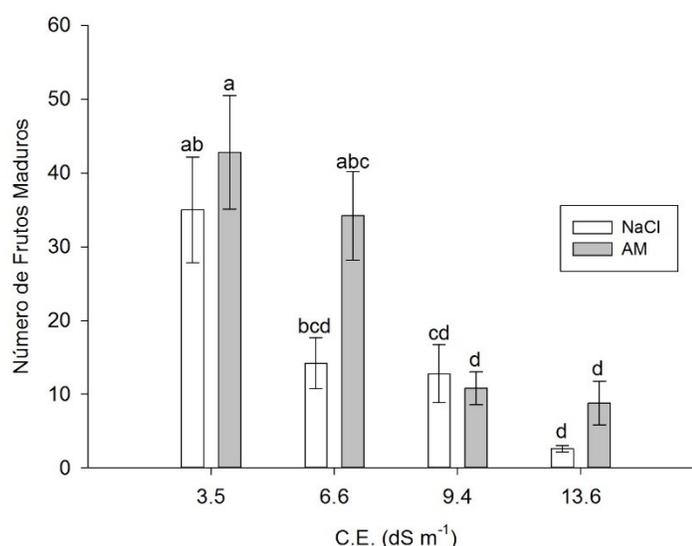
El rendimiento de frutos, expresado en número de frutos por planta (Fig.3) muestra una tendencia general a disminuir a medida que el nivel de salinidad medido en C.E. aumenta, en ambas fuentes de salinidad evaluadas. Los tratamientos salinizados con NaCl disminuyeron el Número de frutos en 45, 72 y 87% con respecto al tratamiento de control, mientras los tratamientos salinizados con Agua de Mar, también disminuyeron en 48, 78 y 84 % respecto al tratamiento de control.



**Figura 3.** Número de frutos en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.2.2 Producción de frutos maduros

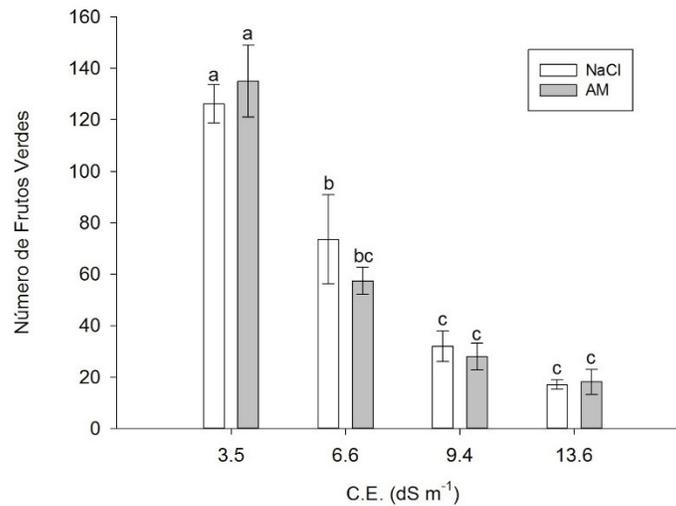
En la figura 4 se muestra el efecto del estrés salino en la producción de frutos maduros, los cuales presentan una tendencia a disminuir conforme la C.E. aumenta. El tratamiento de 6.6 dS m<sup>-1</sup> con AM presentó un decremento del 20% respecto a su control, mientras que el tratamiento de NaCl para esta misma C.E. decayó un 69%. Los tratamientos de 13.6 dS m<sup>-1</sup> para NaCl y AM bajaron su producción en 92 y 79%.



**Figura 4.** Número de frutos maduros en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.2.3 Producción de frutos verdes

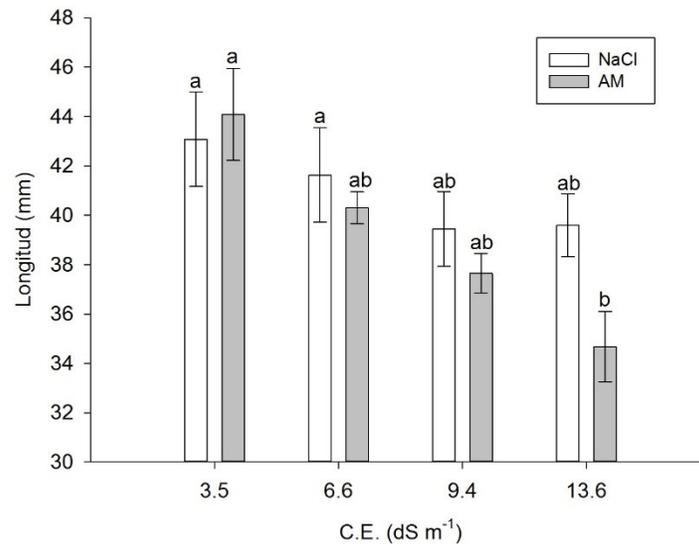
La producción de frutos verdes (Fig. 5) presenta una disminución conforme la C.E. aumenta, no se distinguen influencia por la F.S. El tratamiento de 6.6 dS m<sup>-1</sup> NaCl decae un 41% y para esta C.E. con AM se aprecia un decremento del 57%. Los tratamientos de 13.6 dS m<sup>-1</sup> presentaron una disminución del 86 % de esta variable.



**Figura 5.** Número de frutos verdes en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.2.4 Longitud de frutos

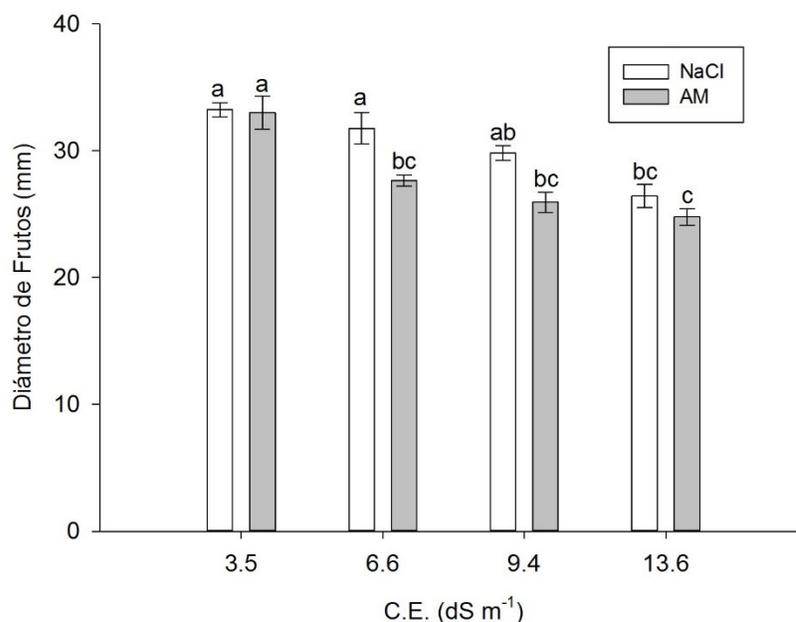
La longitud de frutos muestra una tendencia a disminuir conforme la C.E. aumenta (Fig. 6). El tratamiento de 13.6 dS m<sup>-1</sup> con AM presentó una disminución del 21%, respecto a su grupo control. Los tratamientos de 6.6, con NaCl y AM presentaron un decremento del 3 y 8% respectivamente.



**Figura 6.** Longitud de chiles en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.2.5 Diámetro de frutos

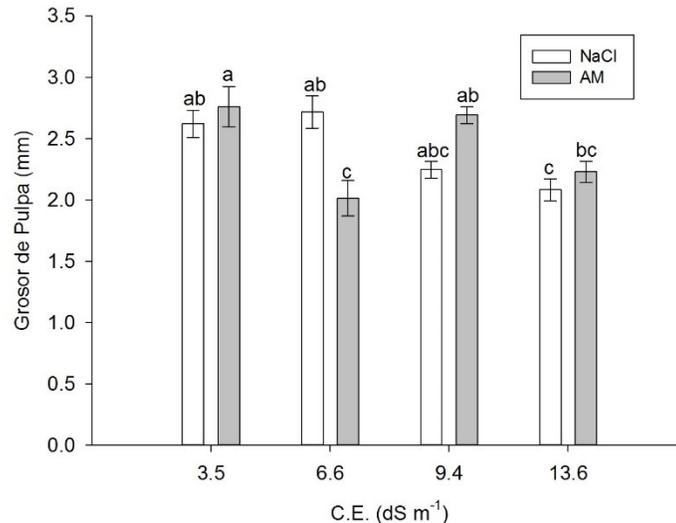
El diámetro de frutos (Fig. 7) muestra una tendencia a disminuir conforme la C.E. aumenta. Los tratamientos de NaCl a 6.6, 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> presentaron una disminución en esta variable en 4, 10 y 20%, a su vez, sus equivalencias en AM redujeron en 16, 21 y 25 % respecto a su control.



**Figura 7.** Diámetro ecuatorial de chiles en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.2.6 Grosor de pulpa

El grosor de pulpa de los frutos de chile habanero (Fig. 8) disminuyó conforme la C.E. aumentaba, el tratamiento de 6.6 dS m<sup>-1</sup> mostró un incremento del 3% respecto a su control. Los tratamientos de 13.6 dS m<sup>-1</sup> disminuyeron en 20% esta variable.



**Figura 8.** Grosor de pulpa de frutos de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.3 Efecto del estrés salino en los parámetros de crecimiento de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

En la tabla III se observa que la variable Tasa de Crecimiento (T.C.) existieron diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40} = 40.88$ ,  $p \leq 0.00001$ ) en el factor de C.E. mientras que para la relación de órganos fotosintéticos/no fotosintéticos (F/NF) se encontraron diferencias en los factores de F.S. ( $F_{3,40} = 8.27$ ,  $p = 0.00642$ ) y la interacción de F.S.\*C.E. ( $F_{3,40} = 14.24$ ,  $p \leq 0.00001$ ). La tasa de asimilación neta (T.A.N.) mostró diferencias en C.E. ( $F_{3,40} = 15.90$ ,  $p \leq 0.00001$ ) y la interacción de

F.S.\*C.E. ( $F_{3,40} = 5.57$ ,  $p \leq 0.00270$ ). En la relación vástago/ raíz (V/R) encontramos diferencias estadísticamente significativas ( $F_{3,40} = 3.98$ ,  $p = 0.01419$ ) en la interacción de los factores F.S.\*C.E.

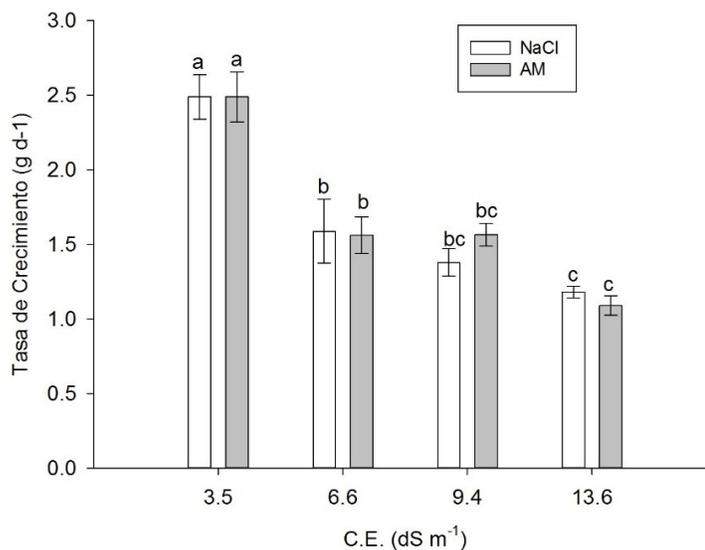
**Tabla VI.** Resumen del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante

Factor	T.C. (g planta <sup>-1</sup> )	F/NF	T.A.N.	V/R (mg cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
F.S.		*		
C.E.	*		*	
F.S.*C.E.		*	*	*

FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ ).

### 7.3.1 Tasa de Crecimiento (T.C.)

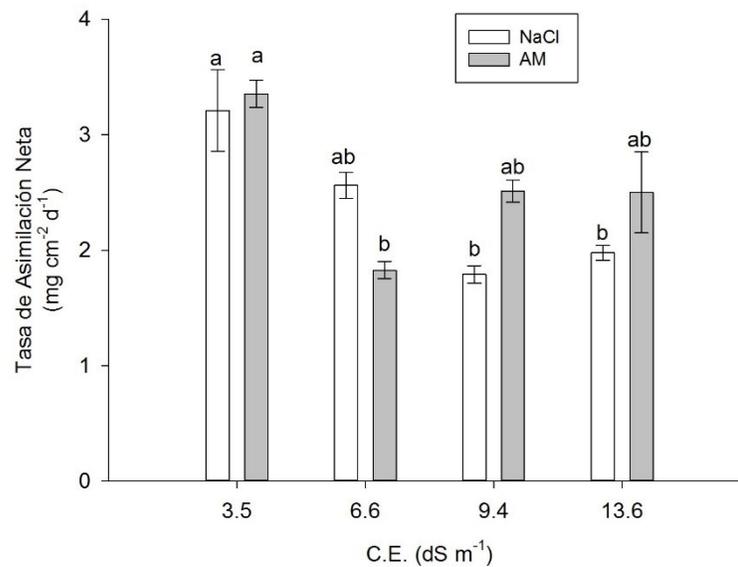
En la figura 9 se muestra que la T.C. disminuye conforme la C.E. incrementa independientemente de la F.S. Los tratamientos control de NaCl y AM mostraron un promedio de  $2.48 \text{ g planta}^{-1}$ , para los tratamientos de  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  existe una disminución del 36 y 55% respectivamente comparado con su grupo control.



**Figura 9.** Tasa de crecimiento en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.3.2 Tasa Asimilación Neta (TAN)

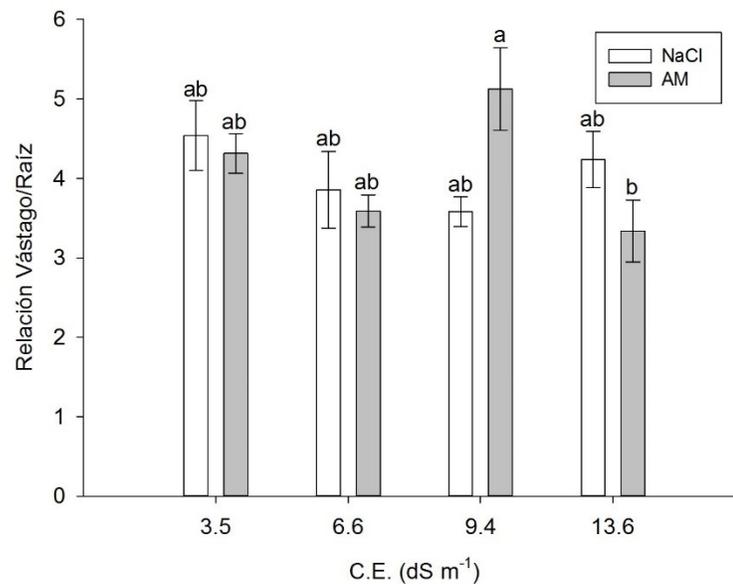
Considerando solo las diferencias entre la interacción de los factores F.S.\*C.E. (Tabla III) en la figura 10 podemos observar que los tratamientos de NaCl a  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$ , AM a  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  no mostraron diferencias y presentaron una disminución del 45.5, 44.2 y 38.4 % comparados con el grupo control. Para los tratamientos de NaCl a  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  se observó una disminución de la T.A.N. en un 25 %.



**Figura 10.** Tasa de asimilación neta en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas ( $n=6$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.3.3. Relación vástago/raíz

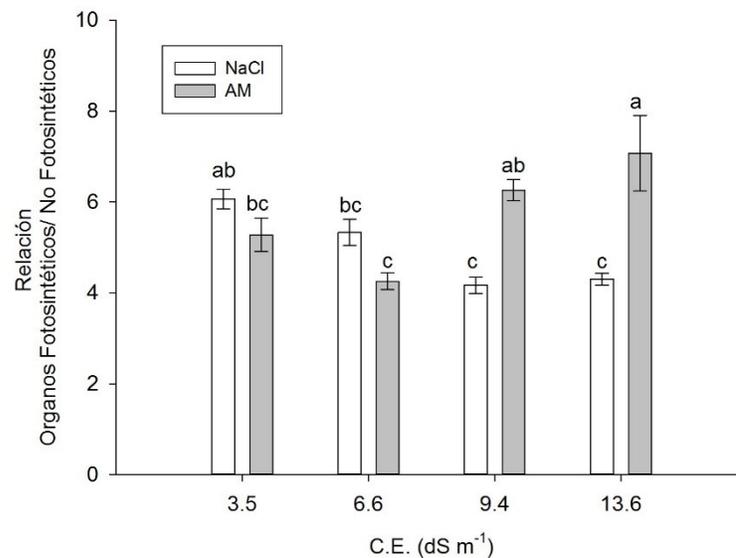
La relación V/R (Fig. 11) indica que los tratamientos de  $6.6 \text{ dSm}^{-1}$  para ambas fuentes salinas disminuyeron un 16% respecto a sus controles, mientras que el tratamiento de  $9.4 \text{ dS m}^{-1}$  con AM incrementó esta relación en 18 %. El tratamiento de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  fue el que presentó una disminución del 22 % comparado con el grupo control.



**Figura 11.** Relación vástago/raíz en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ )

### 7.3.4. Relación Órganos Fotosintéticos/No Fotosintéticos

En la relación de órganos fotosintéticos/ no fotosintéticos (F/NF) como se muestra en la figura 12, los tratamientos de AM a 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> incrementaron 18 y 34% con respecto a su grupo control, mientras que los tratamientos de 6.6 dS m<sup>-1</sup> con AM, 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl disminuyeron un 19, 31 y 34% respectivamente. Se muestra un efecto contrario por fuente de sal conforme al aumento de la C.E.



**Figura 12.** Relación órganos fotosintéticos/ no fotosintéticos en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico de raíz flotante con gradientes de salinidad y dos fuentes de la sal (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 6 plantas muestreadas (n=6). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

#### 7.4 Efecto de los tratamientos salinos en parámetros fisiológicos de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

En la tabla IV se muestra que en variables existieron diferencias significativas estadísticas para el factor de C.E. en Fluorescencia de clorofilas (SPAD)  $F_{3, 24} = 30.96$ ,  $p = 0.01419$ , conductividad estomática  $F_{3, 24} = 3.13$ ,  $p = 0.0439$  y dióxido de carbono intracelular  $F_{3, 24} = 3.44$ ,  $p = 0.0327$ , a su vez, la temperatura de la hoja mostró diferencias en el factor de F.S. ( $F_{3, 24} = 5.30$ ,  $p \leq 0.03032$ ). La tasa fotosintética y la tasa de transpiración no mostraron diferencias para ninguno de los factores analizados.

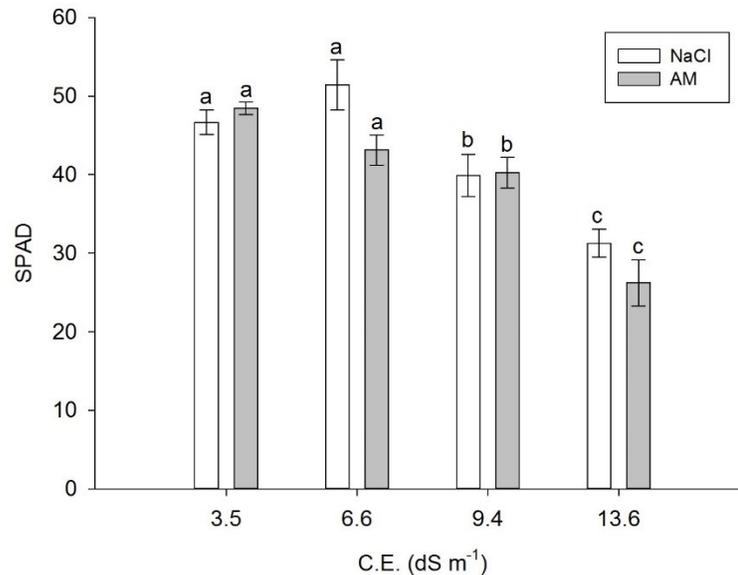
**Tabla VII.** Resumen del análisis de varianza para variables fisiológicas de plantas de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante.

Factor	SPAD	A ( $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$g_s$ ( $\text{molH}_2\text{Om}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$C_i$ ( $\mu\text{molCO}_2\text{mol}^{-1}$ )	E ( $\text{mmolH}_2\text{Om}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
FS						*
CE	*		*	*		
FS*CE						

FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ ). A= Tasa Fotosintética,  $g_s$ = Conductividad Estomática,  $C_i$ =  $\text{CO}_2$  Intracelular, E= Tasa de transpiración, T= Temperatura de la Hoja.

### 7.4.1 Fluorescencia de clorofilas (SPAD)

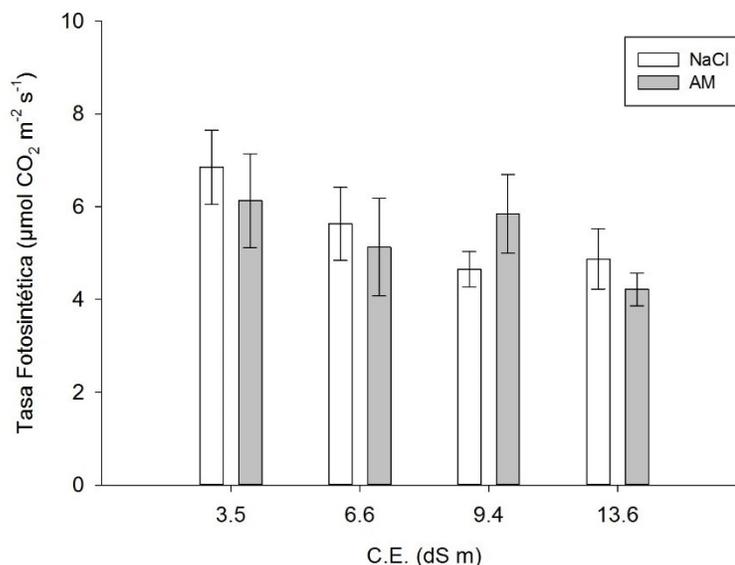
Los resultados de la fluorescencia de clorofilas en unidades SPAD (Fig. 13) indican que los tratamientos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> disminuyeron significativamente en comparación con sus controles en 15 y 40% respectivamente. También se observa que el tratamiento de 6.6 dS m<sup>-1</sup> no mostró diferencias con el grupo control, incluso el tratamiento de este nivel con NaCl aumentó un 10% respecto a su control. No se observó influencia de la F.S.



**Figura 13.** Relación de la fluorescencia de clorofilas por unidades SPAD en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.4.2 Tasa fotosintética

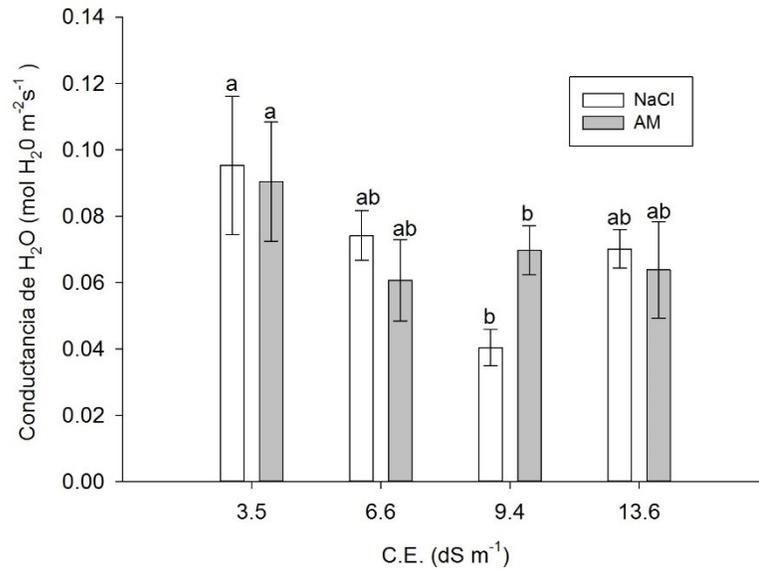
La tabla V muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas para esta variable, pero en la figura 14 se puede apreciar una tendencia a disminuir conforme la C.E. aumenta sin notarse un efecto claro por la fuente salina.



**Figura 14.** Tasa fotosintética en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.4.3 Conductividad estomática

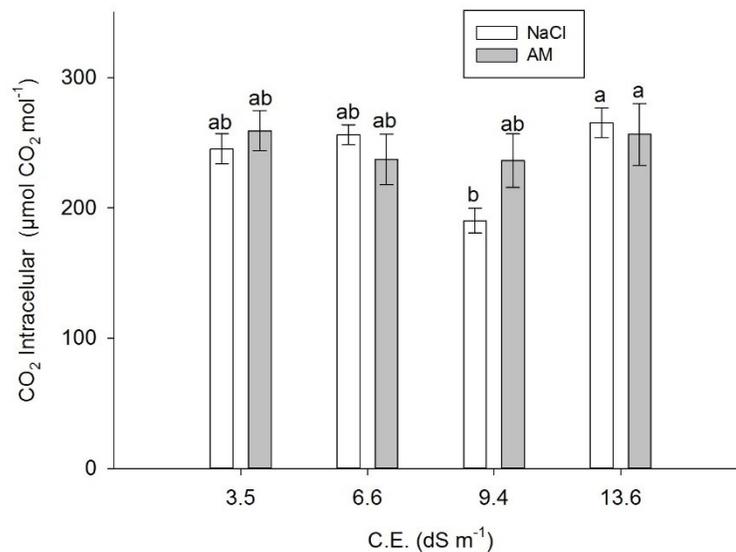
La conductividad estomática (Fig. 15) se observa que los tratamientos de 9.4 dS m<sup>-1</sup> con NaCl y AM decrecieron en 57 y 22 % respecto a sus controles. A su vez los tratamientos de 3.6 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> para ambas fuentes salinas se mantuvieron en el mismo grupo después de la prueba Tuckey a 0.05. No se nota un efecto por F.S.



**Figura 15.** Conductividad estomática en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

#### 7.4.4 CO<sub>2</sub> intracelular

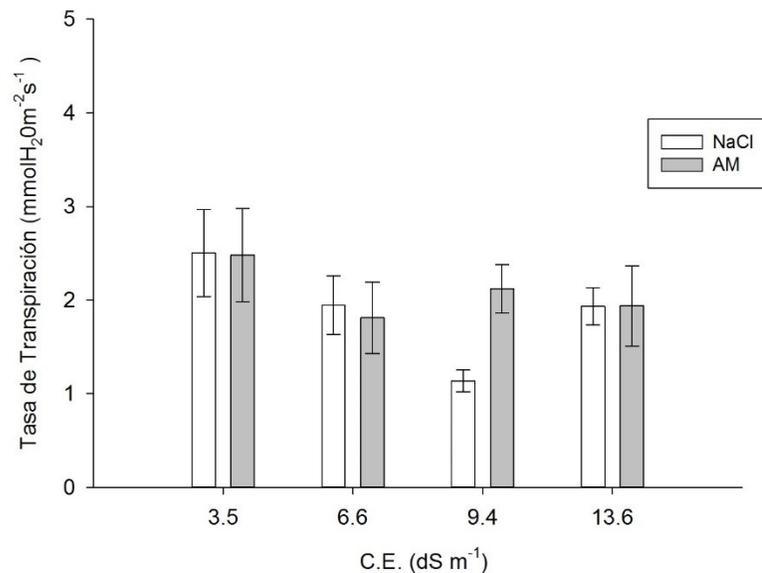
Para la concentración de dióxido de carbono intracelular (Fig. 16) podemos encontrar que los tratamientos de 13.6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl y AM presentaron un promedio de 265 y 256 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> mientras que el tratamiento de 9.4 dSm<sup>-1</sup> con NaCl presentó una disminución del 22 % comparado con su grupo control. No se observa alguna tendencia respecto a la F.S.



**Figura 16.** Concentración de dióxido de carbono intracelular en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

#### 7.4.5 Tasa de transpiración

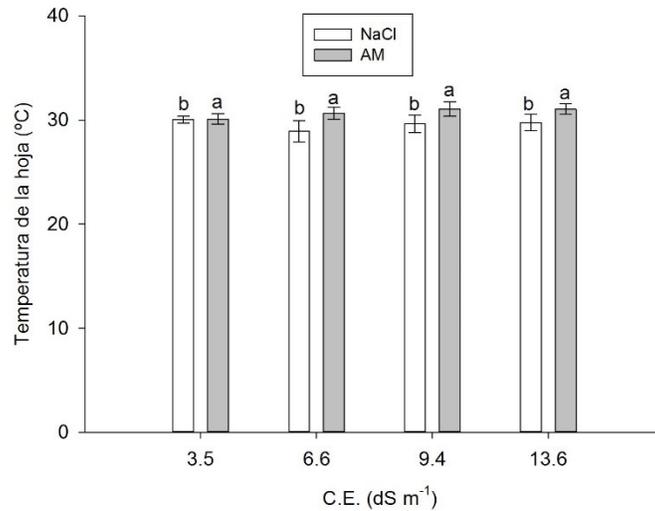
La tasa de transpiración ( $E$ ) no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, sin embargo, en la figura 17 podemos distinguir que los tratamientos de NaCl y AM a  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  presentaron una disminución respecto a su control del 22.2 y 26.9 %, similar al decremento que sufrieron los tratamientos de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  con 22.7 y 21.9%. No es posible distinguir alguna tendencia por fuente salina.



**Figura 17.** Tasa de transpiración en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas ( $n=4$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

#### 7.4.6 Temperatura de la hoja

En la figura 18 se puede observar que hay un efecto por la fuente salina sobre la temperatura de la hoja, presentando mayor temperatura los tratamientos con AM. No se presenta una tendencia para la C.E.



**Figura 18.** Temperatura de la hoja en plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 4 plantas muestreadas (n=4). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.5 Efecto del estrés salino en el contenido mineral de tejido foliar de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

Considerando solo el factor de F.S.\*C.E. (Tabla VIII) observamos diferencias estadísticas significativas para sodio ( $\text{Na}^+$ )  $F_{3,24}=73.83$ ,  $p=0.048$ , Potasio ( $\text{K}^+$ )  $F_{3,24}=8.95$ ,  $p=0.00102$ , Magnesio ( $\text{Mg}^+$ )  $F_{3,24}=,p\leq 0.00001$  y Calcio ( $\text{Ca}^+$ )  $F_{3,24}=4.48$ ,  $p=0.01082$ ; para la variable de Hierro ( $\text{Fe}^+$ ) se encontraron diferencias en la F.S. ( $F_{3,24}=47.99$ ,  $p\leq 0.00001$ ). Mientras que relación de  $\text{Na}^+$  con  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  mostraron diferencias para los tres factores.

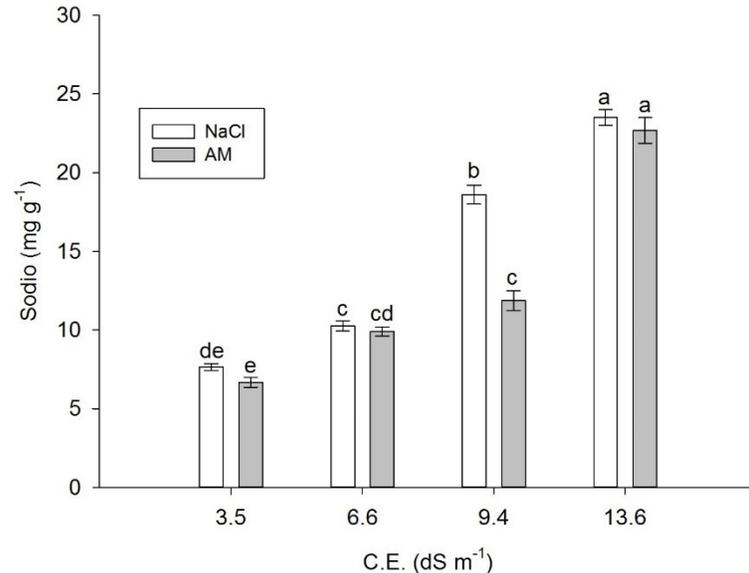
**Tabla VIII.** Resumen del análisis de varianza para el contenido mineral en tejido foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo estrés salino en hidroponia.

Factor	$\text{Na}^+$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$\text{K}^+$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$\text{Mg}^+$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$\text{Ca}^+$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$\text{Fe}^+$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	Na/K	Na/Ca	Na/Mg
F.S.	*		*	*	*	*	*	*
C.E.	*		*	*		*	*	*
F.S.*C.E.	*	*	*	*		*	*	*

S: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan el nivel de significancia (\*:  $p < 0.05$ ).

### 7.5.1 Sodio

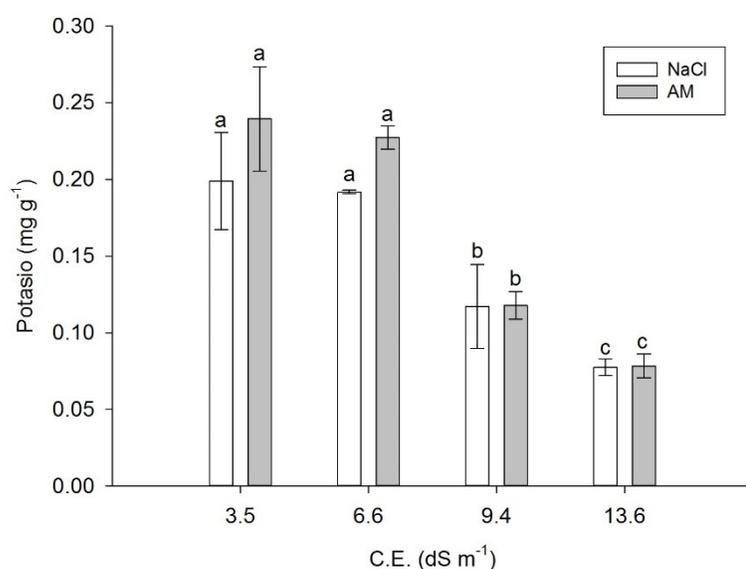
El contenido de sodio en tejido foliar (Fig. 19) presenta un incremento conforme la C.E. aumenta, mostrando un aumento del 251 % y 196 % para los tratamientos de NaCl y AM a  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  al compararlos con sus controles, los cuales presentaron  $6.68$  y  $9.88 \text{ mg g}^{-1}$  se distingue una tendencia a presentar mayor contenido en las fuentes de NaCl que de AM.



**Figura 19.** Contenido de sodio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas ( $n=3$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.5.2 Potasio

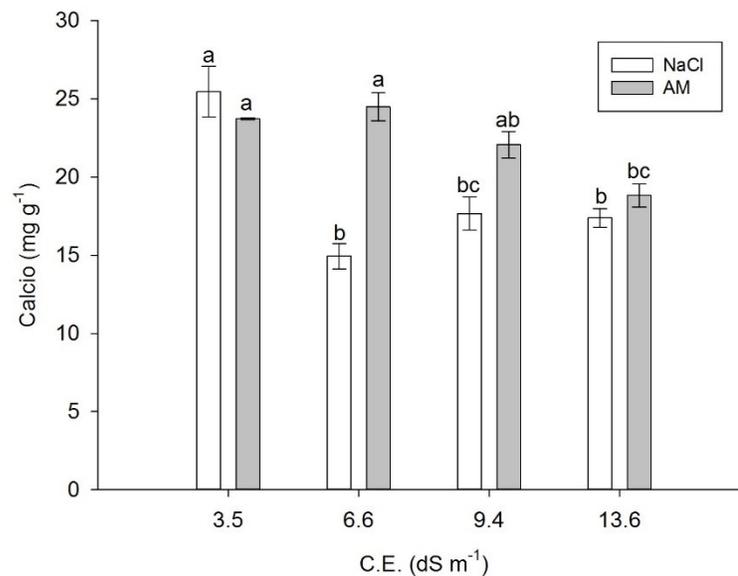
Para el contenido de potasio en la lámina foliar encontramos un decremento conforme la C.E. aumenta, se puede observar en la figura 20 que no existen diferencias entre medias para los tratamientos de 6.6 dS m<sup>-1</sup> respecto a los controles, mientras que los tratamientos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> disminuyeron un 50 y 67% respectivamente.



**Figura 20.** Contenido de potasio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.5.3 Calcio

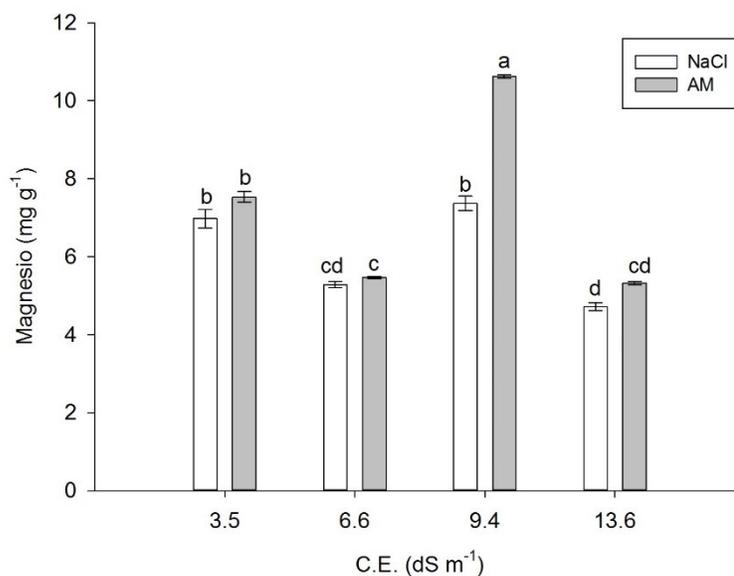
Para el contenido de calcio en la lámina foliar (Fig. 21) se observa una tendencia a disminuir respecto a sus controles conforme la C.E. aumenta para los tratamientos de AM, mientras que los tratamientos con NaCl muestran una menor acumulación de este catión siendo el más afectado el tratamiento de  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  que presentó un decremento del 41%. Para esta misma C.E. con AM existe un incremento del 3%.



**Figura 21.** Contenido de calcio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas ( $n=3$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.5.4 Magnesio

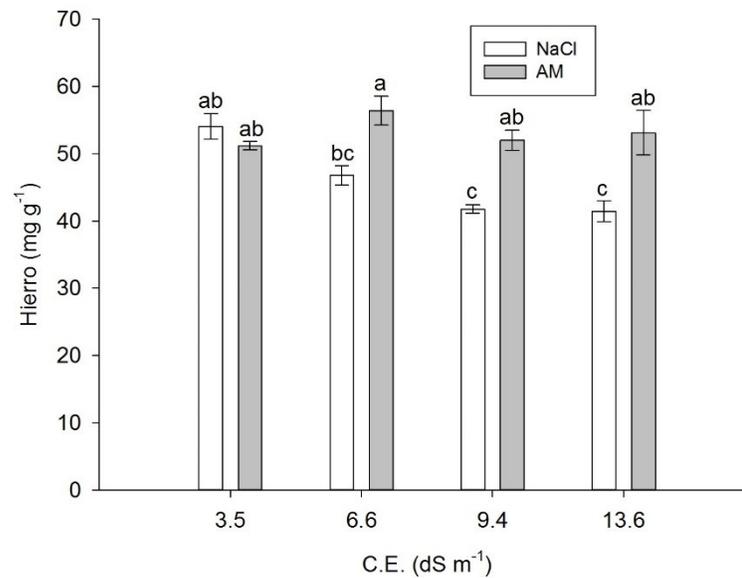
En la figura 22 correspondiente al contenido de magnesio en hojas de chile habanero (*C. chinense*) se observa que el tratamiento de 9.4 dS m<sup>-1</sup> mostró un incremento del 41% respecto a su control, el cual presentó una media de 7.53 mg g<sup>-1</sup>. Para los tratamientos de 6.6 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl y AM, presentaron un decremento de esta variable del 24 y 27%, y del 32 y 29% respectivamente comparándolos con su grupo control.



**Figura 22.** Contenido de magnesio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.5.5 Hierro

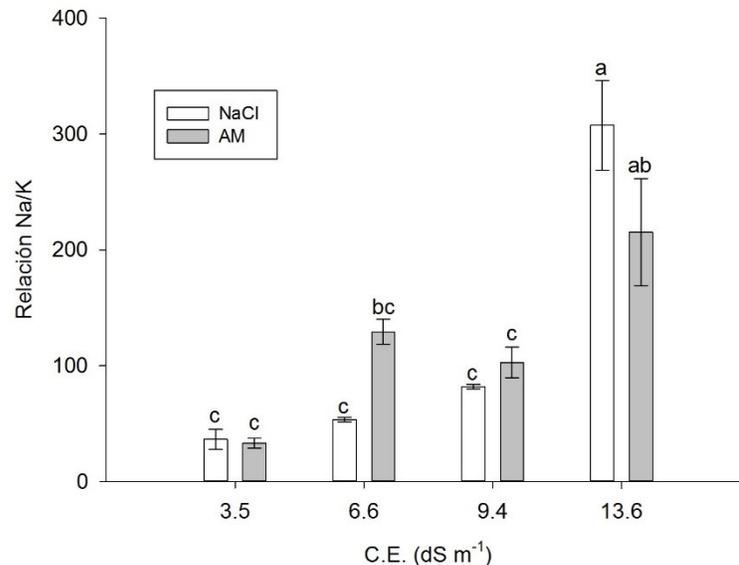
Para el contenido de hierro en lámina foliar (Fig. 23) se encuentra una tendencia por la fuente salina, los tratamientos de NaCl a 6.6, 9.4 y 13.6 dSm<sup>-1</sup> disminuyeron en 13, 22 y 23% respecto a su control, mientras que los tratamientos con AM para esas conductividades eléctricas mostraron un incremento de 10, 1.6 y 3% respectivamente. El grupo con las medias más bajas lo conformaron los tratamientos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup>.



**Figura 23.** Contenido de hierro en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas (n=3). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.5.6 Relación $\text{Na}^+/\text{K}^+$

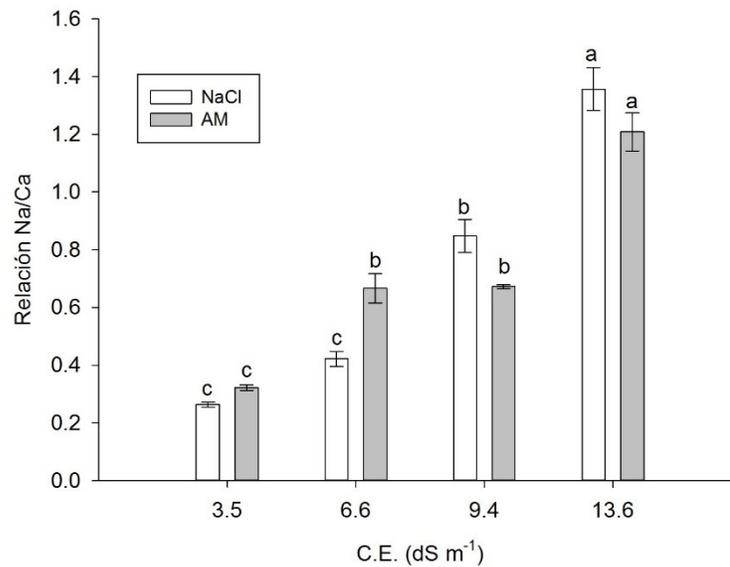
Para la relación de los cationes sodio y potasio (Fig. 24) se encuentra una tendencia de incrementar conforme la C.E. aumenta. Los tratamientos de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  con NaCl y AM presentaron un aumento del 745 y 548 % respecto a sus controles. Los tratamientos de NaCl de  $6.6$  y  $9.4 \text{ dS m}^{-1}$  presentaron un menor incremento, 47 y 125% mientras que sus equivalencias en los tratamientos de AM presentaron un incremento del 200% para esta variable.



**Figura 24.** Relación sodio/potasio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas ( $n=3$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.5.7 Relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^+$

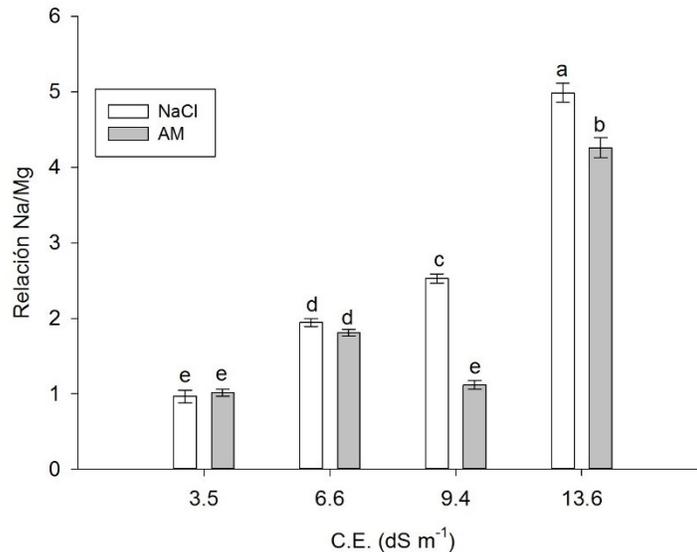
Para la relación de los cationes, sodio y calcio se muestra en la figura 25, una tendencia a aumentar conforme la C.E. incrementa, presentando un incremento del 414% y 274% para los tratamientos de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  con NaCl y Am respectivamente comparados con sus controles. A su vez se aprecia una tendencia en esta relación a aumentar para la F.S. de NaCl en los tratamientos de  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$ , mientras que en el tratamiento de  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  aumenta esta relación para el tratamiento de AM un 106%.



**Figura 25.** Relación del contenido de sodio/calcio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas ( $n=3$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.5.8 Relación $\text{Na}^+/\text{Mg}^+$

Los resultados de la relación sodio/magnesio (Fig. 24) nos indican que hay un incremento para esta variable conforme la C.E. aumenta, del 417% para el tratamiento de NaCl a  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  y del 319% para este nivel de C.E. con AM. En el tratamiento de  $9.4 \text{ dS m}^{-1}$  con AM, se observa un incremento del 9%, sin embargo se mantiene en el mismo grupo que los controles. Hay una influencia de la F.S. para esta variable, en la cual NaCl mostró mayores medias comparándolo con sus equivalencias de AM.



**Figura 26.** Relación del contenido de sodio/magnesio en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) en un sistema hidropónico con gradientes de salinidad y dos fuentes de la salinidad (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar). Los valores representan el promedio de 3 plantas muestreadas ( $n=3$ ). Las letras iguales no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.6 Efecto del estrés salino en las defensas antioxidantes enzimáticas en tejido foliar de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante.

Los resultados del análisis de varianza (Tabla IX) muestran que hay diferencias estadísticamente significativas para el factor C.E. en SOD  $F_{3,24} = 5.53$ ,  $p = 0.00493$ , POX  $F_{3,24} = 4.55$ ,  $p = 0.01153$  y la peroxidación de lípidos (TBARS)  $F_{3,24} = 3.39$ ,  $p = 0.03422$ . Mostrando que no hay influencia de la fuente salina o la interacción con este factor.

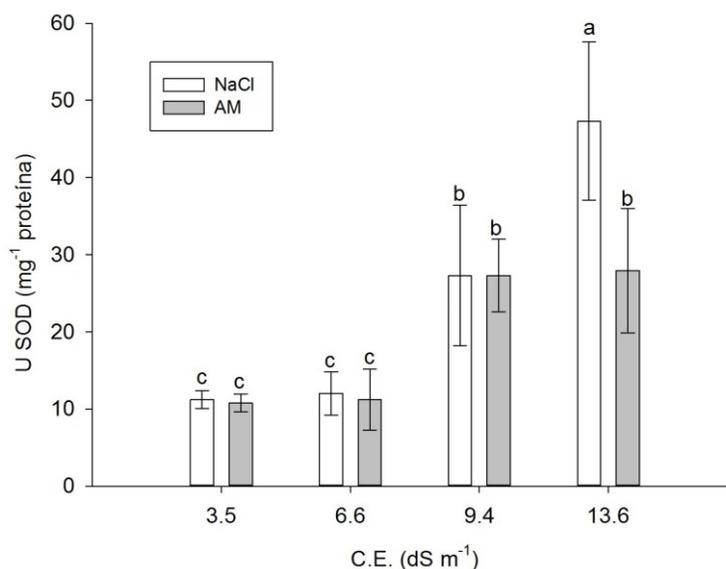
**Tabla IX.** Resumen del análisis de varianza para los indicadores de estrés oxidativo en tejido foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante

Factor	SOD	POX	TBARS
F.S.			
C.E.	*	*	*
F.S.*C.E.			

FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ )

### 7.6.1 Actividad de SOD en tejido foliar

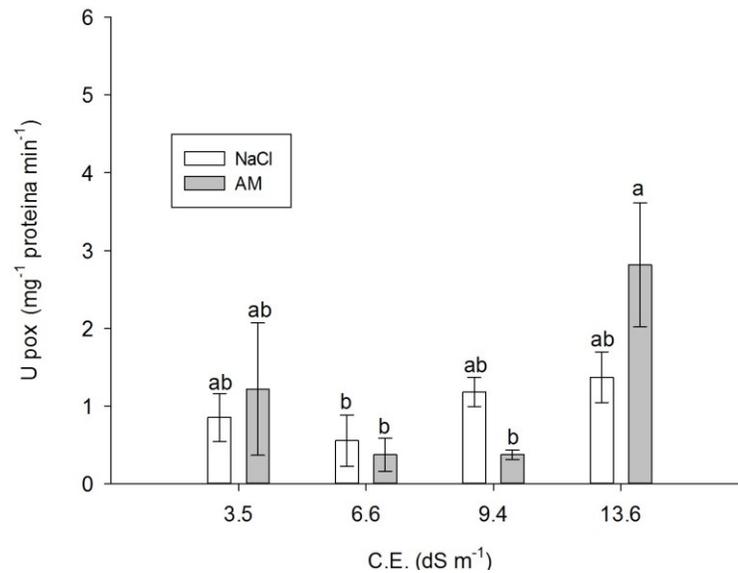
En la figura 27 se muestra la actividad de SOD, la cual tiende a aumentar conforme el nivel de C.E. aumenta, no se distinguen tendencias por la F.S. Los tratamientos de 6.6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl y AM mostraron un incremento del 7 y 4% respecto a su grupo control, mientras que los tratamientos de 6.6 dS m<sup>-1</sup> presentaron un incremento del 143 y 153%, respectivamente.



**Figura 27.** Actividad de SOD en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponía. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.6.2 Actividad de POX en tejido foliar

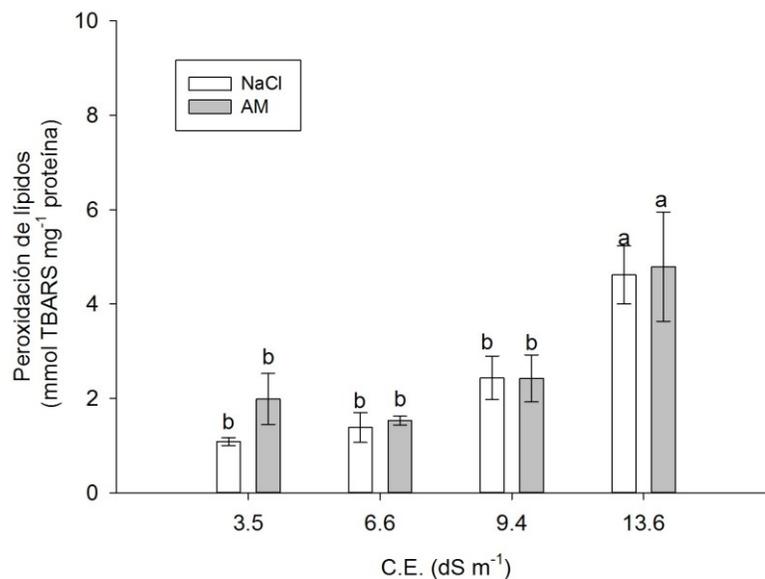
En la figura 28 se observa que la actividad de POX no mostró diferencias significativas con el grupo control para los tratamientos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup>, mientras que la actividad de esta enzima aumentó un 131% para el tratamiento de 13.6 dS m<sup>-1</sup> con AM. Los tratamientos de NaCl a 6.6 y 9.4 dSm<sup>-1</sup> incrementaron en 38 y 60 % comparados con su grupo control (3.5 dSm<sup>-1</sup>) ( $p=0.01153$ ).



**Figura 28.** Actividad de POX en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponía. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p<0.05$ ).

### 7.6.3 Peroxidación de lípidos

Considerando sólo el efecto de la C.E. para la peroxidación de lípidos, en la figura 29 se observa que no existieron diferencias para los tratamientos de 6.6, 9.4 dSm<sup>-1</sup> comparado con los controles, ni algún efecto por la fuente salina. A su vez se aprecia que los tratamientos de NaCl y AM a 13.6 dS m<sup>-1</sup> incrementaron en 324 y 140%, respectivamente.



**Figura 29.** Peroxidación de lípidos en lámina foliar de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponía. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

### 7.7 Efecto del estrés salino en variables bioquímicas antioxidantes en pericarpio de fruto de chile habanero (*C. chinense*) cv. Chichen Itzá bajo cultivo hidropónico en sistema de raíz flotante

En la tabla VII se muestra que hay diferencias estadísticamente significativas para la concentración de capsaicina ( $F_{3,40} = 21.05$ ,  $p \leq 0.00001$ ) y dihidrocapsaicina ( $F_{3,40} = 18.0$ ,  $p \leq 0.00001$ ) considerando solo los resultados de la interacción de la F.S.\*C.E.

**Tabla X.** Resumen del análisis de varianza para variables bioquímicas antioxidantes no enzimáticos en tejido de fruto de chile habanero (*C. chinense*) bajo estrés salino en un sistema hidropónico de raíz flotante

Factor	Capsaicina	Dihidrocapsaicina
F.S.	*	*
C.E.	*	*
F.S.*C.E.	*	*

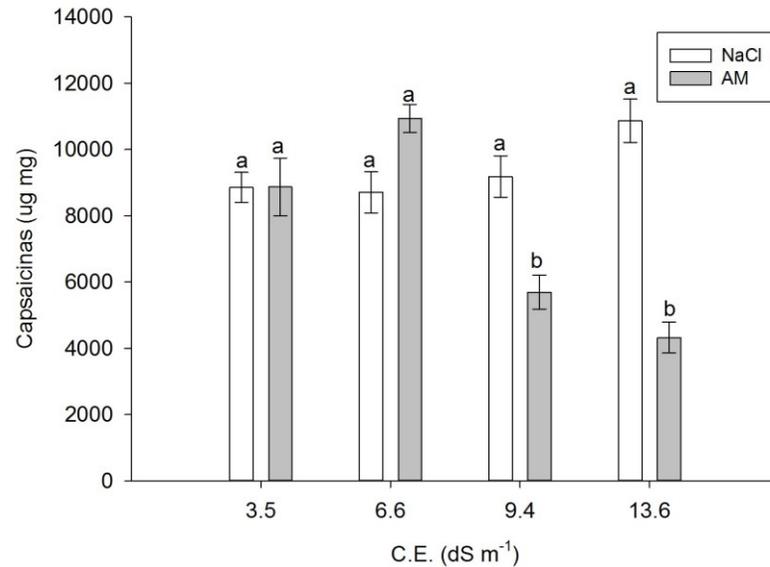
FS: fuente salina, C.E.: conductividad eléctrica. Los asteriscos representan diferencias significativas (\*:  $p < 0.05$ )

#### 7.7.1 Contenido de capsaicina en frutos

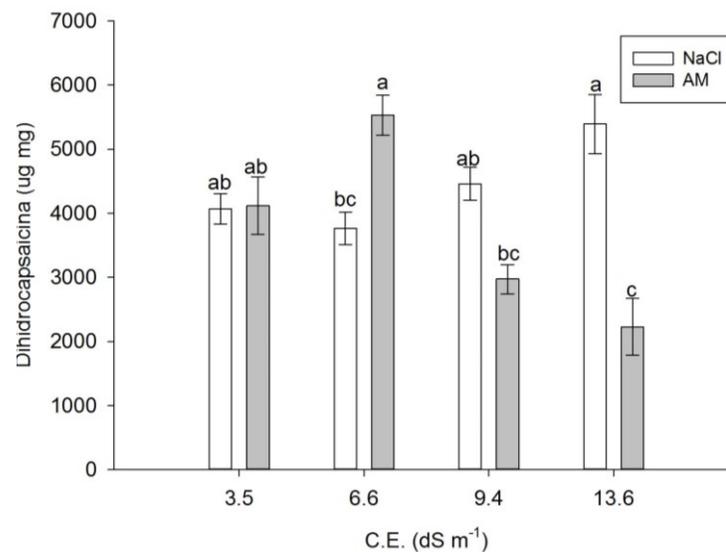
El contenido de capsaicina (Fig.30) muestra diferencias estadísticamente significativas para ambas fuentes salinas. Para AM a  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  se encuentra un incremento del 23%, aunque para los tratamientos de 9.4 y 13.6 existe una disminución del 35 y 52% respectivamente. Para los tratamientos de NaCl a 9.4 y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  hay un incremento del 3 y 22% respecto a su grupo control.

#### 7.7.2 Contenido de dihidrocapsaicina en frutos

La concentración de dihidrocapsaicina (Fig. 31) muestra un incremento en los tratamientos de NaCl a 9.4 y  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  del 9 y 32% respectivamente. Mientras que el tratamiento de AM a  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  presenta un incremento del 34%, sin embargo, para esta F.S. a 9.4 y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  se reduce un 27 y 45.9 %.



**Figura 30.** Contenido de capsaicina en frutos de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en un sistema hidropónico de raíz flotante. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).



**Figura 31.** Contenido de dihidrocapsaicina en frutos de plantas de chile habanero (*C. chinense*) bajo gradientes de salinidad, con dos fuentes salinas (NaCl= Cloruro de sodio; AM= diluciones de agua de mar) en hidroponia. Los valores representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n=4). Las letras iguales representan que no son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Efecto del estrés salino en variables morfológicas y parámetros de crecimiento

En la tabla IV se observa que las diferencias en las variables morfológicas se deben principalmente al nivel de salinidad de la solución (expresada en términos de conductividad eléctrica) sin importar la fuente de la salinidad, lo cual puede ser corroborado en las figuras 1 y 2. Se ha encontrado que la reducción en biomasa y el crecimiento dependen de la especie y del periodo de exposición a las sales (Munns, 2002). Munns y Tester (2008) señalan que la capacidad de las plantas para absorber agua se ve afectada por la concentración de sales en el medio radicular, lo que provoca un déficit hídrico, un desbalance nutricional y alteraciones en los procesos enzimáticos; que conllevan a la reducción del crecimiento.

Arrowsmith (2012) encontró que en Chile Jalapeño (*C. annuum*) que fue sometido a diferentes gradientes de salinidad inducida por NaCl, la producción biomasa seca disminuyó. Valera y García (2014) para pimentón y Casierra-Posada y García (2005) en tres cultivares de fresa (*Fragaria sp.*) mencionan una disminución del área foliar y la producción de biomasa seca conforme la concentración de NaCl aumenta.

Hunt (1990) define como crecimiento al conjunto de los cambios irreversibles en el tiempo principalmente en la talla, la forma y, ocasionalmente, en número. En la figura 9 se observa que la tasa de crecimiento (T.C.) disminuye conforme la salinidad en la solución aumenta, esto concuerda con lo descrito por Chartzoulakis y Klapaki (2000) para dos híbridos de *C. annuum* (Sonar y Lamuyo) sometidos a tratamientos similares (1.2, 2.4, 4.1, 7.1, 12.6 y 17.8 dS m<sup>-1</sup>) en sus resultados reportan una disminución del área foliar y la biomasa seca para ambos cultivares, donde los tratamientos más afectados resultaron ser los de mayor salinidad con 4.1 dS m<sup>-1</sup>. Ziaf *et al.* (2009) encontraron diferencias en la relación vástago/ raíz (V/R) en 3 cultivares de Chile picoso (Maha, Tata Puri, Hot Queen) creciendo en distintos gradientes de salinidad (2, 4, 6 y 8 dSm<sup>-1</sup>) encontrando que en el tratamiento de 4 dS m<sup>-1</sup> aumento considerablemente en comparación con el grupo control; en la figura 11 se puede

observar este comportamiento al no existir diferencias entre el grupo control y el primer tratamiento salino ( $6.6 \text{ dS m}^{-1}$ ) esto puede deberse al aumento en la producción de raíz como estrategia de la planta para seguir absorbiendo nutrientes, aunque la producción de hoja y tallo se vea afectada. Dias de Azevedo-Neto *et al.* (2004) señalan que la tasa de asimilación neta (T.A.N.) se ve inhibida por la salinidad para distintos genotipos de maíz bajo estrés salino, en la figura 10 se aprecia este fenómeno, aunque para los tratamientos con agua de mar a  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  se aprecia una mayor tasa de asimilación neta, similar a lo reportado por Izzo *et al.* (2008) para un cultivo de girasoles irrigado con diluciones de agua de mar; lo cual puede indicar que la composición de distintas sales disueltas en el agua de mar puede tener un efecto directo en el crecimiento. Sin embargo, Niu *et al.* (2010) y Baath *et al.* (2016) señalan que los efectos en el crecimiento de las plantas de distintos cultivares del género *Capsicum* se deben, en gran medida, al tiempo de exposición a las sales.

## **8.2 Efecto del estrés salino en producción y morfometría de frutos**

En la tabla V se muestran las diferencias en las variables de morfometría y rendimiento de chile habanero, donde se observan efectos atribuidos a los niveles de salinidad (en términos de conductividad eléctrica). En la figura 3 el número total de frutos, muestra una disminución conforme aumenta el nivel de salinidad estos resultados son similares a los reportados por Baath *et al.* (2016), donde distintos cultivares de *C. annuum* (Early Jalapeño, Golden treasure, NuMex Sweet, NuMex Joe Parker y Santa Fe Grande) y dos cultivares de *C. chinense* (Habanero y Pimienta de Chiera) fueron sometidos a dos gradientes de salinidad ( $2.5$  y  $4.1 \text{ dS m}^{-1}$ ) por NaCl en la solución nutritiva, se encontró que los cultivares de Habanero presentaron mayor sensibilidad a la salinidad. Como consecuencia del estrés salino, se han reportado cambios en la calidad de frutos evaluando la morfometría (diámetro ecuatorial, longitud, grosor de pulpa) y otros indicadores bioquímicos (vitaminas A, C y E, azúcares, color, total de sólidos disueltos). En contraste con lo descrito por Navarro *et al.* (2015); quienes encontraron una disminución en el grosor de pulpa

conforme el nivel de salinidad aumenta para el cultivar “Orlando” de *C. annuum*, en la figura 8 se aprecia un aumento en el grosor de pulpa para los tratamientos con agua de mar a 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup>, semejantes al control, estas variaciones pueden deberse a diferencias en las metodologías utilizadas. Qiu *et al.* (2017) describe resultados similares a los encontrados en la presente investigación respecto a los indicadores de longitud (Fig. 6) y diámetro de frutos (Fig. 7), ellos describen una disminución en estos indicadores por encima de los 1.6 y 2.7 dS m<sup>-1</sup> respectivamente lo cual coincide con los resultados descritos por Casierra-Posada *et al.* (2006) para cultivares de fresa.

### **8.3 Efecto del estrés salino en variables fisiológicas**

Los resultados de la tabla 7 señalan que las diferencias estadísticamente significativas en las variables fisiológicas se deben principalmente al efecto del aumento de la conductividad eléctrica, esto concuerda con lo expuesto por Sudhir y Murthy (2004), quienes en su revisión señalan que el estrés salino afecta la fisiología a nivel de la planta completa y a nivel celular debido al estrés osmótico y al estrés iónico. La acumulación de sales en la hoja conlleva a la deshidratación y pérdida de turgencia lo que afecta directamente el proceso de fotosíntesis (Buchanan, 2015) el estrés salino puede causar fallas en la apertura estomática (Fig.15), lo que reduce la disponibilidad de CO<sub>2</sub> en las hojas (Fig. 16) e inhibe la fijación de carbono (Meloni *et al.*, 2003; Munns y Tester, 2008).

En la figura 13 se observa una disminución de clorofilas (SPAD) para los tratamientos superiores a 6.6 dS m<sup>-1</sup>, esto concuerda con lo reportado por diversos autores (Atlassi-Pak *et al.*, 2009; Jinn-Chin, 2012; Murillo-Amador *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2013) que mencionan que el aumento de salinidad provoca una disminución en la producción de clorofilas en especies glicófitas. Para el tratamiento de 6.6 dS m<sup>-1</sup> se encontró que existió un incremento del 10% respecto al grupo control, lo que concuerda lo reportado por Karlidag *et al.* (2009) y Yildirim *et al.* (2009), para cultivos de fresa bajo estrés salino a 35 mM y 40 mM de Na respectivamente, atribuyen esto

a un posible ajuste osmótico en moderada salinidad como estrategia de las plantas para superar los efectos adversos del NaCl. Velicevici *et al.*, reporta resultados similares de cinco genotipos de *C. annuum* (Dualvike, Hlidalli, Citrina, Montana, Karola) ante el estrés salino por cloruro de sodio ( $10.51 \text{ gL}^{-1}$  y  $14.02 \text{ gL}^{-1}$ ), ellos indican que la respuesta del contenido de clorofilas al estrés salino depende de las diferencias de la tolerancia a la salinidad entre las variedades de chiles.

Sin embargo, no se encontraron diferencias para la tasa de fotosíntesis (Fig. 14) y la tasa de transpiración (Fig. 17); probablemente por el efecto del sistema de raíz flotante o como indica Wu (2018) en su revisión, bajas y medianas concentraciones de sodio pueden ser benéficas e incluso estimular el crecimiento en distintas plantas, este efecto puede ser por el reemplazo de  $\text{K}^+$  por  $\text{Na}^+$  en la vacuola, haciendo que el potasio se encuentra mayormente disponible en el citosol.

#### **8.4 Efecto del estrés salino en el contenido mineral foliar**

En la tabla VIII se observa que las diferencias estadísticamente significativas en la concentración de iones en tejido foliar se deben principalmente a la interacción de la fuente salina (NaCl y agua de mar) con la concentración salina en términos de conductividad eléctrica.

Los resultados de la figura 19 donde se comparan las concentraciones de minerales en el tejido foliar por efecto de las fuentes salinas, sugieren que los niveles de sodio en el tejido foliar fueron aumentando conforme se incrementó la concentración salina, presentando una diferencia notable en los tratamientos de  $9.4$  y  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  para la fuente de cloruro de sodio, esto puede deberse a que los tratamientos de agua de mar, presentan menos sodio disuelto en la solución nutritiva en comparación con los tratamientos de NaCl. Al finalizar el experimento se observaron síntomas de clorosis en estos dos niveles de conductividad, sin embargo, para los tratamientos de  $3.5$  (control) y  $6.6 \text{ ds m}^{-1}$  no se observó este fenómeno, pudiendo indicar que no alcanzaron niveles de dañinos para manifestar una toxicidad iónica. Respecto a la

clorosis manifestada, puede deberse a la absorción de  $\text{Na}^+$  desplazando algunos cationes esenciales como el  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  y  $\text{K}^+$  que pudieran causar antagonismo y competir por ser absorbidos por la planta (Marschner, 2012).

Estos resultados (Fig. 19) concuerdan con lo descrito por Assaha *et al.* (2013) en dos especies de solanáceas, arándano y berenjena, las cuales fueron sometidas a 0, 50 y 150 mM de NaCl como agente estresante, en esta investigación la acumulación de sodio en el tejido foliar incrementó un 65% para el tratamiento con 150 mM de NaCl en la berenjena comparado con sus controles, mientras que el arándano mostró una menor acumulación, 36% comparado con el grupo control; en donde atribuyen esta diferencia a que la berenjena no posee habilidad para controlar la absorción y translocación de sodio al vástago de la planta, mientras que el arándano puede evitar la acumulación de sodio en las hojas por varios mecanismos regulatorios, estos pueden ser la exclusión y la compartimentación de del exceso de sodio (Munns, 2002).

Navarro *et al.* (2003) señalan que en *C. annuum* CV "Orlando" bajo dos concentraciones de estrés salino ( $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) en distintos gradientes de salinidad (2,3,4,6,8 dS  $\text{m}^{-1}$ ) la acumulación de  $\text{Na}^+$  en el tejido foliar fue incrementando conforme el gradiente de salinidad, aunque en todos los tratamientos obtuvieron una mayor concentración de  $\text{Cl}^-$ , a lo que atribuyen que este fenómeno puede deberse a que las plantas de chile pueden lograr un control en la recirculación de sodio, previniendo que este alcance los tejidos fotosintéticos como estrategia ante el estrés salino. Bojórquez-Quintal *et al.* (2014) en su estudio con dos variedades de habanero (Chichen- Itzá y Rex) a 150 mM de NaCl, señalan que, al igual que esta investigación (Fig. 19) la acumulación de sodio en el tejido foliar aumenta en los tratamientos de alta salinidad, sin embargo indican que estas dos variedades presentan las mismas concentraciones de sodio en las hojas, pero difieren en la concentración que presentan en las raíces; probablemente por una cuestión de ajuste osmótico ya que existieron diferencias en la acumulación de prolina en la

variedad Rex, indicando que la variedad Chichen- Itzá puede ser sensitiva al estrés salino.

La concentración de potasio en el tejido foliar mostró diferencias significativas (Tabla VIII) respecto al factor de concentración de sales expresados en términos de conductividad eléctrica. Los resultados (Fig. 20) muestran una disminución de la concentración de este ion conforme al gradiente salino, esto concuerda con varios estudios en una gran variedad de cultivos que demuestran que la concentración de  $K^+$ , expresado en términos de biomasa seca básicamente, decae conforme la salinidad por sodio aumenta (Azevedo-Neto *et al.*, 2004; Grattan y Grieve, 1999; Izzo *et al.*, 2008). Chartzoulakis y Klapaki (2000) indican que el contenido de  $K^+$  en híbridos de chile (Sonar y Lamuyo) es mayor en el tejido foliar que en las raíces, indicando que no hay diferencias en la concentración de  $K^+$  en las hojas entre las dos variedades conforme la conductividad eléctrica aumenta (0 a 150mM NaCl), mientras que las raíces si mostraron una tendencia a disminuir la concentración de  $K^+$  conforme incrementa la salinidad. En contraste con estos resultados, Niu *et al.* (2010) encuentran diferencias en las concentraciones de  $K^+$  en 8 cultivares de chiles, las variedades "NM Joe E. Parker", "NM Sweet", "NMCA 10652" y "Santa Fe Grande" no mostraron diferencias en la acumulación de  $K^+$  en tejido foliar, sin embargo "Early Jalapeño", "Golden Treasure", "Habanero" y "Pimienta de Chiera" presentaron una disminución para los tratamientos salinos (2.5 y 4.1 dS  $m^{-1}$ ). Al- Karaki *et al.* (2009) cuantificó la respuesta de tres chiles "dulces" a distintos niveles de salinidad, ellos encontraron que la variedad "Flaviano"; que era más tolerante a la salinidad, que "Sonar" y "Azano", había acumulado mayor cantidad de  $K^+$  en hojas y frutos en comparación con los otros cultivares. Estos estudios podrían indicar que los genotipos que presentan la habilidad para excluir el  $Na^+$  y/o  $Cl^-$  son generalmente más tolerantes a la salinidad, Bojorquez-Quintal *et al.* (2018) señalan que mantener niveles altos de  $K^+$  en las raíces es un mecanismo de defensa contra el estrés salino de *C. chinense* aunque en este estudio no se determinó el contenido mineral en las raíces.

La concentración de calcio en el tejido foliar (Fig. 21) presentó una clara influencia por la fuente salina, siendo mayor en los tratamientos con agua de mar, donde el tratamiento de  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  mantuvo los mismos valores respecto a su control, esto puede deberse a que dicha fuente salina presenta una fuente extra de este catión. Resultados similares son reportados por Niu *et al.* (2010) donde la concentración de calcio disminuyó para los tratamientos de NaCl ( $2.5$  y  $4.1 \text{ dS m}^{-1}$ ) en el cultivar Habanero mientras que los otros cultivares no presentaron diferencias en su concentración en el tejido foliar, en el cual señalan que esta variedad puede ser sensible a la salinidad. La concentración y absorción de calcio en chile, depende del estado de desarrollo del cultivo; Villa-Castorena *et al.* (2006) indican que en su estudio con el cultivar de chile Sandía, al inicio del crecimiento causaron una disminución de 12% en la Tasa de absorción de calcio, en las conductividades de  $1.3$  y  $3.5 \text{ dS m}^{-1}$ , pero al incrementar la salinidad de  $3.5$  a  $5.5 \text{ dS m}^{-1}$  no se apreciaron diferencias para la absorción de calcio.

En la figura 21 se muestran los resultados obtenidos para la concentración de magnesio en tejido foliar, se observa que en el tratamiento de  $9.6 \text{ dS m}^{-1}$  con agua de mar existe una mayor acumulación de este elemento incluso superando a los controles, esto puede deberse a la alta competitividad que tiene este catión con otros elementos como el calcio, el cual se ve afectado en los sitios de unión de la membrana plasmática de las raíces, presentando una mayor afinidad por el magnesio que por el calcio (Marschner, 2012). Altas concentraciones de calcio en el sustrato a menudo resultan en altas concentraciones de calcio en las hojas junto con una reducción de magnesio foliar (Grattan y Grieve, 1999). El magnesio juega un rol importante en la fotosíntesis, en la mayoría de las plantas 15-30% del magnesio total se encuentra en los cloroplastos (Maathuis y Podar, 2011; Marschner, 2012) donde este elemento se encarga de mantener el flujo constante de los protones al lumen de los tilacoides (Maathuis y Podar 2011) y como un cofactor de la enzima rubisco la cual interviene en la fijación del dióxido de carbono (Maathuis y Podar, 2011). Thu y Hideshi (2018) indican que la repartición de los macronutrientes en distintas partes

de plantas de arroz es importante para conocer la tolerancia al estrés salino; sus resultados indican que las variedades tolerantes presentaron un bajo contenido de magnesio en hojas y en tallos bajo condiciones de estrés salino, resultados similares (Fig. 21) son descritos por Assaha *et al.* (2013) en arándanos y berenjenas bajo estrés salino (0, 50 y 150 mM NaCl) donde la concentración de magnesio fue distinta para cada especie y la distribución en hoja, tallo y raíz; donde el arándano presentó mayor acumulación en las hojas para los tratamientos salinos, mientras que las berenjenas presentaron una mayor acumulación de magnesio en los tallos. Ramírez-Serrano *et al.* (2008) encontraron diferencias estadísticamente significativas para la concentración de magnesio en tejido de frutos de chile ancho (*C. annuum*) c.v. Caballero, reportando una disminución de este elemento en los tratamientos salinos (2.8, 4.0 dS m<sup>-1</sup> con NaCl y 2.8 y 4.0 dS m<sup>-1</sup> con diluciones de agua de mar) indicando que la disminución de magnesio, potasio y manganeso en el fruto confirman la presencia del estrés salino, el cual lo relacionan con la presencia de zonas necróticas en los frutos conocidas como “podredumbre apical o blossom end rot (BER, por sus siglas en inglés)”.

Los resultados obtenidos para la concentración de hierro en tejido foliar (Fig. 22) sugieren una influencia por la fuente salina, donde el agua de mar presentó una mayor concentración de este nutriente para todos los tratamientos salinos. El hierro juega un papel importante en el proceso de fotosíntesis y en la respiración, en donde una deficiencia de este nutriente está relacionada con la clorosis férrica (Jeong y Connolly, 2009; Marschner, 2012). Yosufi *et al.* (2007) quienes realizaron un experimento de deficiencia de hierro en cebada bajo estrés salino (100 mM NaCl) señalan que la salinidad afectó negativamente la absorción de este micronutriente disminuyendo su concentración en el tejido foliar, comportándose de manera similar al tratamiento con déficit de hierro, lo cual indica que la salinidad afecta la absorción de este elemento. Marschner (2011) señala que los estudios de la eficiencia de los nutrientes suele estar predominantemente enfocada en las mediciones del crecimiento de la raíz y de su fisiología, pero se realizan pocos estudios toman en

cuenta el papel de los microorganismos de la rizósfera, señalando que estos juegan un papel crucial en la absorción de los nutrientes y que en algunos casos pueden presentar una alta competitividad o ayudar a la absorción de las raíces ya que estos juegan un papel fundamental en la mineralización de los nutrientes. Complementando este concepto Gómez-Bellot *et al.* (2018) realizaron un estudio en plantas de laurel (*Viburnum trinus* L.) inoculados con bacterias y hongos nativos (*Acetobacter fabarum*, *Acitenobacter jhonsonii*, *Candida boidinii*, *Nocardiopsis alba*, *Penicillium chrysogenum* y *Azospirillum brasilense*) bajo un régimen de estrés salino ( $6 \text{ dS m}^{-1}$ ); señalan que el contenido de hierro en tejido foliar fue mayor en las plantas inoculadas que en las no inoculadas y que observaron un fenómeno opuesto con las plantas bajo estrés salino, donde la concentración de hierro fue menor en las plantas inoculadas que en las no inoculadas. En un estudio de durillo, bajo deficiencia de hierro y estrés salino (75 mM NaCl) Rabhi *et al.* (2007) señalan que las cantidades de hierro disminuyeron drásticamente, especialmente en el tratamiento con deficiencia de hierro y estrés salino. Los autores reportaron una reducción del 21% de la concentración de Fe en hojas, tallos y raíces y argumentaron que la eficiencia de la absorción de hierro decayó (Rabhi *et al.* 2007). Dado que el contenido de Fe fue menor en los órganos aéreos que en las raíces, Rabhi *et al.* (2007) atribuyeron este efecto de la salinidad por afectar el transporte de hierro desde las raíces al vástago de las plantas. Sin embargo, existen estudios en donde las concentraciones de este elemento se ven incrementadas bajo el estrés salino, un ejemplo de esto es un estudio de calabazas bajo estrés salino (0, 20, 40 y 80 mM NaCl) en condiciones hidropónicas (utilizando solución de Hoagland) en invernadero; donde Villora *et al.* (2000) encontraron que el contenido de hierro, zinc, magnesio y cloruros incrementaron significativamente en respuesta al estrés salino, encontrando las concentraciones más altas en el tratamiento de 80 mM NaCl. De hecho, las diferencias encontradas entre los distintos autores están relacionada directamente a los mecanismos de tolerancia a las sales, que varían entre especies y cultivares (Marschner, 2012; Munns y Tester, 2005).

La mayoría de los estudios sobre el hierro, están enfocados como un parámetro de la calidad de los frutos y granos por su importancia en la nutrición humana, puesto que una baja ingesta de este elemento, está relacionado con síntomas de malnutrición como la anemia (Briat, 2011).

Los resultados obtenidos (Figs. 23, 24 y 25) indican que hay una interacción en la absorción y concentración de sodio con potasio, calcio y hierro en tejido foliar ante el estrés salino. Estos indicadores suelen estar relacionados a la tolerancia ante el estrés salino, si las plantas mantienen una baja relación de Na/K, Na/Ca o Na/Fe o una alta relación de K/Na, Ca/Na Fe/Na pueden ser tolerantes al estrés salino (Thu *et al.*, 2018).

Assaha *et al.* (2013) encontraron diferencias en la relación de Na/K y Na/Ca en tejido foliar en dos especies de solanáceas (arándano de jardín y berenjena) señalando que la relación Na/K incrementó en ambas especies, pero fue más elevada en la berenjena; sin embargo, esta relación en el tallo fue menor para el tratamiento de 150 mM NaCl para el arándano de jardín.

Taha *et al.* (2018) encontró diferencias en la relación de K/Na y Ca/Na en el vástago de plantas de chile dulce (*C. annuum*) regadas con agua de mar diluida y con aplicación de  $\alpha$ -tocoferol vía foliar; donde señalan que la aplicación de agua de mar redujo estas variables mientras que la aplicación de  $\alpha$ -tocoferol incrementó la relación K/Na y Ca/Na, indicando que esta aplicación puede favorecer la tolerancia al estrés salino de este género.

Los resultados obtenidos comprueban que la acumulación de iones en el tejido foliar es una manera de contrastar la tolerancia al estrés salino del chile habanero cv Chichen Itzá, aunque se sugiere realizar mediciones en tallos raíces y frutos para poder determinar de una forma más acertada el mecanismo de esta especie para mitigar los efectos del estrés salino. Estos resultados concuerdan con lo descrito por

Bojórquez-Quintal *et al.* (2018) quienes indican que este cultivar es sensible a la salinidad.

### **8.5 Efecto del estrés salino en la respuesta antioxidante enzimática y peroxidación de lípidos**

Los resultados de este estudio (Tabla VI) indican que existen diferencias estadísticamente significativas en la actividad de SOD, POX y los niveles de TBARS por el efecto de la concentración de sales en términos de conductividad eléctrica, sin mostrar diferencias por la fuente salina o la interacción de ambos.

La producción de ERO es común en plantas bajo estrés, éstas se producen de manera natural en procesos metabólicos en cloroplastos (fotosíntesis) y mitocondrias (respiración celular). La enzima SOD representa la primera línea de defensa contra ERO (Buchanan *et al.* 2015; Gill y Tuteja, (2010), dismutando el  $O_2^-$  y reduciéndolo a  $H_2O_2$  (Ahmad, 2014; Halliwell, 2006). En la figura 27 se observa un aumento en la actividad de SOD conforme la conductividad eléctrica aumenta, posiblemente como respuesta al aumento en la síntesis de  $O_2^-$  por los cambios en el metabolismo de las células como consecuencia del estrés iónico causado por altas concentraciones de Na y Cl en los tejidos de las plantas (Ramírez-Serrano *et al.*, 2008). El tratamiento de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  con NaCl como factor estresante fue el que presentó una mayor actividad de SOD, lo que podría indicar un mayor estrés por el tratamiento de NaCl que por el de agua de mar. Es posible que el agua de mar presente una menor cantidad de Na y Cl disueltos y una mayor concentración de otros minerales, algunos de los cuales pudieran ser los cofactores para SOD. Diversos estudios han reportado este incremento en la actividad de SOD ante el estrés salino en distintas especies de plantas bajo condiciones de cultivo, como el trigo (Ibrahim, 2018; Kahrizi *et al.*, 2012), girasol (Ebrahimian y Bybordi, 2012) y papa (Faried *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2015).

Sin embargo, en el tratamiento con  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  no se observaron diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las dos fuentes salinas utilizadas en

este estudio. Ello sugiere que las plantas de chile habanero pueden tolerar la concentración de sales hasta  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  y que se pueden estar activando otros mecanismos antioxidantes no enzimáticos para la depuración del anión superóxido; como los tocoferoles (vitamina E) el ascorbato (Vitamina C) y el glutatión reducido (Ahmad, 2014; Szollosi, 2014).

Los resultados de la actividad de peroxidasas totales (Fig. 28) no presentan un patrón claro. Estos resultados sugieren que las variaciones entre los tratamientos pueden deberse a distintos mecanismos de defensa (enzimáticos y no enzimáticos) que intervienen en la depuración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , como la catalasa, ascorbato peroxidasa, glutatión reductasa, tocoferoles, ácido ascórbico, o compuestos fenólicos (Buchanan, 2015). Benzarti *et al.* (2012) reportan para *Atriplex portulacoydes* (especie halófito) expuesta a alta salinidad (200, 400, 800 y 1000 mM NaCl) pocas variaciones en la actividad de catalasa. Los autores sugieren que puede deberse a que la actividad inicial fue suficiente para hacer frente al estrés salino (Benzarti *et al.*, 2012). Sin embargo, Meloni *et al.* (2003) encontraron un aumento de la actividad de peroxidasas en un cultivar de algodón (Pora) conforme la salinidad aumentaba; los tratamientos de 100 y 200 mM NaCl incrementaron la actividad de POX en 76 y 94%, respectivamente, en comparación con el grupo control. En el mismo estudio, la actividad de POX en otro cultivar de algodón (Guazuncho) se mantuvo constante en todos los tratamientos (Meloni *et al.*, 2003). Ibrahim (2018) sugiere que existen diferencias en la actividad de POX en dos cultivares de trigo (Elnilein y Xumai 30) sometidos a estrés salino por NaCl ( $1.4, 2.5, 4.2$  y  $7.6 \text{ dS m}^{-1}$ ), de tal manera que el cultivar Elnilein presenta una menor actividad en los tratamientos estudiados.

Bajo condiciones de estrés salino, el incremento de ERO en las plantas puede aumentar la peroxidación de lípidos (Ahmad, 2014; Wenji *et al.*, 2018;). Los resultados (Fig. 29) indican que existe un aumento en la peroxidación de lípidos conforme la concentración salina aumenta. Estos resultados concuerdan con los descritos por Ramírez-Serrano *et al.* (2008) en cuyo estudio frutos de chile ancho cv

Caballero sometidos a estrés salino (agua de mar y NaCl a 1.3, 2.8 y 4 dS m<sup>-1</sup>) presentaron una mayor lipoperoxidación en el tratamiento de NaCl a 4 dS m<sup>-1</sup>, afectando la maduración de los frutos y causando necrosis en el tejido. Las enzimas SOD y CAT presentaron una mayor actividad bajo tratamiento de NaCl a 4 dS m<sup>-1</sup>; no obstante, la respuesta antioxidante no fue suficiente para evitar la peroxidación lipídica (Ramírez-Serrano *et al.*, 2008). En otra investigación, Cavalcanti *et al.* (2004) señalan que la actividad de SOD, CAT y POX confieren protección en contra del daño oxidativo en hojas de frijol sometidas a estrés salino a 200 mM NaCl por 3 y 6 días, y señalan que no hubo un incremento en la actividad de estas enzimas con respecto al grupo control, pero sí presentaron un aumento en el daño oxidativo en los tratamientos expuestos a las sales.

## 8.6 Efecto del estrés salino en el contenido de capsaicinas en frutos de chile habanero

En la tabla VII se observan diferencias estadísticamente significativas en la concentración de capsaicinas y dihidrocapsaicinas para la interacción de los factores fuente salina y conductividad eléctrica. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Arrowsmith *et al.* (2012), quienes encontraron un aumento en el contenido de capsaicinas en Jalapeño (*C. annuum*) bajo condiciones de estrés salino (0.5, 1.0 y 1.5% NaCl), aunque este aumento no representó diferencias estadísticas; sin embargo, atribuyen este pequeño aumento a una respuesta al estrés ambiental, quizá como mecanismo para proteger las semillas de algunos depredadores.

En las figuras 30 y 31 se puede observar que la concentración de capsaicinas y dihidrocapsaicinas varía dependiendo de la fuente salina. se observa una menor concentración de capsaicinas para los tratamientos de 9.4 y 13.6 dS m<sup>-1</sup> con diluciones de agua de mar (35 y 52% respecto al grupo control) (Fig. 30); sin embargo, los tratamientos de NaCl no presentaron diferencias estadísticamente significativas con el grupo control. Esto puede indicar un rango de manejo agronómico para la obtención de esta molécula. La familia de las capsaicinas es constituyente esencial en la calidad de frutos del género *Capsicum* (Khan *et al.*, 2014), y ha sido estudiada por su acción contra algunas enfermedades, como el cáncer (Chueh, 2013; Purwar *et al.*, 2012), probablemente por su actividad antioxidante (Rosa *et al.*, 2002).

Los cambios del contenido de capsaicinoides durante la maduración de los frutos, indican que su acumulación se presenta en estadios tempranos del desarrollo de los frutos, llegando al máximo al final de la etapa de crecimiento de los frutos; aunque cuando estos están completamente maduros se aprecia una reducción en su contenido (Matereska *et al.*, 2005)

## 9. CONCLUSIONES

Las plantas poseen distintos procesos para resistir los efectos nocivos de las sales, incluyendo procesos fisiológicos y bioquímicos. Muchos de estos procesos presentan interacciones que contribuyen a las diferencias (a nivel molecular, celular y de la planta completa) observadas entre especies en la resistencia a la exposición a condiciones de salinidad.

1.- Independiente de la fuente de salinidad, el chile habanero (*Capsicum chinense*) cv. Chichen Itzá pudo soportar hasta  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  de salinidad sin presentar un decremento en la producción y desarrollo de la planta.

2.- Los resultados obtenidos sugieren el uso de agua salobre en un sistema hidropónico de raíz flotante, lo que indica la integración de aguas de baja calidad en la producción de alimentos.

3.- El cultivar de chile habanero Chichen Itzá muestra una buena adaptación y regulación en sus procesos fisiológicos que le permite tolerar hasta  $9.4 \text{ dS m}^{-1}$ .

4.- El cultivar de chile habanero Chichen Itzá presenta una buena capacidad para evitar la acumulación de sodio en el tejido foliar hasta los  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$ .

5.- La capacidad antioxidante del cultivar Chichen Itzá le permite tolerar el estrés salino hasta los  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$ , sin comprometer el crecimiento vegetativo y la producción.

6.- El conjunto de las variables de respuesta morfométricas, fisiológicas y bioquímicas señalan que el umbral de tolerancia del chile habanero cultivar Chichen Itzá se encuentra en los  $6.6 \text{ dS m}^{-1}$  (25 mM de NaCl o 3.8% de agua de mar).

7.- El contenido de capsaicinas fue mayor en los tratamientos de  $13.6 \text{ dS m}^{-1}$  para ambas fuentes salinas; sin embargo, en términos de producción estos tratamientos presentaron la menor cantidad de frutos.

## 10. LITERATURA CITADA

- Al-Karaki, G., A. Ajmi, A O. Yahia. 2009. Response of soilless grown sweet pepper cultivars to salinity. *Acta Hortic.* 807: 227-232.
- Arrowsmith, S., T.P.Egan, J.F. Meekins, D. Powers, M. Metcalfe. 2012. Effects of salt stress on capsaicin content, growth, and fluorescence in Jalapeño cultivar of *Capsicum annuum* (Solanacea). *BioOne.* 83(1):1-7.
- Assaha, D.V.M., A. Ueda, H. Saenoka. 2013. Comparison of growth and mineral accumulation of two solanaceous species, *Solanum scaborum* Mill. (Huckleberry) and *S. melongena* L. (eggplant), under salinity stress. *Soil Sci.Plant Nutr.* 59: 912-920.
- Atlassi-Pak, V., M. Nabipour, M. Meskarbashee. 2009. Effect of salt stress on chlorophyll content, fluorescence, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> ions content in Rape plants (*Brassica napus* L.). *Asian J. of Agri. Res.* 3(2):28-37.
- Baath, S.G., M.K. Shukla, P.W. Bosland, R.L. Steriner, S.J. Walker. 2016. Irrigation water salinity influences at various growth stages of *Capsicum annuum*. *Agr.Wat. Manage.* 179: 246- 253.
- Benzarti, M., K.B. Rejeb, A. Debez, D. Messedi, C. Abdelly. 2012. Photosynthetic activity and leaf antioxidant adaptative responses of *Artiplex pportulacoides*. *Acta Phy. Plant.* 34: 1679-1688.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal, G.A. O'Connor. 2001. *The Soil Solution. Soil Chemistry.* John Wiley and Sons, Inc. 3a edición. New York. 307p.
- Bojórquez-Quintal, E. A. Velarde-Buendía, Á. Ku-Gonzales, M. Carrillo-Pech, D. Ortega-Camacho.I. Echevarría-Machado, I. Pottosin, M. Martínez- Estévez. 2014. Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jaq.): Proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. *Front. Plant Sci.* 605 (5): 1-14.
- Borowska, J. 2003. Fruits and Vegetables as source of natural antioxidants. *Przem. Ferm. Owoc. Warz.* 1:11-12.
- Bosland, P.W., E.J. Votava. 2012. Taxonomy, pod types and genetic resources. En Bosland, P. W., E.J. Votava (ed.). *Peppers: vegetable and spice Capsicums.* CABI. U.S.A. pp13-38.

Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein using the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72:248-254.

Briat, J.F. 2011. Iron Nutrition and implications for Biomass Production and the nutritional quality of Plant Products. En: Hawkesford M.J., P. Barraclough (eds). *Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*. Wiley-Blackwell. Primera Edición. Iowa, U.S.A. pp 311-334.

Buchanan, B.B., Wilhelm Gruissem, Russel L. Jones. 2015. *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. Segunda edición: Wiley Blackwell. Pp. 1085 – 1089.

Carillo, M., L. Castorena, Y. Maya, J. Wurl, J. Urciaga, A. Breceda. 2012. *Hist. Agrar.* 56: 88-106.

Casierra-Posada, F. 2006. Distribución y producción de biomasa seca en guayabo (*Psidium guajava* L, cv. Palmira ICA-1) bajo estrés salino. *Orinoquia*.10 (2):58-66.

Casierra-Posada, F., N. García. 2005. Crecimiento y distribución de materia seca en cultivares de fresa (*Fragaria sp.*) bajo condiciones de estrés salino. *Agronomía colombiana*. 23(1):83-89.

Cavalcanti, F.R., J.T. A. Oliveira, A.S. Martins-Miranda, R. Almeida-Viégas, J.A. Gomes-Silveira. 2004. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea leaves. *New Phytol.* 163: 563-571.

Chartzoulakis, K., G. Klapaki. 2000. Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Sci. Hortic.* 86: 247-260.

Chueh, P.J. 2013. The cancer-suppressing and -promoting actions of capsaicin. En Srivastava, S.K. (Ed.), *Role of Capsaicin in Oxidative Stress and Cancer*. 3a Edición. Springer, Dordrecht, Netherlands. pp 131-147.

Daroub, S.H., G.H. Snyder. 2007. *The Chemistry of Plant Nutrients in Soil*. En: Dantoff L.E., Elmer W.H., Huber D.M. (eds). *Mineral Nutrition and Plant Disease*. APS Press. Primera Edición. St.Paul, Minnesota U.S.A. pp 1-7.

Dias de Azevedo-Neto, A., J.T. Prisco, J.Enéas-Filho, C. F. Lacerda, J. Vieira-Silva, P.H. Alves da Costa, E. Gomes-Filho. 2004. Effects of salt stress on plant growth,

stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. *Braz.J.Plant Physiol.* 16(1):31-38.

Ebrahiman E., A. Bybordi. 2012. Effect of salinity, salicylic acid, silicium and ascorbic acid on lipid peroxidation, antioxidant enzyme activity and fatty acid content in sunflower. *Afr.J. Agric.Res.* 7:3685-3694.

Eshbaugh, W.H. 2012. The taxonomical of the genus *Capsicum*. En Russo V.M. (ed.) *Pepper: Botany, production and uses*. CABI.U.S.A. pp14-28.

FAO.2003. *Agriculture, Food and Water. A contribution to the World Water Development Report*.

FAO.Turrall, Hugh; 2011. *Climate change, water and food security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Water Report 36*. Pp. 5 -15.

FAOSTAT. 2014. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>

Fariad, H.N., C.M. Ayyub, M. Amjad, R. Ahmed. 2016. Salinity impairs Ionic, Physiological and Biochemical attributes in potato. *Pak.J.Agric.Sci.* 53(1):17-25.

Fitter, Alastair; H. Robert. 2002. *Environmental Physiology of Plants*. Tercera edición. Academic Press. Pág. 241.

Gao, H.J., H.Y. Yang, J.P. Bai, X.Y. Liang, Y.Lou, J.L. Zhang, D. Wang, J.L.Zhang,S.Q. Niu, Y.L. Chen. 2015. Ultrastructural and physiological response of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets to gradient saline stress. *Front. Plant Sci.* 5: 1-14.

Garzón, P., M. García. 2011. Efecto del estrés por NaCl sobre la anatomía radical y foliar de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* L.). *Bioagro.* 23 (3):153-160.

German, J. B. 1999. Food processing and lipid oxidation. *Adv Exp Med Biol.* 459:23–50.

Gill, S. S., N. Tuteja. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Bioch.* 48:909-930.

Gómez-Bellot, M.J., M.F. Ortuño, P.A. Nortes, A. Bernavé, F. Fernández, M.J. Sánchez-Blanco. 2018. Effectiveness of bacterial inoculation in alleviation of salinity on

water status, mineral content, gas exchange and photosynthetic parameters of *Viburnum trinus* L. plants. *Sci. Hortic.* 237: 303-310.

Gonzales-Eguiarte, D.R., J.A. Ruiz-Corral, J.Z Castellanos. 2004. Delimitación de áreas salinas en el distrito de riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoam.* 22(1):91-97.

Gonzales-Medrano, F.; 2008. Las Zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. INE – SEMARNAT. Págs. 27 -53.

Grattan, S. R., C. M. Grieve. 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hortic.* 78:127-157.

Grieve, C.M. 2011. Salinity-Induced Enhancement of Horticultural Crop Quality. En: Pessarakli M. (ed.). *Handbook of Plants and Crop Stress*. Taylor & Francis Group. Tercera Edición. Boca Raton, U.S.A. pp 1173-1193.

Halliwell, B. 2006. Reactive Species and Antioxidants. *Redox Biology Is a Fundamental Theme of Aerobic Life. Plant Physiol.*, 141(2), 312–322.

Haworth, J.E. 2003. Natural antioxidants Review. *Proceedings of the 56th American Meat Science Association Reciprocal Meat Conference*. Columbia Missouri, June 15-18, pp. 95-98.

<http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s08.htm> 05-abril-2017

Hunt, R. 1990. *Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners*. Unwin Hyman. Primera Edición. Londres, Reino Unido. 118p.

Ibrahim, M.E.H. 2018. Nitrogen Fertilization Alleviated Negative Impacts of NaCl on Some Physiological Parameters in Wheat. *Pak. J. Bot.* 50 (6): 2097-21074.

Inzunza-Ibarra, M. A.; A.L. Ulery, M. Villa-Castorena, E.A. Catalán-Valencia. 2006. Absorción y translocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. *Rev. Fitotec. Mex.* enero-marzo, 79-88.

Izzo, R., A. Incerti, C. Bertolla. 2008. Seawater effects on growth and nutrient uptake of sunflower plants. En: Abdelly C., M. Öztürk, M. Ashraf, Cl. Grignon (eds.). *Biosaline agriculture and High Salinity Tolerance*. Birkhäuser. Primera edición. Basel, Suiza. pp 61-70.

Jeong, J., E.L. Connolly. 2009. Iron uptake mechanisms in plants: Functions of the FRO family of ferric reductases. *Plant Sci.* 176: 709-714.

Jinn-Chin, Y., T. Menq-Jiau, L. Cheng-Wei, K. Chun-Teh. 2012. Modulation of NaCl Stress In *Capsicum annuum* L. seedlings by catechin. *Sci Hortic.* 134: 200-209.

Kahrizi, S., M. Sedighi, O. Sofalian. 2012. Effect of salt stress on proline and activity of antioxidant enzymes in ten durum wheat cultivars. *Ann. Biol. Res.* 3: 3870-3874.

Kar, M., D. Mishra. 1976. Catalase, peroxidase and polifenoloxidasas activities during rice life senescence. *Plant Physiol.* 57:315-319.

Khan, A. L., J.H. Shin, H.Y. Jung, I.J. Lee. Regulations of capsaicin synthesis in *Capsicum annum* L. by *Penicillium resedanum* LK6 during drought conditions. *Sci Hortic.* 175: 167-173.

Lamber, H.; F. Stuart Chapin III; L. Pons, Thijs. 2008. *Plant Physiological Ecology*. Segunda edición. Springer. Págs. 296 – 300.

Liang, W., X. Ma, P. Wan. L. Liu. 2018. Plant salt-tolerance mechanism: A review. *Biochem. Bioph. Res. Co.* 495: 286- 291.

Maathuis, F.J.M., D. Podar. 2011. Uptake, Distribution, and physiological Functions of Potassium, Calcium and Magnesium. En: Hawkesford M.J., P. Barraclough (eds). *Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*. Wiley-Brackwell. Primera Edición. Iowa, U.S.A. pp 265-294.

Marschner, H. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition Of Higher Plants*. Academic Press Inc. Tercera edición. San Diego, E.U.A. 672p.

Marschner, P. 2011. The Role of the Rizosphere in Nutrient Use Efficiency in Crops En: Hawkesford M.J., P. Barraclough (eds). *Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops*. Wiley-Brackwell. Primera Edición. Iowa, U.S.A. pp 47-64.

Martínez-Ballesta, M. C., López-Pérez, L., Hernández, M., López-Berenguer, C., Fernández-García, N., Carvajal, M. 2008. Agricultural practices for enhanced human health. *Phytochem. Rev.* 7(2), 251-260.

- Materaska, M., I. Perucka. 2005. Antioxidant Activity of the Main Phenolic Compounds Isolated from Hot Pepper Fruit (*Capsicum annuum* L.). J. Agric. Food. Chem. 53: 1750-1756.
- Meloni, D.A., M.A. Oliva, C.A. Martinez, J. Cambraia. 2003. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase and glutathione reductase in cotton under salt stress. Environ. Exp. Bot. 49: 69-76.
- Mengel, K., E.A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5ta edición. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Montero, M. 1996. Los Radicales libres y las defensas antioxidantes. Anales de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Santiago de Compostela, España. Vol. 57, N°4.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant. Cell. Environ. 25:239-250.
- Munns, R., M. Gilliam. 2015. Salinity tolerance of crops – what is the cost? New Phytol. 208(3), 668-673.
- Munns, R., M. Tester. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 651-681.
- Murillo-Amador, B., S. Yamada, T. Yamaguchi, E. Rueda-Puente, N. Ávila-Serrano, J.L. García Hernández, R. López-Aguilar, E. Troyo-Diéguez, A. Nieto-Garibay. 2007. Influence of calcium silicate on growth, physiological parameters and mineral nutrition in two legume species under salt stress. J. Agron. Crop Sci. 193: 413-421.
- Navarro, J. M., C. Garrido, M. Carvajal, V. Martínez. 2002. Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity, The J. Hort. Sci. Biotech. 77(1), 52-57
- Navarro, J.M., C. Garrido. V. Martínez, M. Carvajal. 2003. Water relations and xylem transport of nutrient in pepper plants grown under two different salt stress regimes. Plant Growth Regul. 41: 237-245.
- Nee, M., L. Bohs, S. Knapp. 2006. New species of *Solanum* and *Capsicum* (Solanaceae) from Bolivia with clarification of nomenclature in some Bolivian *Solanum*. Brittonia. 58, 322-356.

Niu, G., D.S. Rodríguez, E. Call, P.W. Bosland, A. Ulery, E. Acosta. 2010. Response of eight chile peppers to saline water irrigation. *Sci. Horti.* 126: 215-222.

Oliva, M.A., R. Rincón, E. Zenteno, A. Pinto, L. Dendooven, F. Gutiérrez. 2008. Rol del vermicompost frente al estrés por cloruro de sodio en el crecimiento y fotosíntesis en plántulas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). *Gayana Bot.* 65(1): 10-17.

Paoletti, F., D. Aldinucci, A. Mocalli. 1986. A Sensitive Spectrophotometric Method for the Determination of Superoxide Dismutase Activity in Tissue Extracts. *Anal. Biochem.* 154: 536-541.

Parés, J., C. Arizaleta, H. Martínez, M.E. Sanabria, G. García. 2008. Efectos de los niveles de salinidad sobre la densidad estomática, índice estomático y el grosor foliar en plantas de *Carica papaya* L. *Acta Bot. Venez.* 31(1):27-34.

Passioura, J. B., J. F. Angus. 2010. Improving productivity of crops in water limited environments. En: *In Advances in Agronomy*, Donald L. Sparks (ed.), Vol. 106, pp. 37–75. Academic Press, Burlington.

Persky, A. M., P. S. Green, L. Stublely, C. O. Howell, L. Zaulyanov, G. A. Brzaeau, J. W. Simpkins. 2000. Protective effects of estrogens against oxidative damage to heart and skeletal muscle *in vivo* and *in vitro*. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 223:59-66.

Pickersgill, B. 1969. The archaeological record of chili peppers (*Capsicum* spp.) and the sequence of plant domestication in Perú. *American Antiquity* 23, 54-61.

Pimienta–Barrios, E., A. Muñoz–Urías, B.C. Ramírez–Hernández, L. Méndez–Morán. 2000. *Desarrollo Vegetal*. Universidad de Guadalajara. Pág. 322.

Procházková, D., N. Wilhelmová. 2011. Antioxidant protection during Abiotic Stress. En: Pessarakli M. (ed.). *Handbook of Plants and Crop Stress*. Taylor & Francis Group. Tercera Edición. Boca Raton, U.S.A. pp 139-156.

Purwar, S., S.M. Gupta, A. Kumar. 2012. Enzymes of phenylpropanoid metabolism involved in strengthening the structural barrier for providing genotype and stage dependent resistance to Karnal Bunt in wheat. *Am.J.Plant.Sci.* 3, 261-267.

Qiu, R. Jing Y., Liu C., Yang, Z. 2017. Response of hot pepper yield, fruit quality, and Fruit Ion Content to Irrigation Water Salinity and Leaching Fractions. *Hortscience.* 52(7):979-985.

Ramírez-Serrano, R., N.Y. Hernández-Saavedra, J.Á. Larrinaga-Mayoral, B. Murillo-Amador, H. Fujiyama. 2008. Respuesta antioxidante enzimática en frutos de chile ancho (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de estrés salino. *Interciencia*, mayo, 377-383.

Szőllősi, R. 2014. En: *Oxidative damage to plants*. Ahmad, P. (ed) Primera edición. Academic Press. Pág. 289

Resh, H. M. 2006. *Cultivos hidropónicos*. Ediciones Mundi-Prensa. Quinta Edición. Madrid, España. 558p.

Reyes-Pérez, J.J., B. Murillo-Amador, A. Nieto-Garibay, E. Troyo Diéguez, I.M. Reynaldo Escobar.E.O. Rueda-Puente. 2013. Germinación y características de plántulas de albahaca (*Ocimum basilicum*) sometidas a estrés salino. *Rev. Mex. Cien. Agri.* 4(6): 869-880.

Rice R.W. 2007. *The Chemistry of Plant Nutrients in Soil*. En: Dantoff L.E., Elmer W.H., Huber D.M. (eds). *Mineral Nutrition and Plant Disease*. APS Press. Primera Edición. St.Paul, Minnesota U.S.A. pp 1-7.

Rosa, A., M. Delana, V. Casu, S. Paccagnini, G. Appendino, m. Ballero, M.A. Dessi. 2002. Antioxidant activity of Capsinoids. *J. Agri. Food. Chem.* 50: 7396-7401.

Samia, A.A., I.M. Heba. 2018. Amelorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Sci. Hort.* 236: 244-250.

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) (2005): *Plan estatal de educación, capacitación y comunicación ambiental para el desarrollo sustentable de Baja California Sur, La Paz, Gobierno del Estado de Baja California Sur*.

Sharma, P., A.B. Jha, R.S. Dubey. 2011. *Oxidative Stress and Antioxidant Defense Systems in Plants Growing under Abiotic Stress Growing*. En: Pessaraklii M. (ed.). *Handbook of Plants and Crop Stress*. Taylor & Francis Group. Tercera Edición. Boca Raton, U.S.A. pp 89-138.

Soria Baixauli, C.; J.M. Aguilar Olivert. 2010. *Cultivo sin Suelo de Hortalizas*. Generalitat Valenciana. pp 11-14.

- Sudhir, P., S.D.S. Murthy. 2004. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. *Photosynthetica*. 42 (4): 481-486.
- Szollosi, R. 2014. Superoxide Dismutase (SOD) and Abiotic Stress Tolerance in Plants: An Overview. En: Ahmad, P. (ed.). *Oxidative Damage to Plants. Antioxidant Networks and Signaling*. Academic Press Inc. Primera Edición. San Diego, E.U.A. pp 89-129.
- Taha, S.S., A. W. M. Mahmoud, M.M. Rady. (2018). Effect of Exogenous  $\alpha$ -Tocopherol on Sweet Pepper Plants Irrigated by Diluted Sea Water. *J. Agric. Stud.* 1(6): 23-44.
- Thu, T.T.P., Y. Hideshi. 2018. Allocation of Macronutrients in Roots, Sheaths, and Leaves Determines Salt Tolerance In Rice. *Am. J. Plant Sci.* 9 (1): 1051-1069.
- Valera, R.E., G.R García. 2014. Anatomía foliar de plantas de pimentón (*Capsicum annuum* L.) sometidas al estrés salino. *J. Hort.* 1:281-287.
- Velicevici, G., E. Madosa, A. Cuilca, D. Camen, M. Malaescu, C. Beinsan. 2017. Impact of salt stress (NaCl) on chlorophyll content of some genotypes of pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Hortic. Biotech.* 21(3):122-125.
- Villora, G., D. A. Moreno, G. Pulgar, L. Romero. 2000. Yield improvement in zucchini under salt stress: determining micronutrient balance. *Sci.Hortic.* 86: 175-183.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J. Lammers. 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 289(5477), 284-288.
- Wu, D., S. Cai, M. Chen, L. Ye, Z. Chen, H. Zhang, F. Dai, F. Wu, G. Zhang. 2013. Tissue metabolic response to salt stress in wild and cultivated barley. *PLOS ONE* 8(1).
- Wu, H. 2018 Plant tolerance and Na<sup>+</sup> sensing and transport. *The crop journal*. 6 215-225.
- Yildirim, E., H. Karlidag, M. Turan. 2009. Mitigation of salt stress in strawberry by foliar K, Ca and Mg nutrient supply. *Plant. Soil. Environ.* 55 (5): 213-221.
- Yousfi, S., M. Wissal, H. Mahmoudi, C. Abdelly, M. Gharsalli. 2007. Effect of salt on physiological response of barley to iron deficiency. *Plant. Physiol. Bioch.* 45: 309-312.
- Ziaf, K., M. Amjad, M.A. Pervez, Q. Iqbal, I. A. Rajwana, M. Ayub. 2009. Evaluation of different growth and physiological traits as indices of salt tolerance in hot pepper (*Capsicum Annuum* L.). *Pak. J. Bot.* 41(4):1797-1809.