



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura


Saltillo, Coah, a 03 de octubre de 2023

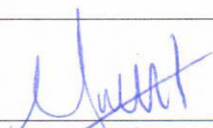
Declaración de documento libre de plagio:


Mediante esta declaración manifestamos que el documento de tesis titulado Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo (Ficus carica L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado mediante división radical redactado por GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ, y revisado por el Asesor/Director Dr. Oussama Mounzer y Co-asesor/Co-director Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros, está libre de plagio cumpliendo los siguientes aspectos:

Autenticidad y crédito a las fuentes	Revisado*
Los textos son originales	✓
El documento está libre de oraciones y párrafos copiados de otras fuentes bibliográficas, sitios de internet, etc.	✓
El documento está libre de traducciones literales emanadas de literatura en otro idioma	✓
Los textos están debidamente referenciados	✓
Las citas textuales (si las hay) están entrecomilladas y referenciadas	✓
Fotografías, esquemas, gráficas, tablas y otros materiales emanados de otras fuentes están referenciados.	✓
Se adjunta reporte de revisión realizado con el software _____ con un registro de _____ % de similitud	✓

\*Marque con una "X"

  
 Nombre y firma del (de la)  
 Asesor(a)/director(a)

  
 Nombre y firma del  
 (de la) autor(a)

  
 Nombre y firma del (de la)  
 Co-asesor(a)/Co-director(a)



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

Saltillo, Coahuila a 09 de octubre de 2023

Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura

Coordinación de Posgrado

PRESENTE

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ titulado "Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo (Ficus carica L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado mediante división radical" el cual fue presentado el día 3 de octubre de 2023, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

SINODALES

Dr. Antonio Cárdenas Flores  
Presidente

Dr. Auberto Reyes Rosas Secretario

Dr. José Hipólito Rodolfo Mendoza Hernandez  
Vocal

Dr. Oussama Mounzer

Vo. Bo. de los Asesores

Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros



# TESIS CON CARACTER ABIERTO

PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

---

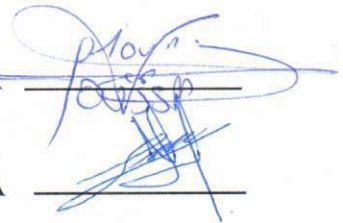
AUTOR: GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ FIRMA



TITULO: Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo (Ficus carica L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado mediante división radical

ASESORES: Dr. Oussama Mounzer

FIRMA



Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros

FIRMA




El Centro de Investigación en Química Aplicada clasifica el presente documento de tesis como ABIERTO.

Un documento clasificado como Abierto se expone en los estantes del Centro de Información para su consulta. Dicho documento no puede ser copiado en ninguna modalidad sin autorización por escrito del Titular del Centro de Información o del Director General del CIQA.

Saltillo, Coahuila, a 3 de Octubre de 2023



  
\_\_\_\_\_  
Dra. Julieta Torres González  
Directora General del CIQA



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

*TESIS*

**Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo  
(Ficus carica L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado  
mediante división radical**

*Presentada por:*

**GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ**

*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

*Asesorada por:*

**Dr. Oussama Mounzer**  
**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**TESIS**

**Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo (*Ficus carica* L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado mediante división radical**

*Presentada por:*

**GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ**


*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencias en Agroplasticultura**

*Asesorada por:*

**Dr. Oussama Mounzer**  
**Dr. Francisco Marcelo Lara Viceros**

**SINODALES**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Antonio Cárdenas Flores**  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Audberto Reyes Rosas**  
**Secretario**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. José Hipólito Rodolfo Mendoza Hernández**  
**Vocal**

**Saltillo, Coahuila. México**

**Octubre, 2023**

## DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el período que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 3 de octubre de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Ortiz Hernández', written in a cursive style.

GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ

Nombre y Firma

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA**

**TESIS**

**Dinámica de crecimiento de raíces y balance hídrico en plantas de higo  
(*Ficus carica* L.) 'Black mission' sometidas a riego salino controlado mediante  
división radical**

Presentado por:

Grecia Daniela Ortiz Hernández

Directores:

Dr. Oussama Mounzer (DBA – CIQA)

Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros (DBA – CIQA)

AGOSTO, 2023

Porque mis planes no son sus planes,  
ni sus caminos son mis caminos.

Is 55, 8



## **DEDICATORIA**

A mis padres, José Luis Ortiz Galindo y Araceli Hernández Cerda, mi gran ejemplo, que se han comprometido en darme lo mejor que tienen a lo largo de mi vida.

A mis hermanas, Moncerrath Aracely Ortiz Hernández y María Fernanda Ortiz Hernández por apoyarme y comprenderme en este camino que me acompañaron a recorrer.

A mi tía, María Esther Ortiz Galindo, quien ha sido una segunda madre para mí y siempre me ha brindado su apoyo incondicional.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me permitió culminar uno más de mis sueños, ser mi inspiración, mi guía y mi fuerza en los momentos donde más lo necesite.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por brindarme la beca para el estudio de esta maestría.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por ser la institución donde realicé mi trabajo de investigación y recibí una formación adecuada para mi desarrollo profesional.

Al Dr. Oussama Mounzer, por dirigir mi trabajo de tesis, ser un digno ejemplo a seguir en el mundo de la investigación y de calidad de persona, también por hacerme crecer intelectual y humanamente. Gracias por confiar en mí.

Al Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros, por ayudarme a desarrollar un pensamiento crítico para la solución de problemas por medio de lenguaje de programación, además de auxiliarme en la parte técnica de mantenimiento y reparación de equipos. Gracias por confiar en mí.

Al M.C. Jairo Vázquez Lee, por su apoyo técnico y científico en el desarrollo del cultivo, así como las labores agronómicas junto con el Sr. Francisco Prado Castañuela, su ayuda fue crucial.

A la Dra. Yolanda Ortega Ortega, por orientarme y apoyarme en el desarrollo de mi proyecto de investigación dentro de los laboratorios, igualmente por su confianza y acompañamiento a lo largo de mi estancia en CIQA.

Al M. C. José Guadalupe Altamirano Pacheco, con quien siempre conté para orientar y recibir sabios consejos técnicos para el buen desarrollo del cultivo, así como instruirme para facilitar el procesamiento de datos.

A mis queridos amigos de la maestría, Lizeth Chávez Cerón y Abraham Isabel Becerra Berlanga, gracias por caminar junto a mí en esta gran aventura y sentirme parte de una pequeña familia.

## RESUMEN

Los recursos hídricos con los que cuenta el estado de Coahuila son de aguas subterráneas, sin embargo, cerca del 70 % de ellos se encuentran sobreexplotados y el sector agrícola ocupa el 59 % del agua disponible. La diversificación de cultivos en el estado está cobrando terreno ante aquellas plantas que se adapten mejor a las condiciones edafoclimáticas propias de la región. La higuera (*Ficus carica* L.) es una planta moderadamente tolerante a la salinidad y al estrés hídrico, dado su centro de origen en el Mediterráneo, es afín a las zonas áridas y semiáridas. Este trabajo se desarrolló en cultivo de higuera (*F. carica* L. var "Black Mission") de dos años de edad bajo riego salino en un sistema de raíces divididas con el objetivo de conocer si la dinámica de crecimiento de raíces cambia al estar en condiciones de salinidad moderada. Se colectaron variables climáticas de estaciones meteorológicas y de caudalímetros de pulso, así como sensores de desplazamiento lineal e inducción diferencial (LVDT) para ejecutar el balance hídrico. Se realizaron evaluaciones de intercambio gaseoso y potencial hídrico, así como el seguimiento del crecimiento vegetativo y reproductivo durante la temporada. Asimismo, se tomaron fotografías de las raíces dentro del sustrato para estimar la evolución del área de este órgano. Los resultados indican un menor crecimiento de la parte aérea del tratamiento de mayor salinidad (T4A\_CE<sub>6.0</sub> y T4B\_CE<sub>6.0</sub>), pero mayor área del sistema radical y a su vez obteniendo el rendimiento más alto junto con T2 (T2A\_CE<sub>1.7</sub> y T2B\_CE<sub>6.0</sub>) de 16 kg árbol<sup>-1</sup>). También, a pesar de la conductividad eléctrica que recibieron las plantas en la solución de fertirriego del T4 (CE = 6.0 dS m<sup>-1</sup>), este presentó valores de potencial hídrico del tallo ( $\psi_{\text{tallo}}$ ) mayores que los tratamientos que recibieron agua de pozo (CE = 1.7 dS m<sup>-1</sup>) en uno de sus compartimentos. En conclusión, el riego salino tiene efectos sobre las plantas de higuera disminuyendo el crecimiento vegetativo y sobre su ecofisiología, mas no compromete su rendimiento y el área del sistema radical es más activo en condiciones de agua dulce.

**Palabras clave:** balance hídrico; dinámica de crecimiento de raíces; riego salino; sistema de raíces divididas; biocapacitancia.

## ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
I.1	Estado actual del agua en Coahuila .....	2
I.2	Problemas derivados de la falta de agua .....	4
I.3	Opciones para mejorar la eficiencia de aplicación de riego .....	6
I.4	Investigaciones encaminadas a mejorar la productividad del uso del agua ....	7
I.5	La higuera como alternativa de cultivo en zonas áridas.....	9
I. 6	Investigaciones sobre la agronomía y fisiología de <i>F. carica</i> .....	12
II.	HIPÓTESIS.....	14
III.	OBJETIVOS.....	14
III.1	Objetivo general .....	14
III.2	Objetivos particulares .....	14
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	15
IV. 1	Localización del experimento .....	15
IV. 2	Material vegetal.....	15
IV. 3	Marco de plantación y sistema de fertirriego .....	16
IV. 4	Nutrición del cultivo .....	17
IV.5	Tratamientos .....	18
IV. 6	Variables climáticas .....	20
IV. 7	Variables de manejo de fertirriego.....	20
IV. 7. 1	Aportes de agua de riego y drenaje .....	20
IV. 7. 2	pH y conductividad eléctrica de la solución de drenaje .....	21
IV. 8	Variables biométricas y ecofisiológicas de la planta .....	21
IV. 8. 1	Crecimiento vegetativo .....	21

IV. 8. 3 Crecimiento de raíces.....	23
VI. 8. 4 Evolución del estado hídrico y de los intercambios gaseosos.....	25
IV. 8. 5 Variaciones micro morfométricas del tronco .....	26
IV. 8 Biocapacitancia .....	27
IV. 9 Análisis estadístico.....	28
V. RESULTADOS.....	29
V. 1 Variables climáticas .....	29
V. 2 Balance hídrico .....	31
V. 3 Conductividad Eléctrica y pH de la solución de fertirriego .....	32
V. 4 Evolución del potencial hídrico del cultivo .....	34
V. 5 Evolución del intercambio gaseoso del cultivo .....	37
V. 6 Variaciones micro morfométricas del tronco.....	39
V. 7 Crecimiento vegetativo.....	41
V. 8 Crecimiento del fruto y rendimiento del cultivo .....	44
V. 9 Grados Hora de Crecimiento del fruto.....	46
V. 10 Estimación del crecimiento de las raíces.....	48
V. 11 Biocapacitancia eléctrica.....	50
VI. DISCUSIÓN.....	51
VI. 1 Entorno ambiental.....	51
VI. 2 Estado hídrico en la planta.....	51
VI. 3 Ecofisiología, crecimiento y desarrollo de plantas de higuera .....	53
VI. 4 Dinámica de crecimiento de raíces .....	55
VII. CONCLUSIONES .....	57
VIII. REFERENCIAS .....	58

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie de cultivos bajo riego en el estado de Coahuila. ....	5
Cuadro 2. Tratamientos de riego aplicados a árboles de <i>F. carica</i> en el experimento de Altamirano Pacheco (2022) .....	13
Cuadro 3. Concentración de nutrientes en solución nutritiva de referencia para cultivo de higo .....	17
Cuadro 4. Concentración de fertilizantes comerciales empleados en la solución madre de nutrición .....	17
Cuadro 5. Aporte de nutrientes por tratamiento .....	18
Cuadro 6. Descripción de los tratamientos en función de la Conductividad Eléctrica	19
Cuadro 7. Tratamientos de experimento de Biocapacitancia en esquejes de <i>F. carica</i>	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de los acuíferos en Coahuila. El color rojo y verde representan a los acuíferos con una con recarga negativa (déficit) y positiva, respectivamente.....	3
Figura 2. Área cosechada y Producción de Higo a nivel Mundial .....	10
Figura 3. Producción de Higo en México.....	11
Figura 4. Sistema de conducción de ramas laterales en árbol de <i>F. carica</i> .....	15
Figura 5. Diagrama de la distribución de tratamientos en la casa de malla sombra	19
Figura 6. Instalación de caudalímetros de pulso para medir aportes de riego y drenaje en <i>F. carica</i> .....	20
Figura 7. Medición de pH y CE en el agua de drenaje de <i>F. carica</i> .....	21
Figura 8. Toma de datos en <i>F. carica</i> de diámetro de rama basal y diámetro de brote	22
Figura 9. Crecimiento y desarrollo de sicono de higo .....	23
Figura 10. Esquematación de la posición del tubo de acrílico dentro de los compartimentos de plantas de higuera ( <i>Ficus carica</i> L. var “Black Mission) bajo división radical.	24
Figura 11. Equipo para la captura de imágenes de raíz dentro del sustrato en plantas de higuera ( <i>Ficus carica</i> L. var. “Black Mission”) bajo división radical. A) lámina de aluminio, B) iluminación LED, C) rondana de plástico, D) cámara de 8 MP.....	25
Figura 12. Sensor LVDT instalado en tronco de <i>Ficus carica</i> .....	27
Figura 13. Evolución de variables climáticas al interior y exterior de la casa de malla sombra durante el ciclo 2022 en el cultivo de higuera. A) Radiación solar, B) Temperatura, C) Humedad Relativa .....	30
Figura 14. Evapotranspiración de referencia, Evapotranspiración real y Coeficiente de cultivo de árboles de <i>Ficus carica</i> L. en tratamiento testigo .....	31

Figura 15. Lámina total de riego (mm) aplicada del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento de fertirrigación. La fracción de color azul y verde en cada columna corresponden a la lámina de evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) y de drenaje, respectivamente. Las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). .....32

Figura 16. Conductividad eléctrica media de la solución de fertirriego (verde) y drenaje (azul) del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento. Las barras representan el error estándar y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). .....33

Figura 17. pH medio de la solución de riego (violeta) y drenaje (verde) entre el 20 de mayo y el 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento. Las barras representan el error estándar y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). .....34

Figura 18. Evolución del potencial hídrico del tallo en higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) durante el 10 de junio (A) y el 18 de julio (B) de 2022. Las barras representan la media de 6 valores y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ) .....36

Figura 19. Evolución del déficit de presión de vapor, de la tasa fotosintética y de conductancia estomática a nivel foliar, los días 10 de junio (A, B y C) y, 18 de julio (D, E y F) del 2022. Cada punto representa la media de 6 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). .....38

Figura 20. Evolución de la Evapotranspiración de Referencia (A), Variación del Diámetro del Tronco (B) y la Máxima Contracción Diaria en árboles de higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) del 1 de julio al 5 de julio de 2022. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). La línea blanca y negra dentro de la gráfica de cajas representa la media y la mediana, respectivamente. ....40

Figura 21. Crecimiento relativo del diámetro de rama de un año de edad (A) y del brote del mismo año (B) en higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) entre el 4 de abril y el 17 de noviembre de 2022. T1: fertirriego.....42



(CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 18 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).....42

Figura 22. Crecimiento relativo de la longitud de brote del mismo año en higuera (*F. carica* L. var “Black Mission”) del 4 de abril al 17 de noviembre del 2022. T1: fertirriego (CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 18 valores los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).....43

Figura 23. Rendimiento acumulado de siconos (A) y peso unitario de fruto (B) en higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) por cada tratamiento del 29 de junio al 21 de octubre del 2022. T1: fertirriego (CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 6 valores, los asteriscos y letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). La línea blanca y negra dentro de la gráfica de cajas representa la media y la mediana, respectivamente.....45

Figura 24. Evolución del diámetro ecuatorial del fruto en función de los grados hora de crecimiento (GHC) acumulados durante las etapas de crecimiento del fruto 62 (A), 91 (B) y 132 (C) días después de la brotación (DDB). Cada punto representa la media de 6 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).....47

Figura 25. Crecimiento del área de raíz en higuera (*Ficus carica* L. var “Black Mission”) de acuerdo al compartimento (A y B) y profundidad (10 cm, 20 cm y 30 cm). T1: fertirriego (CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 3 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher (p < 0.05).....49

Figura 26. Evolución de la biocapacitancia eléctrica de esquejes de higuera (*Ficus carica* L.) var. “Black Mission” en respuesta al volumen de raíces (A), al desarrollo del tiempo después del trasplante (B), al pH (C) y a la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (D). .....50

## I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones de producción agrícola son cada vez más críticas en todo el mundo debido al cambio de régimen del clima y la severidad de los fenómenos naturales (Golla, 2021). Las sequías prolongadas y temperaturas extremas describen adecuadamente el clima del norte de México, aunado a suelos someros con bajo contenido de materia orgánica (CONAGUA, 2021a).

La higuera es un árbol o arbusto originario de la región de oriente medio, que por años se ha cultivado en la cuenca del Mediterráneo, parte de Asia y en América con los primeros conquistadores; se le ha catalogado como una especie tolerante al estrés salino e hídrico (Zarei *et al.*, 2016). Es de interés la diversificación de cultivos en el estado de Coahuila, tal que se han implementado programas de apoyo para establecimiento de huertos de higo con la meta de cubrir 150 hectáreas en 2020 (Heraldo de Saltillo, 2020).

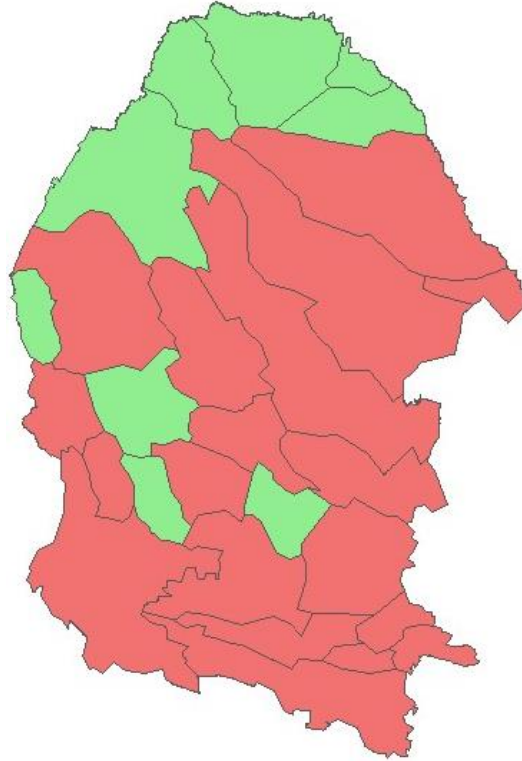
Es de importancia la generación de paquetes tecnológicos para el cultivo de higo en la región norte de México donde predominan las zonas áridas, sin embargo, hay poca información al respecto sobre balance hídrico, nutricional y ecofisiológico del cultivo bajo condiciones de estrés salino.

## **I.1 Estado actual del agua en Coahuila**

La escasez de agua en el mundo es una limitante para el desarrollo y bienestar humano y de su entorno. La presión que se ejerce a los recursos hídricos incrementa en el sector industrial, doméstico y agropecuario año con año debido al aumento demográfico. Dicha presión es más acentuada en zonas áridas y semiáridas, a causa de la naturaleza del ecosistema: alto índice de evapotranspiración, periodos de sequía de entre cuatro y seis meses y láminas de precipitación inferiores a 400 mm al año, con carácter torrencial y alta variabilidad espacial y temporal.

El estado de Coahuila se encuentra al norte de México, es el tercero con mayor extensión territorial del país con un área de 151 594.8 km<sup>2</sup>. De acuerdo a la clasificación de Köppen (1918) y adaptada por García (1990) en la región predominan los climas seco semicálido con lluvia de verano (BSohw) y muy seco semicálido con lluvia de verano (BWhw). La precipitación total media anual oscila entre 225.0 y 544.9 mm; la evapotranspiración real puede superar los 2000 mm al año (CONAGUA, 2022).

Las regiones hidrológico-administrativas a las que pertenece el territorio son Río Bravo y Cuencas Centrales del Norte, de las cuales nacen veintiocho acuíferos. En 2015 se reportó un déficit de 203 millones de m<sup>3</sup> en nueve de los acuíferos (DOF, 2015); para 2020 se incrementó la cifra en un 216.5 % alzando aproximadamente 643 millones de m<sup>3</sup> en 19 acuíferos (DOF, 2020) (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de los acuíferos en Coahuila. El color rojo y verde representan a los acuíferos con una con recarga negativa (déficit) y positiva, respectivamente.  
Fuente: Elaboración propia con datos de DOF (2020).

El problema de agua no solo se centra en cantidad, sino también en calidad; en 83 % de los 54 sitios de muestreo de la red de agua subterránea para Coahuila se reportó una conductividad eléctrica promedio de  $0.9 \text{ dS m}^{-1}$  (agua para riego de cultivos tolerantes a salinidad), mientras que en 17 % restante este factor obtuvo un valor promedio de  $1.79 \text{ dS m}^{-1}$  (indeseable para riego) (CONAGUA, 2021b).

## **I.2 Problemas derivados de la falta de agua**

Las consecuencias de la escasez de agua se acentúan al paso de los años, al incrementar la población también crece la presión sobre los recursos hídricos. El desabasto de agua en las zonas urbanas y rurales es una realidad que viven los habitantes de los 38 municipios de la entidad (INFONOR, 2022); la escala de severidad va desde cortes de un día hasta la falta total de agua por dos semanas, pudiéndose alargar cuando la sequía se hace presente (Milenio, 2022; Vanguardia, 2021).

Fernando Cantú González, presidente de la Unión Regional Ganadera de Coahuila (URGC) señaló entre un 20 a 30 % de pérdida de cabezas de ganado a causa de la falta de agua en la región; los animales mueren a causa de deshidratación o inanición por la ausencia de vegetación en los agostaderos (La Jornada, 2022; Vanguardia, 2022).

Los conflictos por obtener el suministro de agua se hacen ver entre los pobladores de la región sureste, productores agrícolas obtienen concesiones por parte de CONAGUA a pesar de la sobreexplotación del acuífero General Cepeda y las comunidades aledañas a tal acuífero sufren los estragos en su vida cotidiana (Vanguardia, 2021b).

De los 10 625 títulos y permisos de aguas nacionales otorgados para el aprovechamiento de aguas subterráneas en el estado de Coahuila el 35 % corresponden al sector agrícola, sin embargo, el volumen de este uso consuntivo asciende al 59 % del volumen total (CONAGUA, 2023). La mayor superficie cultivada de la entidad se encuentra bajo la modalidad de riego (126 414 hectáreas) (SIAP, 2022) dentro de la cual las especies que se aprovechan se enlistan en el Cuadro 1:

**Cuadro 1.** Superficie de cultivos bajo riego en el estado de Coahuila.

Fuente: Elaboración propia con los datos abiertos del SIAP (2021a)

<b>Cultivo</b>	<b>Superficie sembrada (ha)</b>	<b>Superficie cosechada (ha)</b>
<b>Sorgo forrajero en verde</b>	20382.4	20382.4
<b>Alfalfa verde</b>	19730.95	19730.95
<b>Maíz forrajero en verde</b>	19226.86	19226.86
<b>Nuez</b>	20880.64	15559.21
<b>Avena forrajera en verde</b>	14553.5	14553.5
<b>Algodón hueso</b>	11390.72	11390.72
<b>Manzana</b>	4467	4390
<b>Trigo grano</b>	3889	3889
<b>Melón</b>	3579.5	3579.5
<b>Maíz grano</b>	3515	3515
<b>Sorgo grano</b>	1187	1187
<b>Sandía</b>	792.5	792.5
<b>Uva</b>	663.3	622.8
<b>Tomate rojo (jitomate)</b>	422.1	422.1
<b>Chile verde</b>	403.1	403.1
<b>Papa</b>	310	310
<b>Frijol</b>	222	222
<b>Calabacita</b>	208	208
<b>Pepino</b>	184	184
<b>Espárrago</b>	155	155
<b>Cebolla</b>	138	138
<b>Tomate verde</b>	55	55
<b>Granada</b>	29	27
<b>Durazno</b>	23	23
<b>Ajo</b>	5	5
<b>Nopalitos</b>	2	2

Los resultados del compendio de indicadores 2018 del estado de Coahuila de Zaragoza señalan que aproximadamente el 79 % del riego utilizado en la entidad es de tipo rodado, 14% aspersion automatizada y 4.5 % riego automatizado (SADER, 2019).

El bajo nivel tecnológico de tipo de riego en la región desperdicia la poca agua que se tiene al perderse por evaporación, percolación o escorrentía teniendo una eficiencia de aplicación en campo del 60 % (Rai *et al.*, 2017a).

### **I.3 Opciones para mejorar la eficiencia de aplicación de riego**

Una de las alternativas para garantizar el suministro adecuado de agua a los cultivos es el riego por goteo; es un método cuya eficiencia de aplicación se puede elevar hasta el 95 % debido a que se administra el agua en la zona radical de la planta (Hochmuth, 2017). Es un tipo de riego que tiene una alta afinidad para ser automatizado y combinado con la inyección de fertilizantes, lo que aumenta la disponibilidad de nutrientes y, en general, mejora el sistema de producción.

La adopción del sistema de riego por goteo es limitada por los altos costos iniciales de inversión, además de la sustitución del material (emisores y tubería) cada temporada, dependiendo de la calidad del material y las condiciones ambientales del sitio (Hochmuth, 2017; Rai *et al.*, 2017b).

Las estructuras de agricultura protegida ayudan a evitar la evaporación del agua y reducir la evapotranspiración de los cultivos, principalmente al disminuir la radiación que incide sobre estos (Abou Hadid, 2013; Nicola *et al.*, 2020). El acolchado plástico es una técnica que mejora la eficiencia de uso del agua al conservar la humedad en el suelo y reducir su evaporación (Shah & Wu, 2020).

A pesar de las ventajas mencionadas en el párrafo anterior, la degradación y el almacenamiento de los materiales plásticos utilizados en la agricultura es un problema que contribuye a la contaminación del suelo (Sa'adu & Farsang, 2023). Los materiales más utilizados en la agricultura usualmente son: polietileno de baja densidad (LDPE), cloruro de polivinilo (PVC), acetato de etilenvinilo (EVA) y polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) (UNEP, 2021). La vida media útil de un plástico de LDPE oscila entre 1 y 3 años (Babaghayou *et al.*, 2021; Dehbi *et al.*, 2015).



#### **I.4 Investigaciones encaminadas a mejorar la productividad del uso del agua**

Existen estrategias que se han desarrollado para disminuir los aportes de agua e incrementar su productividad sin comprometer significativamente la producción del cultivo, especialmente en regiones áridas y semiáridas que no cuentan con los recursos hídricos necesarios.

La baja productividad de riego se debe en gran parte a la programación deficiente, sin calcular la dosis, frecuencia y lugar que realmente necesita el cultivo. El riego de precisión se basa en la premisa de aportar la cantidad necesaria de agua en el momento indicado y en forma disponible en la rizósfera, para cubrir la demanda de evapotranspiración real de la planta (Brahmanand & Kumar Singh, 2022).

En el estudio desarrollado por Brar *et al.* (2022) quienes trabajaron con frijol mungo, maíz y trigo en un sistema de fertirriego por goteo subterráneo, los tratamientos que recibieron el 80 % de la evapotranspiración potencial del cultivo y el 80 % de las necesidades nutricionales registraron un incremento del 65.6 % en la productividad del agua de riego en comparación con el sistema de producción bajo riego por inundación y suministro de fertilizantes directamente al suelo. Además, la lámina de riego y el uso de fertilizantes disminuyeron en un 28.5 y 20 %, respectivamente.

Otra práctica usual es el Riego Deficitario (RD), que consiste en el suministro insuficiente de agua por debajo de los niveles de evapotranspiración requerida de los cultivos. En la literatura podemos encontrar dos tipos de RD, el Riego Deficitario Sostenido (RDS) y el Riego Deficitario Controlado (RDC) (Chai *et al.*, 2016; Khapte *et al.*, 2019). El RDS es la disminución del aporte de riegos en todas las fases fenológicas del cultivo, y en el RDC solo se limita el abastecimiento en etapas específicas que no causen daños irreversibles en la planta ni comprometan su productividad (e.g. germinación, brotación, floración, cuajado de fruto) (Reddy, 2016).

En el experimento llevado a cabo por García-Tejero *et al.* (2010) en árboles de naranjo (*Citrus sinensis* L.) de seis años de edad en la temporada de 2005 a 2007 indicó que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento control (100 % ETc) y los tratamientos de RD (75, 65 y 50 % ETc) en el rendimiento de cultivo, en contraste, el tratamiento 50 % ETc tuvo los valores más altos de sólidos solubles totales en comparación a los otros tratamientos.

De manera similar se ha documentado que en el cultivo de granado (*Punica granatum* L. cv 'Mollar de Elche') en el ciclo 2009 al 2011 bajo RDS (50 % ETc) tuvo un rendimiento similar al tratamiento control (100 % ETc) de 21.8 y 21.3 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, y, por consiguiente, incrementó la productividad del agua en el tratamiento RDS (Laribi *et al.*, 2013).

El secado parcial de raíces (SPR) es una técnica de ahorro de agua que consiste en la división del sistema radical de una planta en dos partes donde solo una zona recibirá aporte de riego, alternando la zona de aplicación en función del tiempo (Jovanovic & Stikic, 2018).

En el cultivo de toronja (*Citrus x paradisi* Macf.) irrigado con dos líneas de goteo alternando el riego entre líneas cada mes (SPR) en la temporada 2014-2015, se cuantificó un aumento en la eficiencia del uso del agua con diferencias estadísticamente significativas en 81% en comparación con el tratamiento control con dos líneas de riego, sin afectar los criterios de diámetro de fruto, firmeza, jugo, sólido solubles totales, acidez titulable e índice de maduración (Kusakabe *et al.*, 2016).

Para poder implementar estas estrategias del ahorro de agua sin afectar significativamente el rendimiento y calidad de la cosecha se debe tener información suficiente en la agronomía, fenología y fisiología del cultivo que se quiera establecer.

Una de las técnicas que se combina para implementar el RD o el SPR es el sistema de división de raíces (SDR), que consiste en la fracción espacial del sistema radical en dos o más unidades con el fin de estudiar su morfología, fisiología y dinámica en función de estrés hídrico, salinidad o transporte de nutrientes (Giertych & Leski, 2023). Es así que el SDR es un método eficiente para probar de una manera controlada la heterogeneidad del suelo o sustrato.

Shani *et al.* (1993) trabajaron con plantas de vid (*Vitis vinífera* L.) sometidas a SDR y condiciones de salinidad ( $9 \text{ dS m}^{-1}$ ) en donde las plantas que recibieron agua salina y posteriormente agua dulce ( $1.5 \text{ dS m}^{-1}$ ) aumentaron la tasa de absorción de agua en el momento que cambiaron a la solución de menor conductividad eléctrica. En plantas de maíz (*Zea mays* L.) sometidas a SPR por medio de SDR se demostró que hubo una redistribución hidráulica en las plantas que se sometieron a una sequía local (de un lado riego y del otro se omitió) dado los ajustes metabólicos y fisiológicos (Werner *et al.*, 2022).

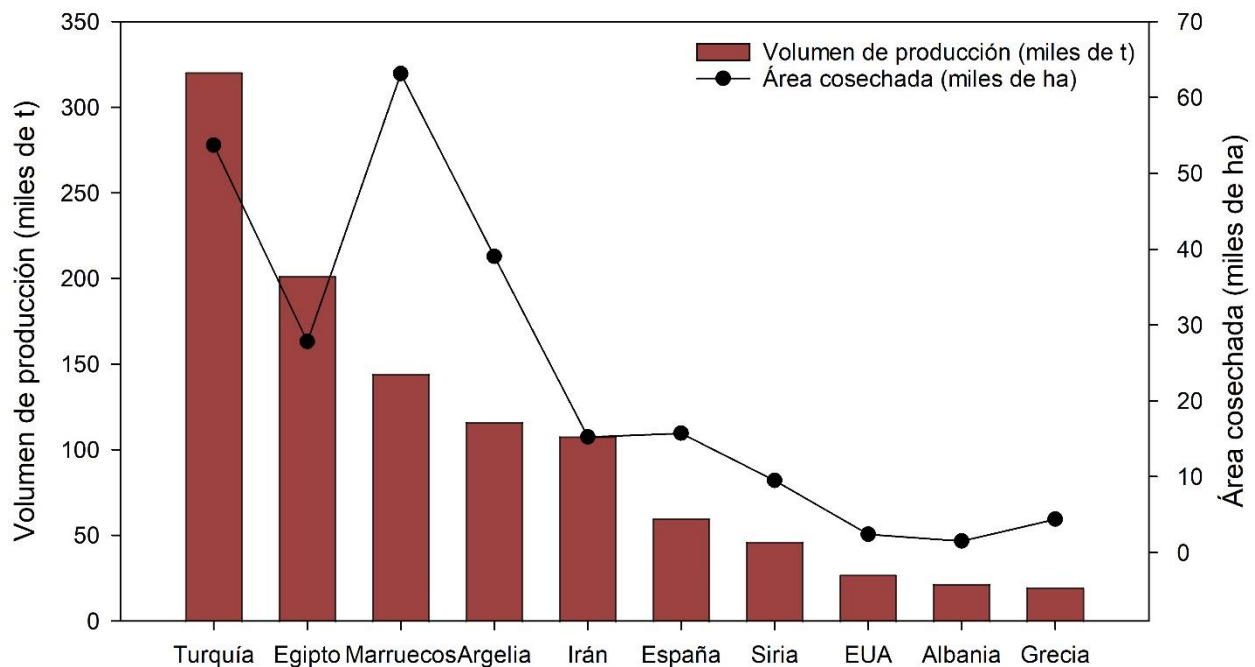
### **I.5 La higuera como alternativa de cultivo en zonas áridas**

La higuera (*Ficus carica* L.) es un cultivo que ha tomado valor en el estado en los últimos años debido a que el mercado de exportación a Estados Unidos de América demanda más fruto; además su alta afinidad a las condiciones climáticas e hídricas de la región lo hace un cultivo selecto para diversificar la producción, por lo que el Gobierno del Estado ha estado impulsando el establecimiento de huertas de higo (El Financiero, 2018; El Diario de Coahuila, 2020; Gobierno De Coahuila, 2021; Grupo Milenio, 2022).

La higuera es un árbol o arbusto originario de la región de oriente medio, que por años se ha cultivado en la cuenca del Mediterráneo, parte de Asia y en América con los primeros conquistadores; se le ha catalogado como una especie tolerante al estrés salino e hídrico (Hemaid *et al.*, 2017; Zarei *et al.*, 2016).

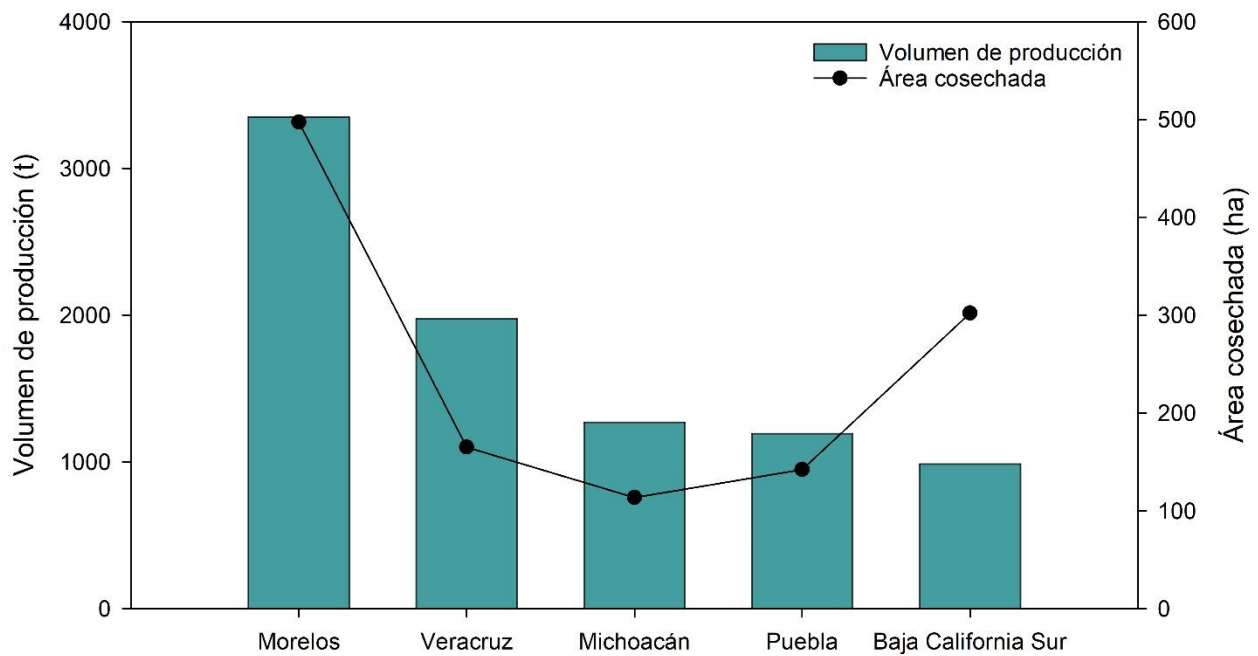
En 2021 se reportó una producción de 1,348,254 toneladas de higo en el mundo de los cuales, Turquía y Egipto aportan cerca del 46 % del producto, seguidos por Marruecos, Argelia, Irán y España cuyo valor en conjunto suman alrededor del 30 % (Figura 2) (FAOSTAT, 2022a). En este mismo año el rendimiento promedio mundial fue de 4.5 t ha<sup>-1</sup> en condiciones de temporal, 6 % menor que en 2020 (4.8 t ha<sup>-1</sup>) pero 32 % mayor en comparación a 2012 (3.4 t ha<sup>-1</sup>).

El valor de importaciones universales de higo en fresco en 2021 fue de 290 millones de USD, mientras que en higos secos fue de 499 millones de USD; los continentes que importan el producto en seco fueron Asia y Europa con un 45 % y 42 %, respectivamente, asimismo, Europa controló el mercado de importación con valor de 71 % del total mundial (FAOSTAT, 2022b).



**Figura 2.** Área cosechada y Producción de Higo a nivel Mundial  
Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT (2022a)

En 2019 México reportó una producción de 9,466.45 t de la infrutescencia en territorio mexicano siendo Morelos, Veracruz, Michoacán, Puebla y Baja California Sur los estados con las cifras más altas de 3,351, 1,980, 1,274, 1,199 y 992 t, respectivamente (Figura 3). Veracruz el estado que presenta el mayor rendimiento con un valor de 12 t ha<sup>-1</sup>, el resto de la producción nacional oscila entre 5 y 11 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2021).



**Figura 3.** Producción de Higo en México  
Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2020)

## I. 6 Investigaciones sobre la agronomía y fisiología de *Ficus carica* L.

La higuera es una especie medianamente versátil que se puede adaptar a climas subtropicales y templados, aunque su óptimo se encuentra en climas cálidos con una temperatura óptima de entre 15 y 36° C (Hiwale, 2015). Los suelos bien drenados y pesados son adecuados para el cultivo de la higuera, y el rango de pH oscila entre 7 y 8. Los suelos de zonas áridas y semiáridas de naturaleza alcalina no son limitantes para el crecimiento de la higuera; es tolerante a la salinidad y periodos de sequía (Vázquez Yañes, 1999). Los requerimientos hídricos pueden oscilar desde los 400 mm (Lobos et al., 2017) hasta 1800 mm al año (Srinivas, 2015).

En general en México se desconocen muchos aspectos del manejo agronómico de la higuera ya que se cultiva en su mayoría bajo condiciones de temporal, teniendo poca información disponible sobre sistemas intensivos de producción como podas de formación, manejo integrado de plagas y enfermedades, nutrición y riego de precisión (Mendoza-Castillo *et al.*, 2017).

En un cultivo en invernadero bajo hidroponía con una densidad de 12 500 plantas por hectárea y ocho ramas por árbol, Mendoza-Castillo *et al.* (2017) reportaron un rendimiento de 109.5 t ha<sup>-1</sup> con un índice de cosecha<sup>1</sup> de 0.57. En 2019 se publicaron las curvas de extracción de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn) de hoja, tallos y frutos en el cultivar Nezahualcóyotl; las hojas fueron el órgano de mayor demanda para N, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn mientras que el tallo fue el que acumuló mayor cantidad de P (Mendoza-Castillo *et al.*, 2019).

Caruso *et al.* (2017) experimentaron con plantas de un año variedad Dottato bajo diferentes regímenes de riego (120 %, 60 % y 40 % de ETc) sin reportar reducciones significativas en la biomasa seca entre el tratamiento de irrigación completa y el tratamiento deficitario al 60 % de la ETc. Zarei *et al.* (2016) reportaron tolerancia a la salinidad de plantas *F. carica* cv. *Sabz* X *F. carica* cv. *Khormaeiicon* por la exclusión del ion Na<sup>+</sup> a la parte aérea y acumulación en raíz bajo sustrato con CE de 6 dS m<sup>-1</sup>.

---

<sup>1</sup> Porcentaje que representa el rendimiento del cultivo del órgano de interés del total de la materia seca de la planta

En el proyecto de tesis de maestría desarrollado en 2021 por Altamirano Pacheco (2022) para estudiar la respuesta de árboles de *F. carica* a tratamientos de riego salino controlado mediante división radical en dos compartimentos, el autor no reportó diferencias estadísticamente significativas entre plantas. Los tratamientos de este experimento se describen en el Cuadro 2. Se determinó que no existió efecto de los tratamientos en el rendimiento de las plantas de higuera registrando un rendimiento promedio de 1.8 kg m<sup>-2</sup>. El diámetro de fruto en T4 y T3 fue en promedio 8 % menor que en T2 y T1. Con los datos de las variaciones micro morfológicas del tallo se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y en promedio, un crecimiento anual de 36.2, 32.2, 30.1 y 28.4 mm para T1, T2, T3 y T4, respectivamente. En términos de balance hídrico se encontró que T4 disminuyó en 31 % la lámina de evapotranspiración real del cultivo en comparación a T2.

**Cuadro 2.** Tratamientos de riego aplicados a árboles de *F. carica* en el experimento de Altamirano Pacheco (2022)

Tratamiento	Conductividad eléctrica de la solución de riego (dS m <sup>-1</sup> )	
	Compartimento 1	Compartimento 2
<b>T1</b>	3.0	3.0
<b>T2</b>	1.8	3.0
<b>T3</b>	1.8	6.0
<b>T4</b>	6.0	6.0

La dinámica de crecimiento de raíces en el estudio anterior y en otros proyectos no se menciona ni se discute, siendo de gran relevancia para hacer un manejo de precisión en el cultivo. Si se conoce la zona activa de absorción de las raíces y los factores que causan un efecto sobre estas, se puede utilizar esta información para que la toma de decisiones sea más sólida, con el objetivo de disminuir la cantidad de agua a aportar sin causar impactos negativos en la producción y rendimiento.

## II. HIPÓTESIS

La exposición de las raíces a diferentes niveles de sal en la solución nutritiva altera los términos del balance hídrico sin afectar el desarrollo de los órganos vegetativos, reproductivos y la dinámica de crecimiento de las raíces en higuera (*Ficus carica* L. var “Black Mission”).

## III. OBJETIVOS

### III.1 Objetivo general

Estudiar la velocidad de crecimiento vegetativo y reproductivo en higuera y la dinámica de absorción de agua en función de los términos del balance hídrico y de las variaciones de la conductividad eléctrica de la solución de fertirriego.

### III.2 Objetivos particulares

- Determinar las necesidades hídricas del cultivo a partir del balance hídrico.
- Caracterizar el desarrollo vegetativo y reproductivo del higo de acuerdo a su ecofisiología.
- Estimar el crecimiento de la raíz por medio de imágenes dentro del sustrato.
- Explorar la relación entre la capacitancia bioeléctrica y el volumen del sistema radical expuesto a diferentes niveles de conductividad eléctrica en la solución nutritiva.



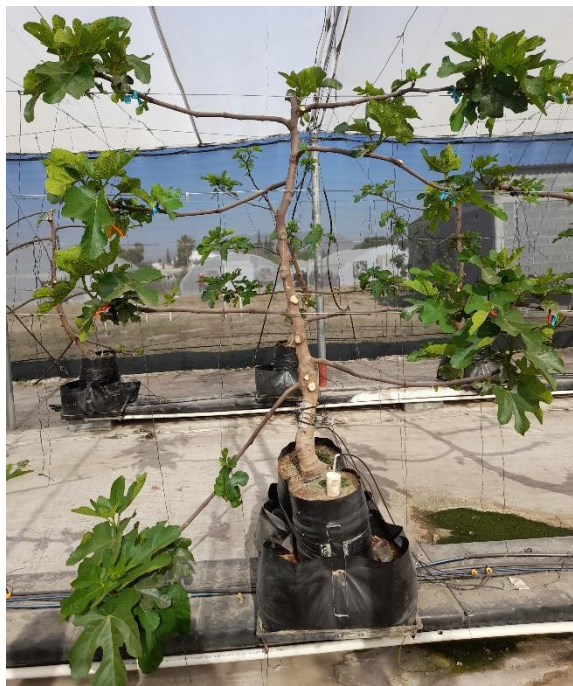
## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### IV. 1 Localización del experimento

El ensayo se llevó a cabo en una casa de malla sombra de 561 m<sup>2</sup> de superficie en las instalaciones del departamento de Biociencias y Agrotecnología del CIQA-CONAHCYT, ubicado en la ciudad de Saltillo, Blvd. Enrique Reyna Herosillo, n 140 (Coordenadas GPS: N 25° 27' 38.458"; O 101° 58' 08.00", a 1500 msnm).

### IV. 2 Material vegetal

Se utilizaron árboles de higuera de la variedad "Black Mission" de 2 años de edad con sistema radical dividido en dos compartimentos, cada uno en una bolsa de polietileno negro de 80 litros, con mezcla de sustratos de zeolita, perlita y peatmoss en fracción de volumen 1:1:3 respectivamente. En diciembre de 2021 se realizó una poda de formación dejando una rama central y 8 ramas laterales, las cuales se guiaron mediante tutores metálicos horizontales separados de 40 cm entre sí a partir de 1 m de suelo como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Sistema de conducción de ramas laterales en árbol de *F. carica*

### IV. 3 Marco de plantación y sistema de fertirriego

El ensayo constó de 56 plantas repartidas en 4 filas de 14 plantas cada una. El marco de plantación fue de 3.66 m entre filas y 2 m entre plantas de la misma fila.

La lámina de riego se definió considerando la capacidad de retención de agua del sustrato y la evapotranspiración real del cultivo, calculando la fracción de lavado con la Ecuación 1, para mantener las condiciones de pH y CE requeridas en los tratamientos, aplicando en promedio 5 riegos al día.

$$RL = \frac{CE_w}{5(CE_e) - CE_w} \times 100$$

**Ecuación 1.** Fracción de lavado

Donde:

RL = Requerimiento de lixiviación, %

CE<sub>w</sub> = Conductividad eléctrica del agua de riego, dS m<sup>-1</sup>

CE<sub>e</sub> = Conductividad eléctrica deseada en el drenaje, dS m<sup>-1</sup>

Los aportes de riego y nutrición se realizaron mediante sistema de riego localizado con el autómata Netajet y el programador NMC-PROL marca NETAFIM con control de dosificación mediante monitoreo continuo de pH y CE. La distribución del agua se realizó mediante tuberías de PVC y mangueras de polietileno, considerando un solo ramal por hilera de árboles y 4 goteros por árbol, 2 en cada compartimento de raíces (uno de 2 L h<sup>-1</sup> y otro de 4 L h<sup>-1</sup>).

La estimación de la ETo se realizó a partir de los datos de variables climáticas (temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento) registrados por estación meteorológica de la marca ADCON, instalada dentro de la casa de malla sombra.

#### IV. 4 Nutrición del cultivo

Durante toda la fase experimental se consideró una solución nutritiva de referencia ( $SN_{ref}$ ) cuyos detalles se desglosan en el Cuadro 3 (Melgarejo *et al.*, 2007) con un pH de 6.5 y una CE de  $3 \text{ dS m}^{-1}$ .

**Cuadro 3.** Concentración de nutrientes en solución nutritiva de referencia para cultivo de higo

Aniones ( $\text{mmol L}^{-1}$ )				Cationes ( $\text{mmol L}^{-1}$ )					Micronutrientes ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )					
$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Na}^+$	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
12	2	2	0	0.5	7.5	4	2	0	12.50	0.62	3.63	0.34	11.82	0.06

Los fertilizantes comerciales utilizados para preparar un concentrado (20 veces) de la  $SN_{ref}$  en contenedores de 1000 L de volumen se enlistan en el Cuadro 4. Para incrementar la CE de la  $SN_{ref}$  de 3 a 6  $\text{dS m}$  ( $SN_{sal}$ ) se ocupó un contenedor adicional donde se mezclaron tres sales (cloruro de calcio, cloruro de sodio y sulfato de magnesio) conservando siempre un valor cercano a 2 del índice Ca/Mg para minimizar un posible riesgo de antagonismo entre ambos iones. La aplicación de fertilizantes se realizó siempre mediante un autómata de inyección con una tasa de inyección de  $50 \text{ L m}^{-3}$  y un monitoreo continuo del pH y de la CE de la solución de riego.

**Cuadro 4.** Concentración de fertilizantes comerciales empleados en la solución madre de nutrición

Contenedor	Fertilizante	Grado comercial	Concentración ( $\text{g L}^{-1}$ )
1	Nitrato de calcio	15.5-0-0 26CaO	3.7
	Ácido nítrico	59 %, $1.37 \text{ g cm}^{-3}$	14.33
2	Nitrato de potasio	13.5-0-46 99 %	4.6
	Nitrato de amonio	31-4-0	0.6
	Fosfato monopotásico	0-52-34	5.43
	Sulfato de potasio	0-0-52 18 S	5.59
	Micronutrientes	Polvo soluble	0.37

<b>3</b>	Sulfato de magnesio 0-0-0 16.5MgO, 12S heptahidratado		7.47
	Cloruro de calcio	93 %	4.65
	Cloruro de sodio	99.55 %	11.83

**Cuadro 5.** Aporte de nutrientes por tratamiento

<b>Elemento</b>	<b>Kg de elemento por tratamiento</b>			
	T1	T2	T3	T4
<b>N</b>	14.883	7.441	7.441	14.883
<b>P</b>	11.694	5.847	5.847	11.694
<b>K</b>	52.702	26.351	26.351	52.702
<b>Mg</b>	2.958	1.479	4.362	8.724
<b>Ca</b>	9.315	4.658	11.424	22.848
<b>S</b>	13.278	6.639	10.523	21.047
<b>Cl</b>	0.000	0.000	43.067	86.135
<b>Na</b>	0.000	0.000	20.167	40.334
<b>Fe</b>	0.145	0.073	0.073	0.145
<b>Zn</b>	0.014	0.007	0.007	0.014
<b>Mn</b>	0.013	0.007	0.007	0.013
<b>Cu</b>	0.001	0.001	0.001	0.001
<b>B</b>	0.013	0.007	0.007	0.013
<b>Mo</b>	0.029	0.015	0.015	0.029

## IV.5 Tratamientos

Para estudiar el efecto de dos niveles de conductividad eléctrica de la solución de riego (3 y 6 dS m<sup>-1</sup>) combinados con dos opciones de su lugar de aplicación, sea en uno solo o en ambos compartimentos receptores del sistema radical de la planta, se diferenciaron 4 tratamientos tal como se describe a continuación (Cuadro 6):

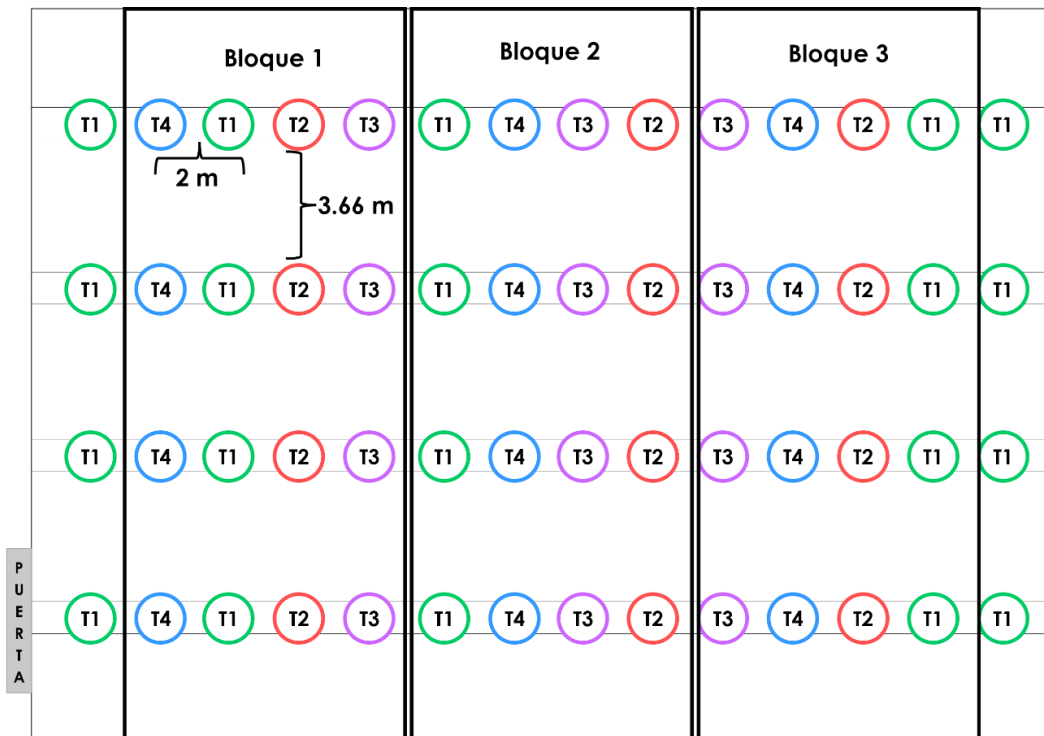
- T1: la planta recibe SN<sub>ref</sub> (CE = 3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de raíces (etiquetados T1A\_CE<sub>3.0</sub> y T1B\_CE<sub>3.0</sub>).
- T2: la planta recibe SN<sub>ref</sub> (CE = 3 dS m<sup>-1</sup>) en un compartimento (etiquetado T2A\_CE<sub>3.0</sub>) y agua de pozo (CE = 1.7 dS m<sup>-1</sup>) en el otro (etiquetado T2B\_CE<sub>1.7</sub>).

- T3: la planta recibe  $SN_{sal}$  ( $CE = 6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en un compartimento (etiquetado T3A\_  $CE_{6.0}$ ) y agua de pozo ( $CE = 1.7 \text{ dS m}^{-1}$ ) en el otro (etiquetado T3B\_  $CE_{1.7}$ ).
- T4: la planta recibe  $SN_{ref}$  ( $CE = 6.0 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de raíces (etiquetados T4A\_  $CE_{6.0}$  y T4B\_  $CE_{6.0}$ ).

**Cuadro 6.** Descripción de los tratamientos en función de la Conductividad Eléctrica

Tratamiento	Compartimento 1				Compartimento 2			
	Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )				Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )			
	Agua de pozo	Nutrientes	Sales ( $\text{CaCl}_2$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{NaCl}$ )	Solución de riego	Agua de pozo	Nutrientes	Sales ( $\text{CaCl}_2$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{NaCl}$ )	Solución de riego
T1	1.7	1.3	0	3	1.7	1.3	0	3
T2	1.7	0	0	1.7	1.7	1.3	0	3
T3	1.7	0	0	1.7	1.7	1.3	3	6
T4	1.7	1.3	3	6	1.7	1.3	3	6

Cada tratamiento incluyó 12 plantas repartidas en 3 repeticiones distribuidas según un diseño experimental de bloques al azar. Para monitoreo y colecta de datos se consideraron los 2 árboles centrales de cada unidad experimental (Figura 5).



**Figura 5.** Diagrama de la distribución de tratamientos en la casa de malla sombra

## IV. 6 Variables climáticas

Se colectaron datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento mediante una estación meteorológica marca Campbell Scientific ubicada al exterior y otra estación meteorológica de la marca ADCON instalada al interior de casa de malla sombra para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), del déficit de presión de vapor y de los grados de crecimiento del cultivo.

## IV. 7 Variables de manejo de fertirriego

### IV. 7. 1 Aportes de agua de riego y drenaje

En cada compartimento de raíces se instalaron dos caudalímetros de pulsos para dar seguimiento a las entradas y salidas de agua de riego y drenaje, respectivamente; el primer caudalímetro quedó instalado debajo del gotero y el segundo se instaló a la salida del compartimento radical para registrar el caudal de agua de drenaje tal como se muestra en la Figura 6. Cada caudalímetro se conectó a un datalogger de la marca Campbell Scientific para lectura, registro de datos y almacenamiento en continuo. El monitoreo se realizó en 3 árboles por tratamiento.



**Figura 6.** Instalación de caudalímetros de pulso para medir aportes de riego y drenaje en *Ficus carica*

#### **IV. 7. 2 pH y conductividad eléctrica de la solución de drenaje**

Se tomaron 3 muestras del agua drenada de cada compartimento donde se encuentra la raíz, después del primer evento del riego en la mañana para medir los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) (medidor de bolsillo pH/CE/TDS marca HANNA modelo HI98130) (Figura 7).

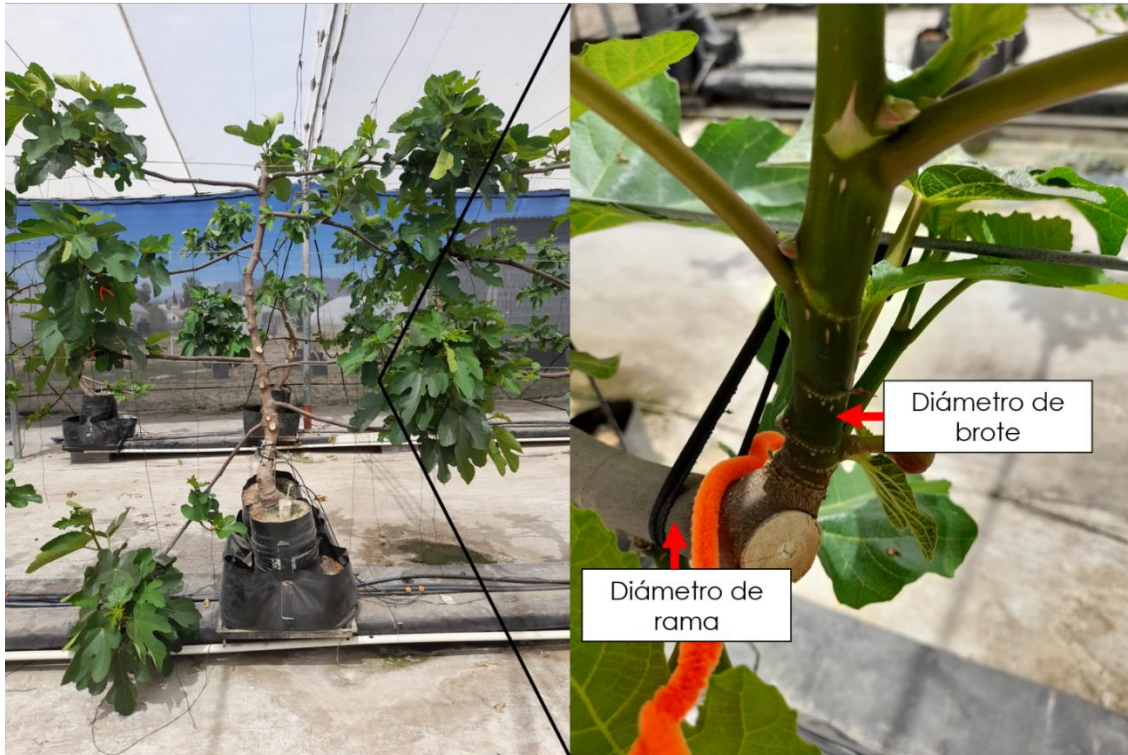


**Figura 7.** Medición de pH y CE en el agua de drenaje de *Ficus carica*

### **IV. 8 Variables biométricas y ecofisiológicas de la planta**

#### **IV. 8. 1 Crecimiento vegetativo**

Se tomaron mediciones del diámetro basal de rama (Figura 8A), diámetro de brote y longitud del brote (Figura 8B) de 18 ramas por tratamiento utilizando un vernier y cinta métrica. La periodicidad de medición fue de 15 días. Con los datos obtenidos se calculó la velocidad de crecimiento relativo a la unidad de tiempo y a la unidad métrica del valor inicial de cada variable.



**Figura 8.** Toma de datos en *F. carica* de diámetro de rama basal y diámetro de brote

#### **IV. 8. 2 Crecimiento del fruto**

En cada uno de los tres árboles por tratamiento, se marcaron tres brotes del año en los cuales se dio seguimiento al diámetro ecuatorial y polar de 3 frutos consecutivos desde la base del brote utilizando un vernier digital (Figura 9). El primer dato se registró cuando los frutos alcanzaron 5 mm de diámetro ecuatorial seguido por una lectura cada 15 días (Soberanes-Pérez *et al.*, 2020); cuando el fruto alcanzó la madurez, se cosechó y se pesó en una balanza digital (OHAUS Mod). Las evaluaciones de cosecha se realizaron 3 veces por semana en la etapa de producción, para obtener el rendimiento por planta y por tratamiento.





**Figura 9.** Crecimiento y desarrollo de sicono de higo

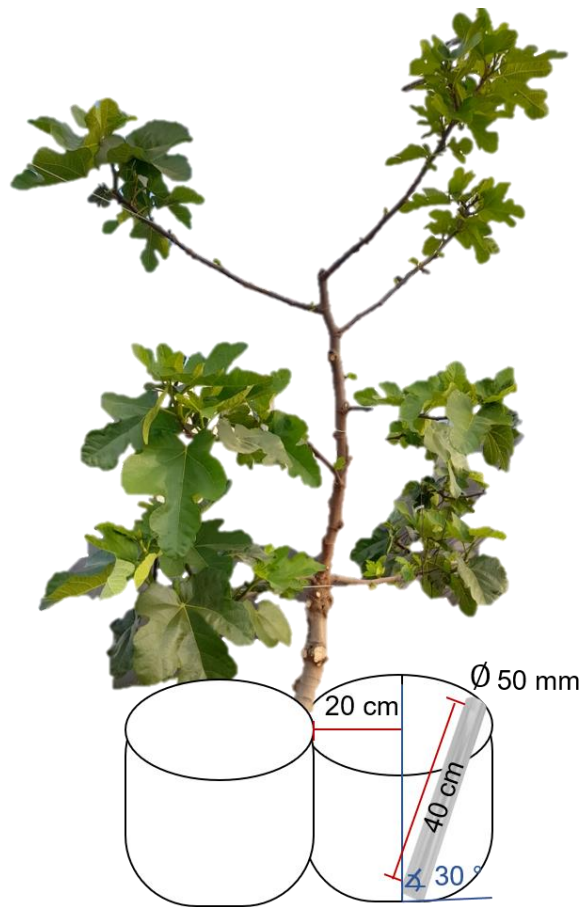
#### **IV. 8. 3 Crecimiento de raíces**

El seguimiento al crecimiento de raíces se hizo mediante análisis de imágenes digitales que se capturaron cada 15 días en la zona radical de tres árboles por tratamiento. En cada compartimento radical por árbol y a 20 cm del tronco se instaló un tubo de policarbonato transparente de 50 mm de diámetro y 40 cm de largo, formando un ángulo de 30° con la normal (Figura 10).

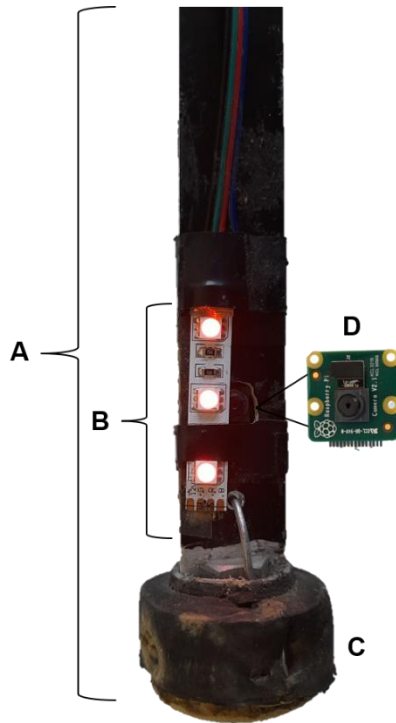
Se construyó un equipo semiportátil para la captura de imágenes montando una cámara de 8 megapíxeles (MP) para Raspberry Pi NOIR V2 infrarrojo sobre una lámina de aluminio, además se le añadió un sistema de iluminación LED (3 piezas) configurado en luz roja (Figura 11) alimentado con una batería de 6V. La cámara se conectó por cable al procesador Raspberry Pi 3 Model, que a su vez se vinculó por cable HDMI a un monitor, la accesibilidad se adecuó con teclado y mouse inalámbrico vinculado por puerto USB.

La toma de imágenes se realizó a 10, 20 y 30 cm de profundidad y en dirección tronco utilizando el equipo programado por los investigadores del DBA-CIQA siguiendo el método propuesto por Dannoura *et al.* (2008).

Para el preprocesamiento y procesamiento de imágenes se utilizó el programa R versión 4.2.3. Se segmentaron las imágenes con la librería “EBImage” en función de los niveles de intensidad de los píxeles diferenciando aquellos que pertenecían a la raíz y de los que eran sustrato, dando como resultado una imagen binaria. Posteriormente se etiquetaron los objetos, a los cuales se les calcularon el tamaño del área y el perímetro, expresado en píxeles. En el marco de datos, se hizo la sumatoria de estas dos características de los objetos por imagen y se dividió entre 14, 933.44 que es el número de píxeles que equivalen a 1 mm<sup>2</sup>.



**Figura 10.** Esquematización de la posición del tubo de acrílico dentro de los compartimentos de plantas de higuera (*Ficus carica* L. var “Black Mission) bajo división radical.



**Figura 11.** Equipo para la captura de imágenes de raíz dentro del sustrato en plantas de higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) bajo división radical. A) lámina de aluminio, B) iluminación LED, C) rondana de plástico, D) cámara de 8 MP.

#### **VI. 8. 4 Evolución del estado hídrico y de los intercambios gaseosos**

Para caracterizar el posible efecto de los tratamientos de fertirriego sobre el estado hídrico de la planta y los intercambios gaseosos a nivel foliar se ocupó un medidor de fotosíntesis portátil LI-6400XT (LICOR, Inc. Lincoln, Nebraska, E. U.) y una cámara de presión tipo Scholander (Plant Water Status Console, Model 3115), respectivamente. Para ello se realizaron dos evoluciones diarias, separadas a 35 días entre junio y julio durante el ciclo de producción 2022, tomando 6 lecturas por tratamiento desde el alba hasta la puesta del sol a intervalos de 2 horas.

Para realizar la evaluación se consideraron hojas sanas ubicadas en la parte norte de la planta, completamente desarrolladas, sin daños físicos y sin deficiencias nutricionales aparentes. Las hojas seleccionadas para medir el potencial hídrico fueron encerradas en bolsas de aluminio durante un mínimo de 90 minutos antes de tomar la lectura. Posteriormente, se retiró la hoja con ayuda de una cuchilla afilada y el látex que exudó, resultado de la escisión, se secó, luego se colocó la hoja dentro de la cámara de presión, se cerró y se comenzó a presurizar el gas nitrógeno hasta observar la formación de una lámina de agua sobre el peciolo.

#### **IV. 8. 5 Variaciones micro morfológicas del tronco**

Las variaciones micrométricas del tronco fueron registradas en continuo en tres árboles por tratamiento mediante sensores de desplazamiento lineal e inducción diferencial (LVDT, Solartron Metrology, Bognor Regis, UK, modelo DF  $\pm$  2.5 mm, precisión  $\pm$  10  $\mu$ m), ubicados en portasensores contruidos con Invar (aleación de Ni y Fe de coeficiente de dilatación térmica cercano a cero) y aluminio (Requena Co., España, modelo R-150 mm). Los sensores se instalaron a 20 cm desde el nivel del suelo y en el lado norte de los árboles para proteger el sensor de la incidencia directa de la radiación solar (Figura 12). La lectura de los sensores se hizo mediante dataloggers CR1000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA, modelo CR10 con multiplexor AM25T) realizando una lectura cada 10 segundos y registrando promedios cada 5 minutos.

A partir de las variaciones del diámetro del tronco se obtuvieron los siguientes índices: Máxima contracción diaria (MCD), máximo (MxDT) y mínimo (MnDT) diámetro del tronco (Goldhamer & Fereres, 2001).



**Figura 12.** Sensor LVDT instalado en tronco de *Ficus carica*

#### **IV. 8 Biocapacitancia**

Se utilizaron esquejes de higuera como modelo de biocapacitor introducido en una solución nutritiva de referencia  $SN_{ref}$  (Melgarejo *et al.*, 2007) diferenciada en cuatro tratamientos (Cuadro 6) incrementando su CE con una solución salina de NaCl (3.4 M). Los esquejes se tomaron de las plantas de higuera de dos años, cortados en el mes de diciembre de 2022 con una longitud y diámetro promedio de 35 cm y 1.66 mm, respectivamente. Posteriormente, se introdujeron en sustrato de perlita y se regaron dos veces por semana. En enero de 2023 se seleccionaron aquellos esquejes que presentaban por lo menos un brote de hoja. En el material vegetal se colocó una cinta doble cara carbón-carbón como electrodo alrededor del cuello del tallo principal, el segundo electrodo fue un trozo de grafito de 10 cm de largo (separado de un lápiz de carpintero) verticalmente insertado en la solución nutritiva.

Se hicieron evaluaciones puntuales de capacitancia con el equipo de medición de inductancia, capacitancia y resistencia (LCR meter marca TeGam modelo 3550) a frecuencia 42kHz y corriente de 1 V. La medición en continuo se realizó con un dispositivo Op-amp 741 controlado por un Arduino y conectado al circuito planta-solución nutritiva. El registro de la capacitancia se realizó cada 5 minutos en una planta a raíz desnuda sumergida en solución nutritiva. El volumen del sistema radical se determinó por desplazamiento del volumen equivalente de agua en un recipiente de referencia.

**Cuadro 7.** Tratamientos de experimento de Biocapacitancia en esquejes de *F. carica*

Tratamiento	Conductividad eléctrica de la solución nutritiva (dS m <sup>-1</sup> ) (A)	Conductividad eléctrica de la solución salina (dS m <sup>-1</sup> ) (B)	Conductividad eléctrica total (dS m <sup>-1</sup> ) (A+B)
T1	2.4	0	2.4
T2	3	0	3
T3	3	2.2	5.2
T4	3	3	6

#### IV. 9 Análisis estadístico

El análisis de varianza y prueba de medias de Fisher LSD ( $p \leq 0.05$ ) se realizaron con el paquete estadístico Infostat versión 2020 sobre las variables biométricas, crecimiento de raíces, capacitancia, intercambio gaseoso y variaciones micro morfológicas del tallo.

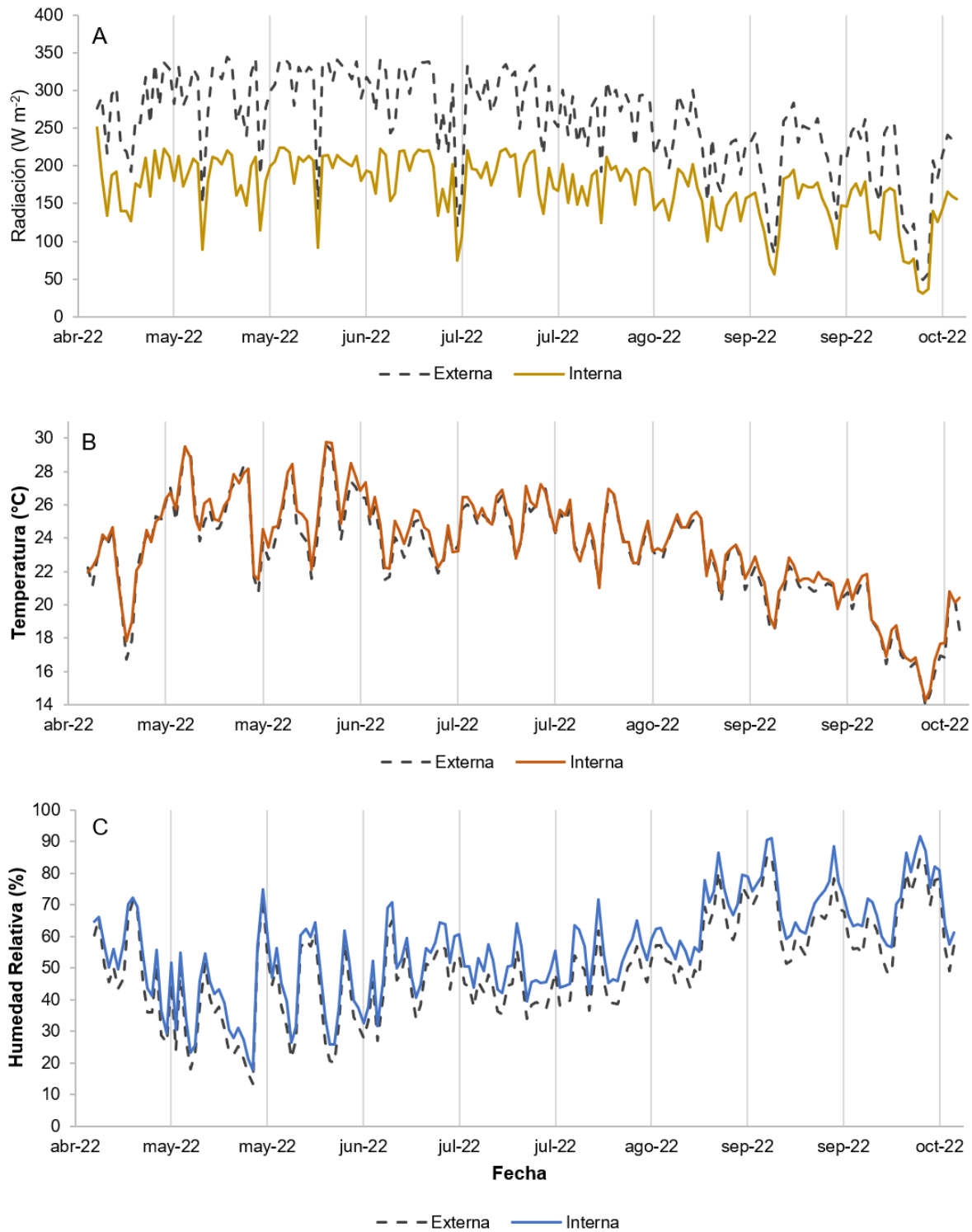
## V. RESULTADOS

### V. 1 Variables climáticas

Los valores promedio diarios de radiación solar, temperatura y humedad relativa al interior y exterior de la casa de malla sombra (CMS) del 18 de abril al 14 de octubre del 2022 se muestran en la Figura 13. El 15 de mayo se registró el máximo valor de radiación de  $344.42 \text{ W m}^{-2}$  al exterior y un 36 % menos ( $220.37 \text{ W m}^{-2}$ ) al interior de la CMS (Figura 13A).

Los promedios máximos diarios de temperatura se registraron el día 6 de junio con  $29.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $29.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en el exterior e interior, respectivamente. En contraste, el 7 de octubre dichos promedios fueron de  $14.27 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en el interior y  $13.91 \text{ }^{\circ}\text{C}$  al exterior de la CMS (Figura 13B).

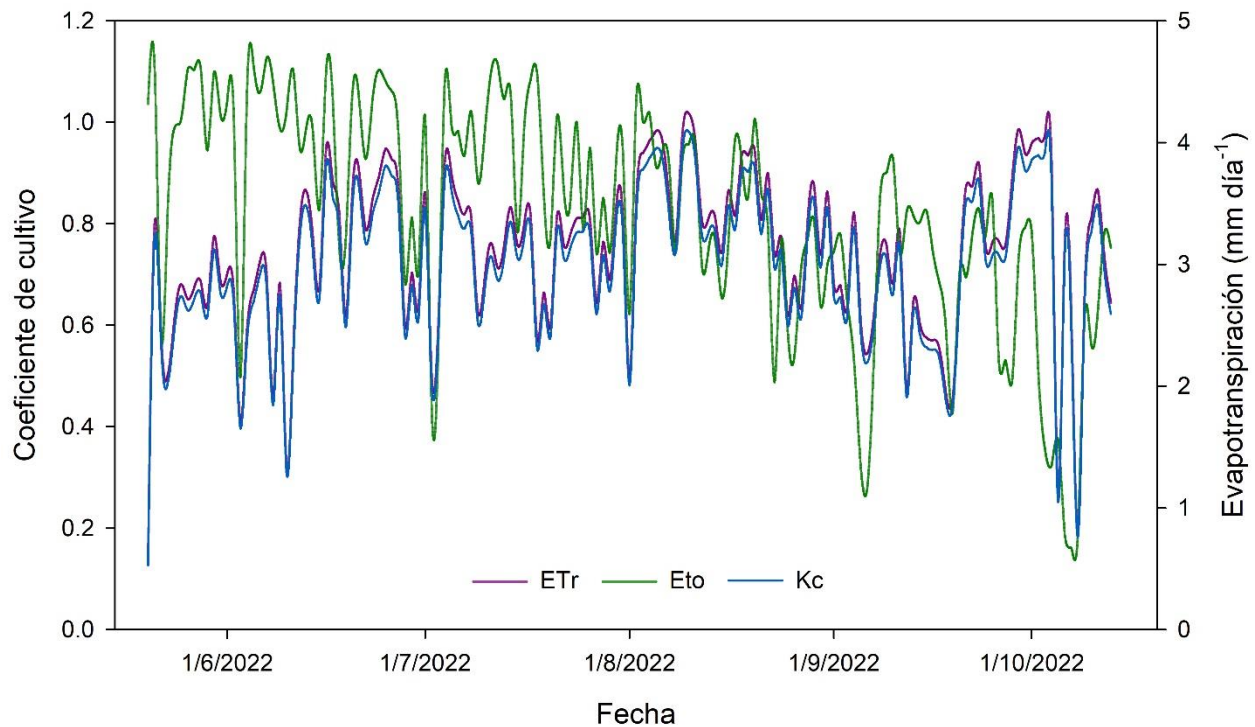
Entre el 15 de mayo y 15 agosto los promedios diarios de humedad relativa se mantuvieron por debajo del 70 %. Al comenzar septiembre hubo un alza en los valores hasta alcanzar el pico máximo el día 7 de octubre con un porcentaje promedio de 91.71 y 84.95 en el interior y exterior de la CMS, respectivamente (Figura 13C).



**Figura 13.** Evolución de variables climáticas al interior y exterior de la casa de malla sombra durante el ciclo 2022 en el cultivo de higuera. A) Radiación solar, B) Temperatura, C) Humedad Relativa



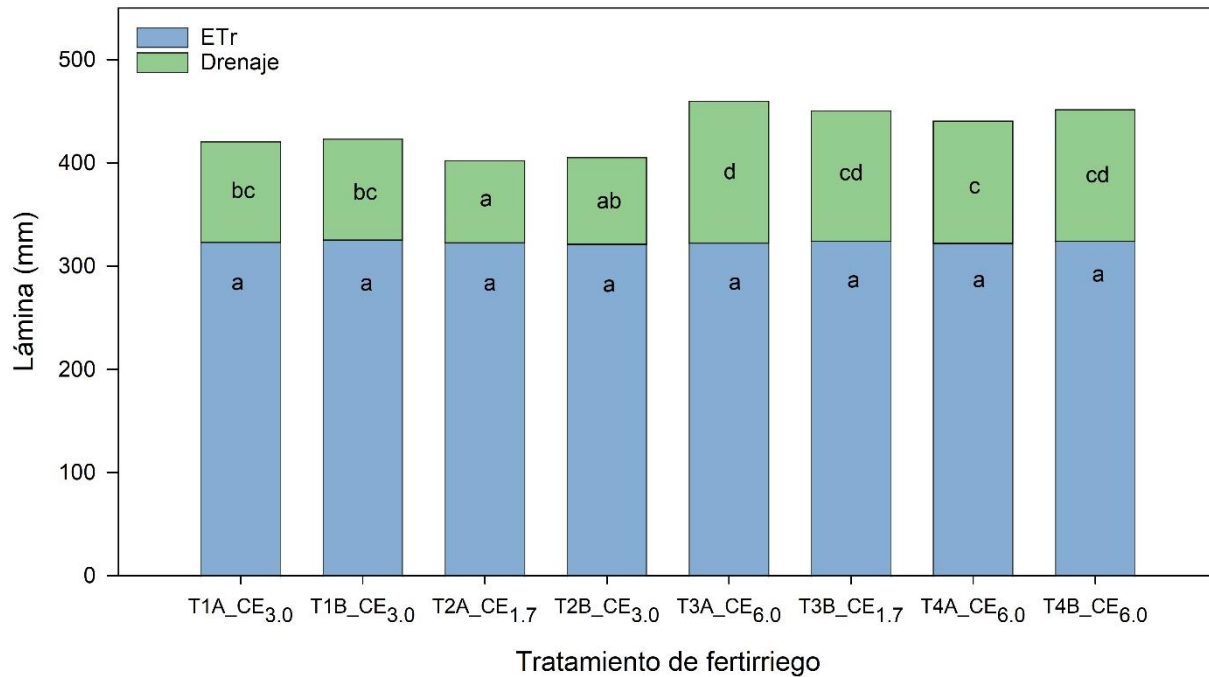
Con los cálculos de la Evapotranspiración de Referencia (ETo) a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y la ETr a partir del balance hídrico se determinó el coeficiente de cultivo (Kc) en el periodo del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 (Figura 14). El 10 de agosto se presentó el valor máximo de ETr de 4.23 mm, mientras que el 8 de octubre el valor mínimo fue de 0.78 mm.



**Figura 14.** Evapotranspiración de referencia, Evapotranspiración real y Coeficiente de cultivo de árboles de *Ficus carica* L. en tratamiento testigo

## V. 2 Balance hídrico

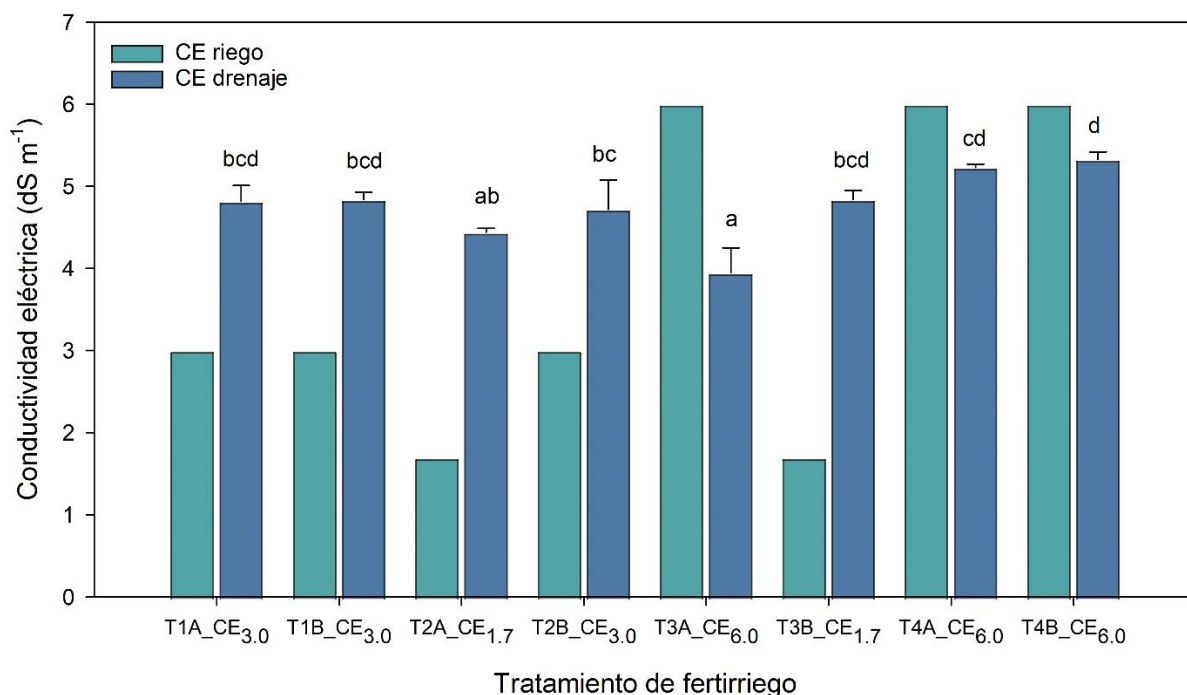
La lámina total de riego (mm) del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento de fertirrigación se ilustra en la Figura 15. La lámina media de ETr fue similar entre tratamientos con valores entre 322 mm y 327 mm sin presentar diferencias estadísticamente significativas. La lámina media de drenaje fue diferente entre tratamientos con el valor más bajo de 79 mm registrado en el T2A\_CE<sub>1.7</sub> con diferencia estadísticamente significativa con los valores más altos entre 118 y 137 en los compartimentos del T3 y T4.



**Figura 15.** Lámina total de riego (mm) aplicada del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento de fertirrigación. La fracción de color azul y verde en cada columna corresponden a la lámina de evapotranspiración real (ETr) y de drenaje, respectivamente. Las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

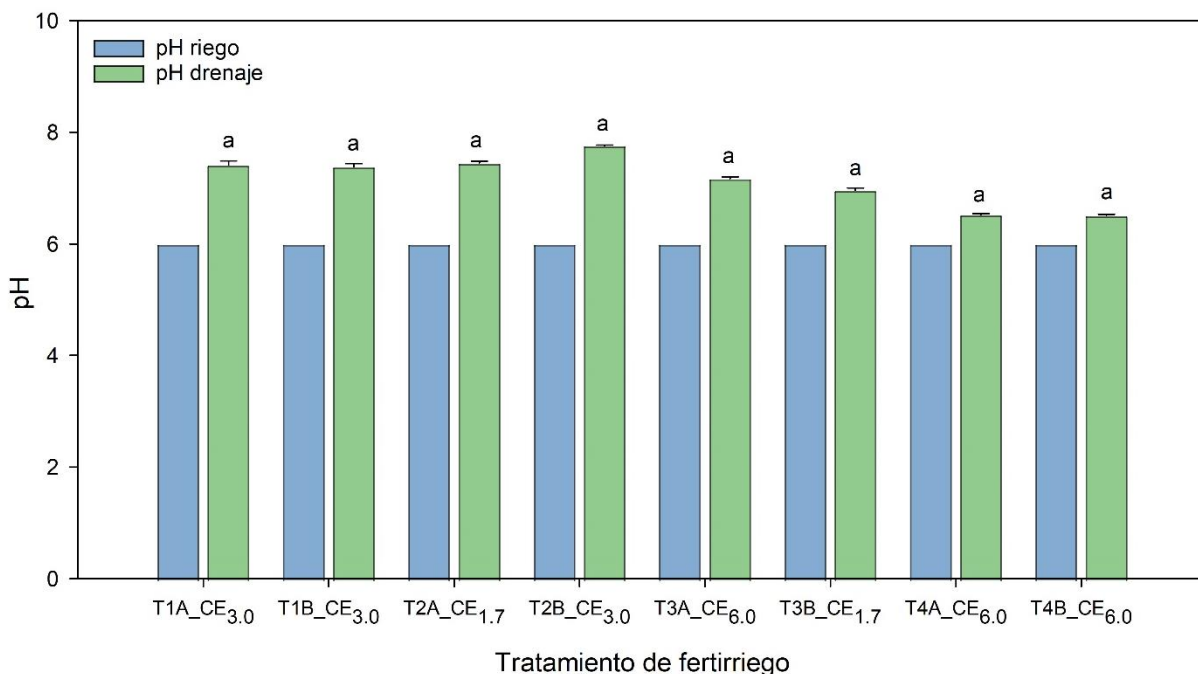
### V. 3 Conductividad Eléctrica y pH de la solución de fertirriego

La conductividad eléctrica media de la solución de fertirriego y drenaje se ilustra en la Figura 16. La CE de la solución de fertirriego ( $CE_R$ ) se mantuvo de acuerdo a los valores preestablecidos para los diferentes tratamientos en estudio (ver Cuadro 5). Los valores de la CE de la solución de drenaje ( $CE_D$ ) fue mayor que la  $CE_R$ , a excepción de los compartimentos cuya  $CE_R$  fue de  $6.0 \text{ dS m}^{-1}$ . Los drenajes colectados a partir de los compartimentos regados con agua de pozo ( $CE_R = 1.7$ ) produjeron valores de  $CE_D$  entre  $4.44 \text{ dS m}^{-1}$  y  $4.84 \text{ dS m}^{-1}$ , los que recibieron solución de fertirriego con  $CE_R = 3.0 \text{ dS m}^{-1}$  generaron una  $CE_D$  promedio de  $4.8 \text{ dS m}^{-1}$  y aquellos que recibieron solución de fertirriego con  $CE_R = 6.0 \text{ dS m}^{-1}$  marcaron valores de  $CE_D$  de  $3.95 \text{ dS m}^{-1}$  y  $5.33 \text{ dS m}^{-1}$ . Los compartimentos T3A\_CE6.0 y T4B\_CE6.0 presentaron diferencias estadísticamente significativas con los demás tratamientos.



**Figura 16.** Conductividad eléctrica media de la solución de fertirriego (verde) y drenaje (azul) del 20 de mayo al 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento. Las barras representan el error estándar y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

El pH medio de la solución de fertirriego y drenaje se ilustra en la Figura 17. El pH de la solución de fertirriego ( $pH_R$ ) se mantuvo de acuerdo a los valores preestablecidos para los diferentes tratamientos en estudio (ver Cuadro 5). Los valores de pH de la solución de drenaje ( $pH_D$ ) fue mayor que la  $pH_R$ . Los drenajes colectados a partir de los compartimentos regados con agua de pozo ( $CE_R = 1.7$ ) produjeron valores de  $pH_D$  entre 6.96 y 7.45, los que recibieron solución de fertirriego con  $CE_R = 3.0 \text{ dS m}^{-1}$  generaron una  $pH_D$  promedio entre 7.38 y 7.76, mientras que aquellos que recibieron solución de fertirriego con  $CE_R = 6.0 \text{ dS m}^{-1}$  marcaron valores de  $pH_D$  de 6.5 y 7.17. No se presentaron diferencias estadísticamente significativas.



**Figura 17.** pH medio de la solución de riego (violeta) y drenaje (verde) entre el 20 de mayo y el 13 de octubre de 2022 en cada compartimento por tratamiento. Las barras representan el error estándar y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

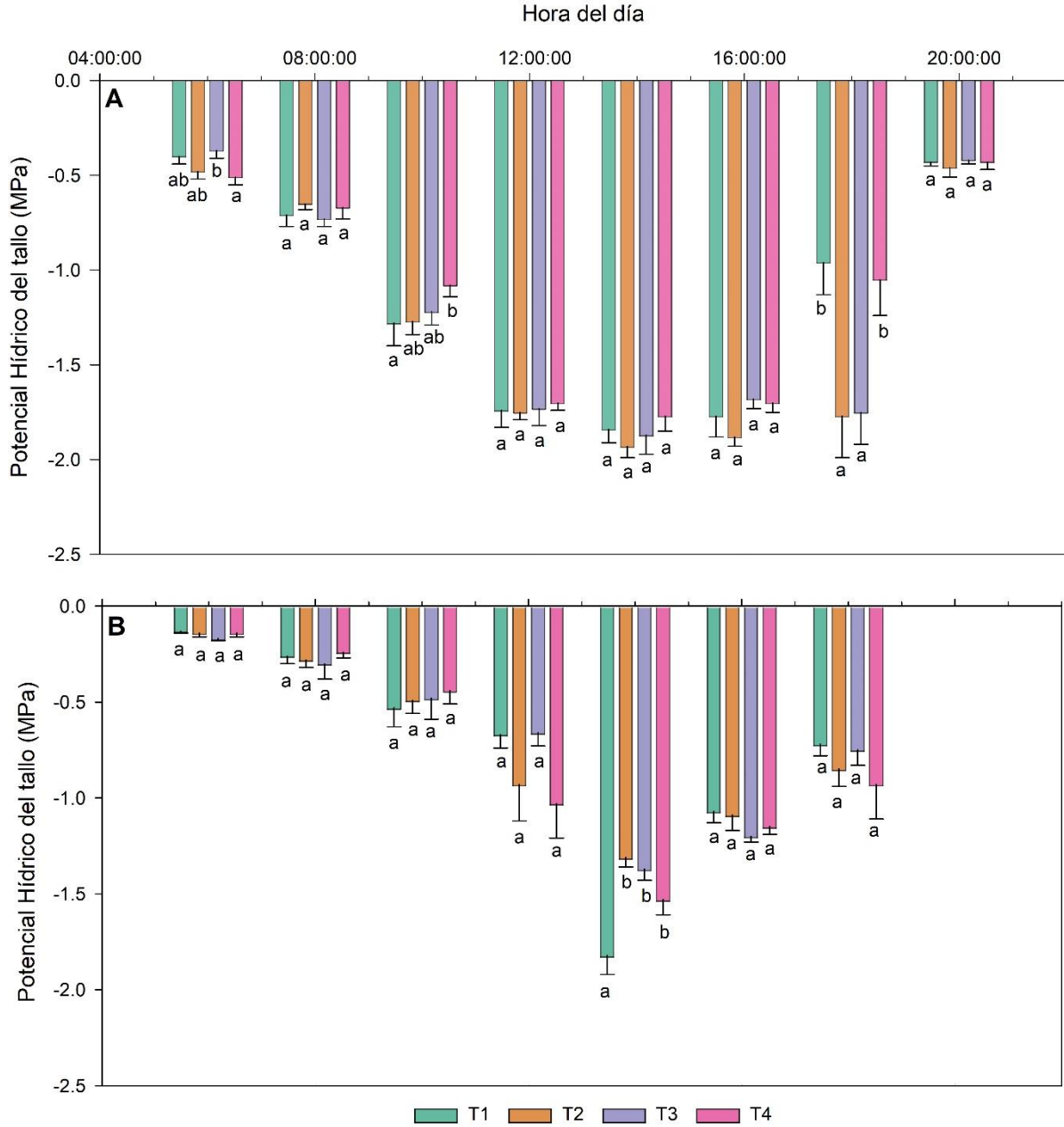
#### V. 4 Evolución del potencial hídrico del cultivo

El seguimiento realizado cada dos horas, los días 10 de junio y 18 de julio, a los valores del potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) en higuera manifestó un patrón típico en forma de “U” con valores máximos al alba (06:00 horas) y al anochecer (20:00 horas) y valores mínimos al mediodía solar (Figura 18).

Al inicio del día 10 de junio (Figura 18A), se registraron valores de entre -0.37 y -0.51 MPa haciéndose más negativos conforme aumentaba el desajuste hídrico entre la absorción de agua a nivel de raíces y la demanda por evapotranspiración a nivel foliar. Al mediodía solar, el  $\Psi_{\text{tallo}}$  alcanzo valores mínimos entre -1.77 y -1.93 MPa seguidos por una recuperación positiva por la tarde gracias a la rehidratación de los tejidos de la planta.

A las 20:00 horas todos los tratamientos volvieron a manifestar valores de  $\Psi_{\text{tallo}}$  similares a aquellos observados al alba. A las 6:00, 10:00 y 18:00 h se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos; al alba, el T3 fue superior que el T4, mientras que a las 10:00 h, el T1 presentó valores más negativos que T4. A las 18:00 h, el T1 y el T4 manifestaron una recuperación más rápida que el T2 y T3.

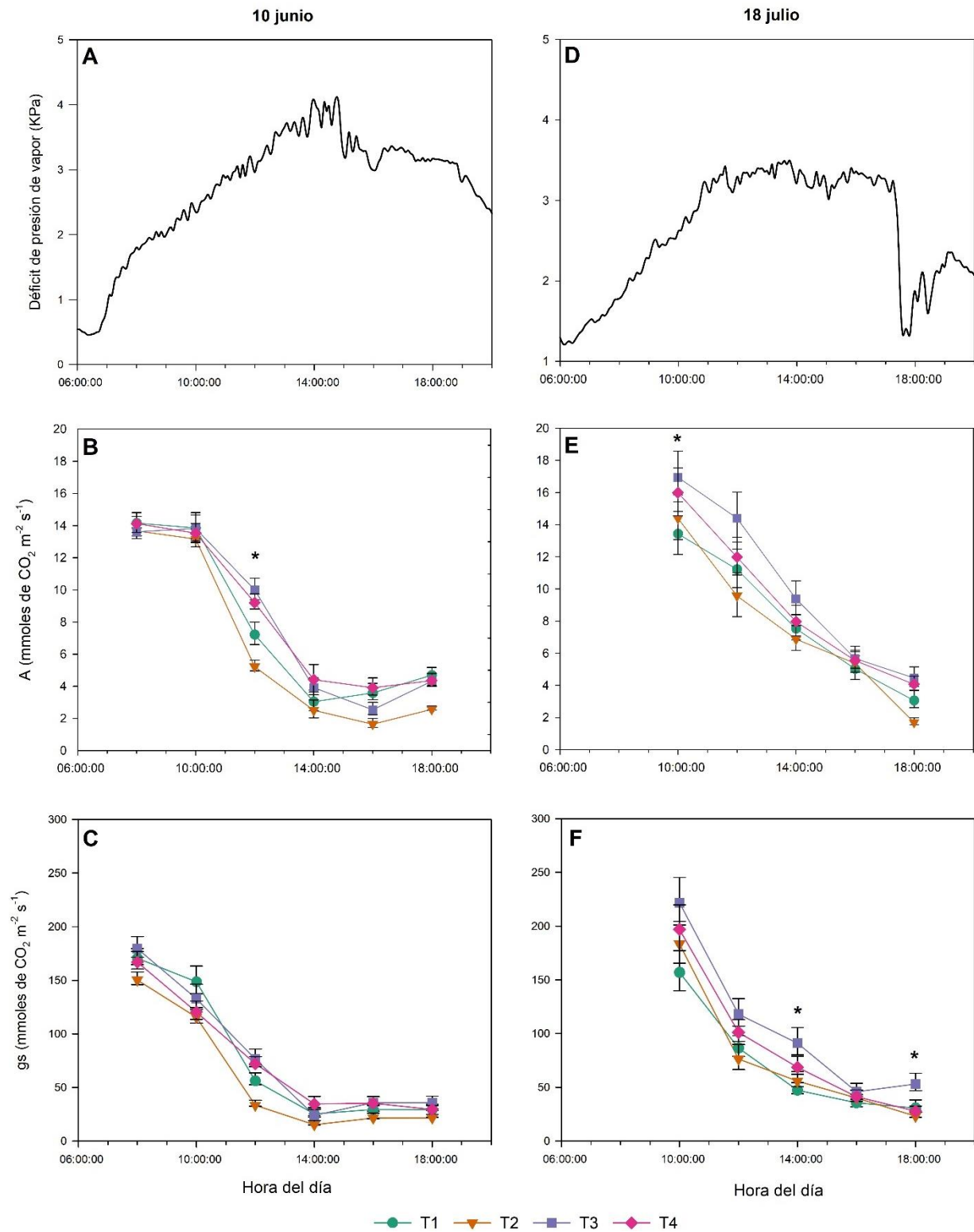
Durante el 18 de julio (Figura 18B), el patrón de la evolución del  $\Psi_x$  fue similar a la del 10 de junio; no obstante, las magnitudes observadas durante la primera mitad del día fueron considerablemente mayores (un 50% más) volviéndose a ser similares a partir de las 14:00 horas en adelante. El promedio de los valores de  $\Psi_{\text{tallo}}$  fue de -0.15, -1.5 y -0.82 MPa al alba, mediodía y anochecer respectivamente. Solo a las 14:00 horas, el T1 se destacó marcando el valor más negativo con diferencia estadísticamente significativa con el T2 y T3.



**Figura 18.** Evolución del potencial hídrico del tallo en higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) durante el 10 de junio (A) y el 18 de julio (B) de 2022. Las barras representan la media de 6 valores y las letras distintas indican grupos con diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ )

## V. 5 Evolución del intercambio gaseoso del cultivo

En la Figura 19 se observa la evolución diaria de la tasa de fotosíntesis (A), de la conductancia estomática ( $g_s$ ) y del déficit de presión de vapor (DPV) los días 10 de junio y 18 de julio del 2022, en un periodo fisiológico activo con desarrollo vegetativo y diferenciación y crecimiento de frutos. En ambos días, las variables estudiadas siguieron patrones similares de evolución entre las 8 h de la mañana y las 18 h de la tarde. Las tasas de fotosíntesis (Figura 19B y 19E) y, conductancia estomática (Figura 19C y 19F) evolucionaron en paralelo manifestando sus máximos valores a primeras horas del día para luego disminuir progresivamente conforme avanzaba el tiempo del día. El DPV manifestó valores máximos de 4,1 y 3.4 kPa para los días 10 de junio (Figura 19A) y 18 de julio (Figura 19D) respectivamente; esta diferencia entre ambos días se tradujo en un cierre estomático más pronunciado a partir de las 14:00 horas del 10 de junio en comparación con los valores del 18 de julio. En cuanto a la comparación entre tratamiento, se registraron ligeras diferencias marcando cierta ventaja de los tratamientos T3 y T4 en comparación con los tratamientos T1 y T2.

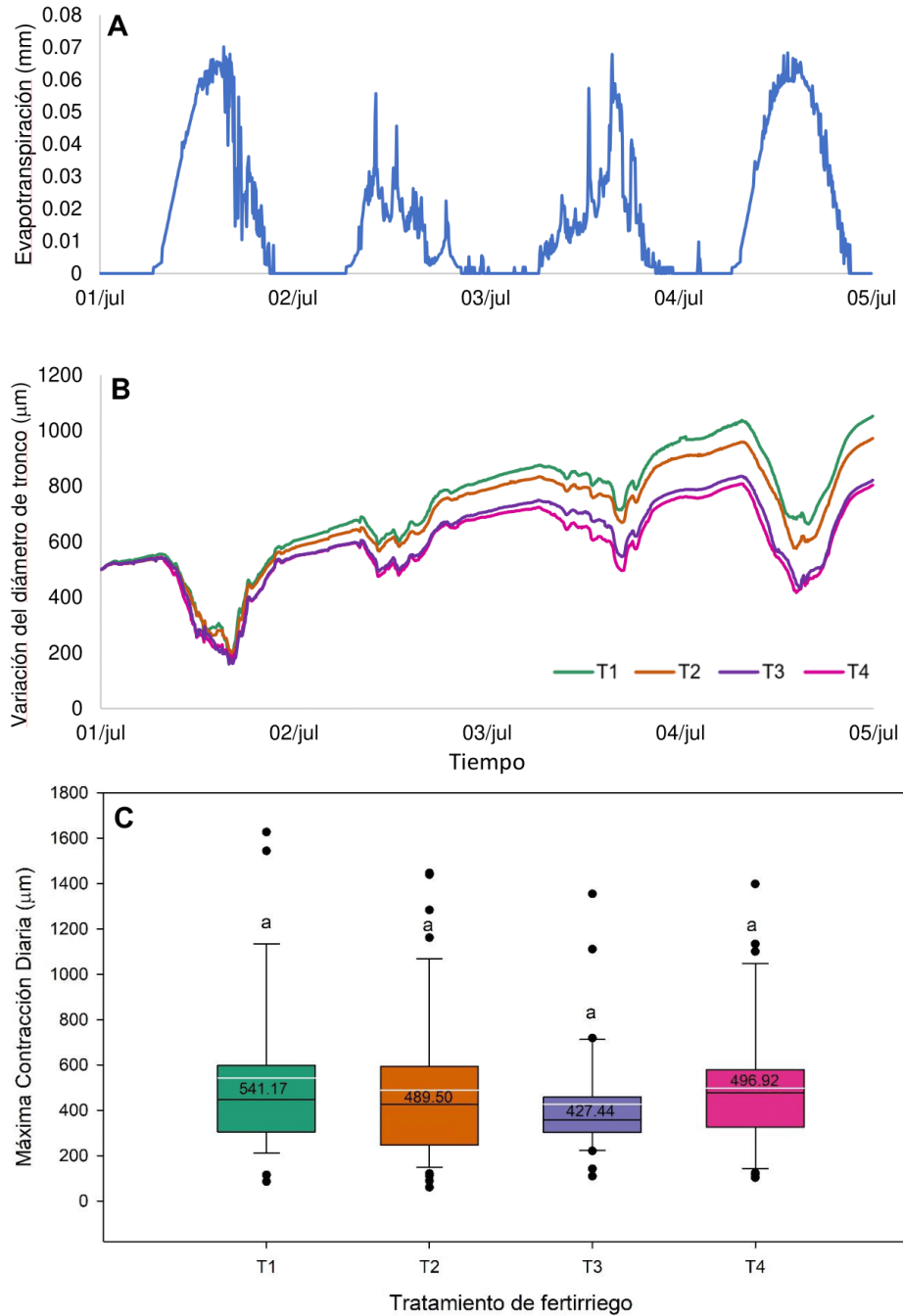


**Figura 19.** Evolución del déficit de presión de vapor, de la tasa fotosintética y de conductancia estomática a nivel foliar, los días 10 de junio (A, B y C) y, 18 de julio (D, E y F) del 2022. Cada punto representa la media de 6 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).



## V. 6 Variaciones micro morfométricas del tronco

El comportamiento de la Variación del Diámetro del Tronco y su Máxima Contracción Diaria (MCD) se ilustran en la Figura 20. La curva de la evapotranspiración de referencia tiene forma de campana, su valor mínimo se encuentra por la noche y madrugada, mientras que su valor máximo en el medio día solar; los altibajos representan nubes o chubascos (Figura 20A). La variación del diámetro del tronco alcanza su valor máximo antes de que salga al sol y al momento de máxima demanda climática entre las 12 y 15 h. Los tratamientos 3 y 4 presentan un menor diámetro del tronco en comparación a T1 y T2 (Figura 20B). Los valores promedio de la MCD oscilaron entre 427 y 541  $\mu\text{m}$ , sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos; los valores atípicos hacia arriba indican que la planta se encontró en situaciones de estrés hídrico (e.g. día de evolución y potencial hídrico donde se cortó riego) mientras que los valores atípicos hacia abajo se refieren a días nublados o de lluvia (Figura 20C).

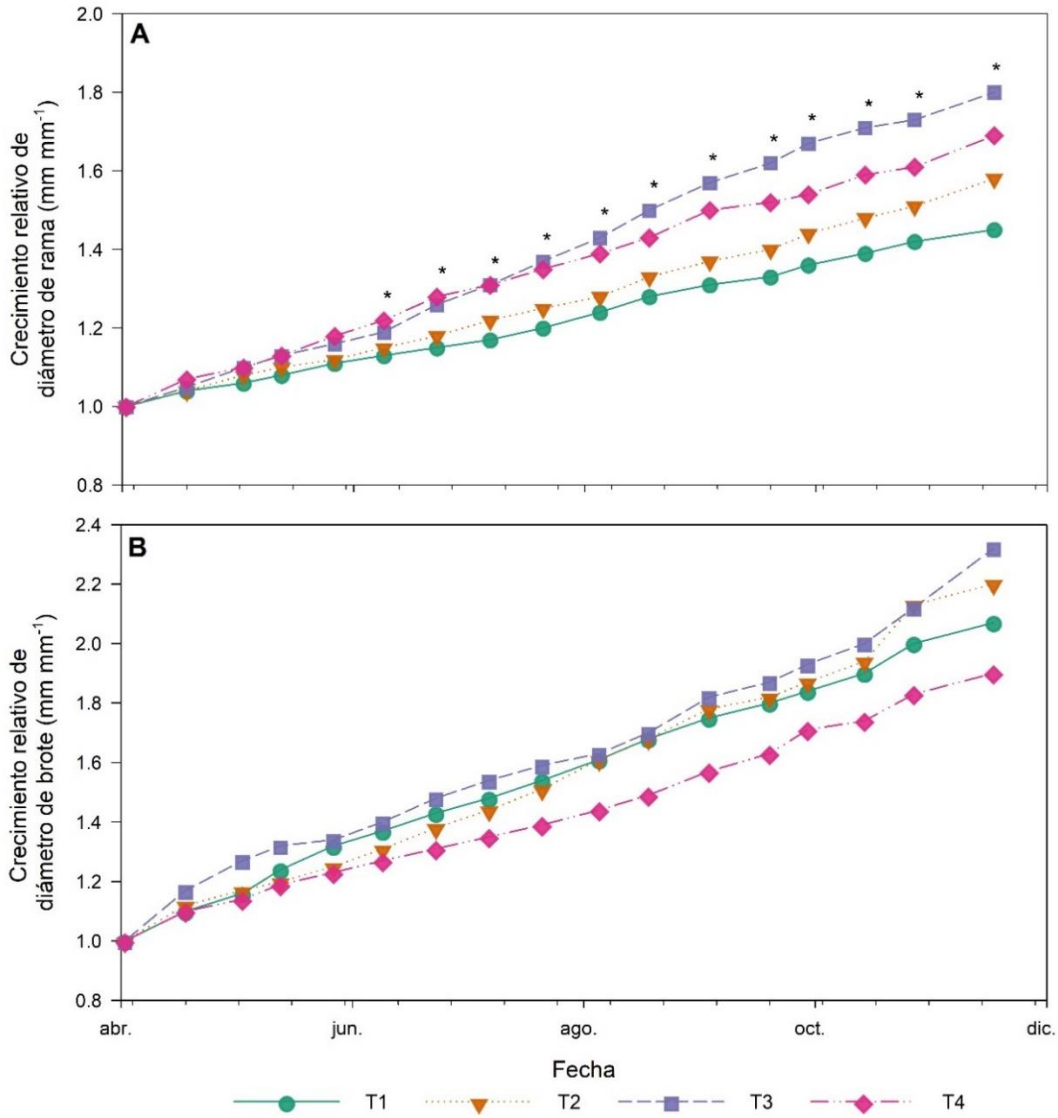


**Figura 20.** Evolución de la Evapotranspiración de Referencia (A), Variación del Diámetro del Tronco (B) y la Máxima Contracción Diaria en árboles de higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) del 1 de julio al 5 de julio de 2022. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). La línea blanca y negra dentro de la gráfica de cajas representa la media y la mediana, respectivamente.

## V. 7 Crecimiento vegetativo

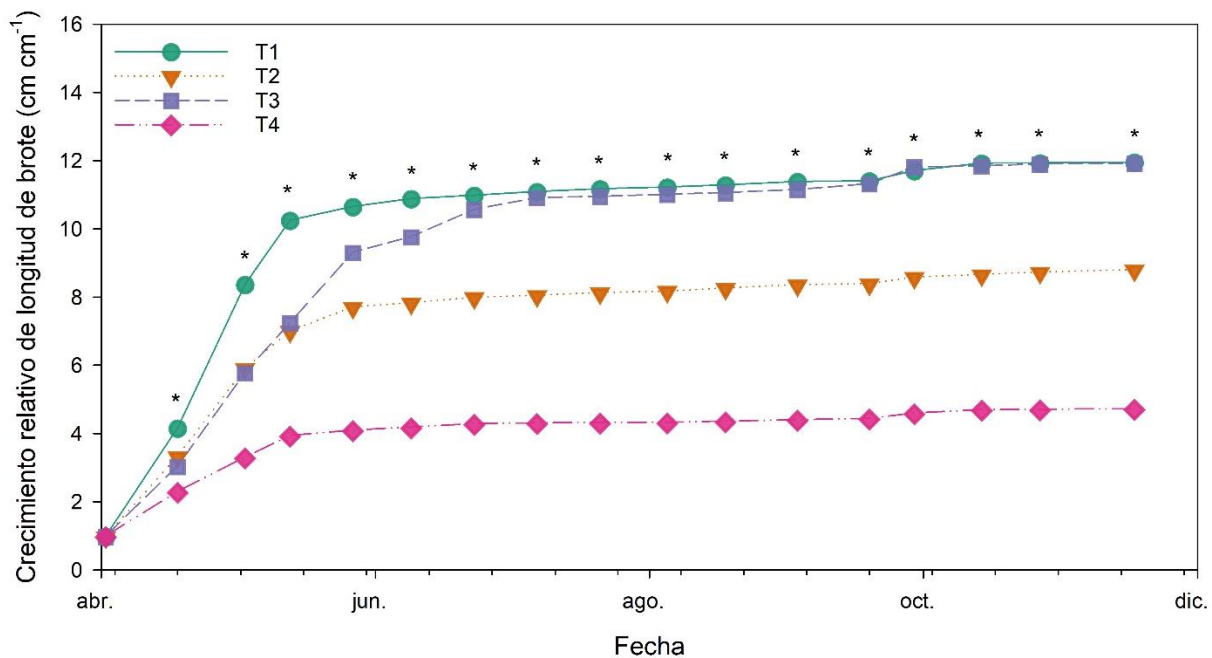
El crecimiento relativo, registrado entre el 2 de abril al 17 de noviembre de 2022, en el diámetro de la rama de un año de edad y del brote de nuevo crecimiento del año en curso se ilustra en la Figura 21. En ella, se observa un patrón lineal con pendiente positiva en todos los tratamientos. A partir de julio, el diámetro de rama ( $DR_0$ ) (Figura 21A) comenzó a manifestar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos marcando el mayor crecimiento en T3 y T4 con un incremento total del 24 % mayor que T1.

El diámetro del brote del año ( $DR_1$ ) siguió un patrón similar al  $DR_0$  de la rama madre (Figura 21B) pero con los mayores incrementos en los tratamientos T3 y T2, cercanos al T1 y por encima del T4.



**Figura 21.** Crecimiento relativo del diámetro de rama de un año de edad (A) y del brote del mismo año (B) en higuera (*Ficus carica* L. var. "Black Mission") entre el 4 de abril y el 17 de noviembre de 2022. T1: fertirriego (CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 18 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

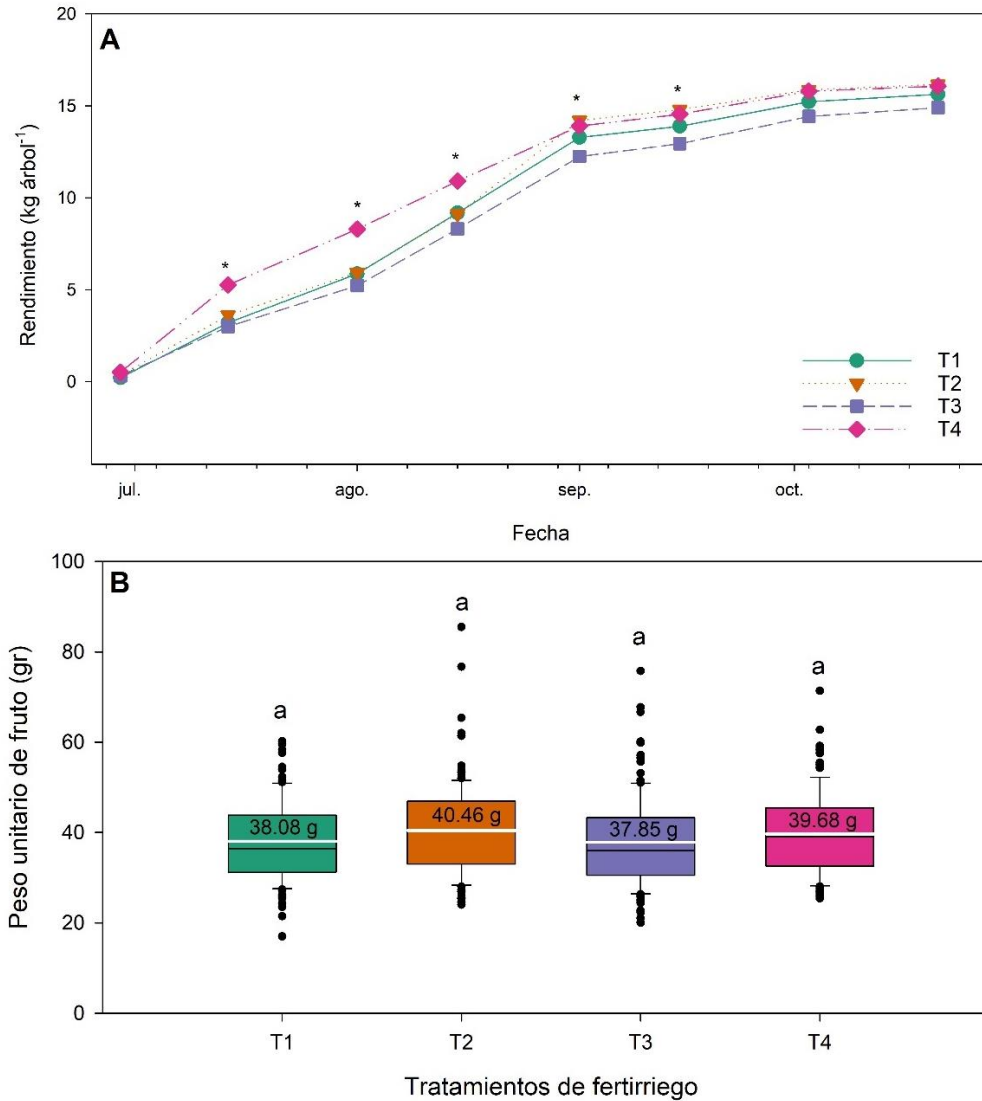
El crecimiento relativo de la longitud de brote del año en higuera del 4 de abril al 17 de noviembre del 2022 se ilustra en la Figura 22. En general se observa un crecimiento exponencial de la longitud del brote en todos los tratamientos y se presentan diferencias estadísticamente significativas desde el 18 de abril hasta el final del muestreo. En mayo se percibe que T1 se diferencia de los demás tratamientos, T2 y T3 crecen a un ritmo similar hasta junio, donde T3 inicia un crecimiento más pronunciado hasta alcanzar a T1 en el mes de julio. T1 y T3 tuvieron un crecimiento superior de longitud de brote en comparación a T2 y T4.



**Figura 22.** Crecimiento relativo de la longitud de brote del mismo año en higuera (*F. carica* L. var “Black Mission”) del 4 de abril al 17 de noviembre del 2022. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 18 valores los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

## V. 8 Crecimiento del fruto y rendimiento del cultivo

La Figura 23 ilustra el efecto de los tratamientos de fertirriego sobre el rendimiento de frutos de higo por árbol, así como el peso unitario de los siconos del 29 de junio al 21 de octubre del 2022. Desde el principio de la cosecha en junio hasta septiembre se presenta un crecimiento al alza hasta el mes de septiembre en todos los tratamientos llegando a una estabilización de la curva en los meses posteriores (Figura 23A). En todo el periodo T4 fue superior a los otros tratamientos con diferencias estadísticamente significativa en los meses de julio, agosto y septiembre. El rendimiento promedio al concluir la temporada fue de 16.22, 16.16, 14.85 y 14.01 kg árbol<sup>-1</sup> en T4, T2, T1 y T3, respectivamente. El peso promedio unitario de siconos de higuera no fue diferente entre los tratamientos con valores de entre 38.08 y 40.46 gr (Figura 23B).

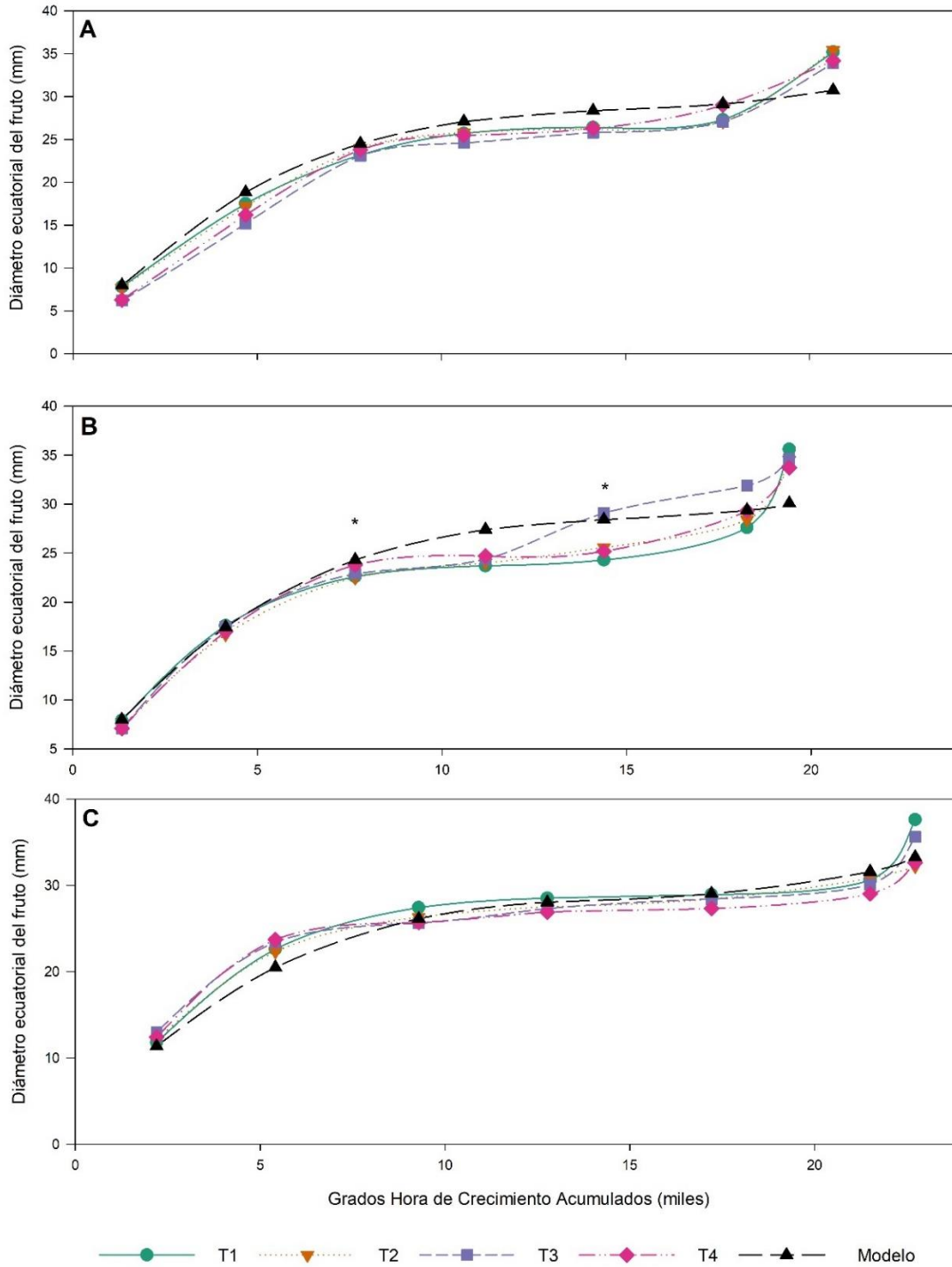


**Figura 23.** Rendimiento acumulado de siconos (A) y peso unitario de fruto (B) en higuera (*Ficus carica* L. var. “Black Mission”) por cada tratamiento del 29 de junio al 21 de octubre del 2022. T1: fertirriego (CE=3 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=3 dS m<sup>-1</sup>), T3: riego en un compartimento de raíces (CE=1.8 dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 6 valores, los asteriscos y letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ). La línea blanca y negra dentro de la gráfica de cajas representa la media y la mediana, respectivamente.

## V. 9 Grados Hora de Crecimiento del fruto

El efecto de los Grados Horas de Crecimiento acumulados (GHCa) (Anderson et al., 1986) y el crecimiento del fruto de higuera medido por medio del diámetro ecuatorial mostró una curva típica doble sigmoidea que se repite en frutos consecutivos en la misma rama monitoreados en diferentes fechas (Figura 24). La aplicación del modelo propuesto por Altamirano Pacheco (2022) para estimar el diámetro ecuatorial de higo a partir de los GHCa manifestó un alto ajuste con los valores observados con un error cuadrático medio (RMSE) de 2.2 mm y un error absoluto medio (MAE) de 1.8 mm. En el comportamiento de la curva se distinguen tres fases de crecimiento, la primera etapa de crecimiento acelerado ( $\approx 9,000$  GHC), seguida de la segunda etapa con un crecimiento casi nulo ( $\approx 7000$  GHC) y la tercera etapa con un despunte en la curva alcanzando la maduración del fruto ( $\approx 4,000$  GHC). En total, el fruto requiere entre 20,000 y 22,000 GHC para alcanzar su maduración y se requieren de 7,000 a 9,000 GHC entre la aparición de un fruto y su consecutivo en la misma rama.

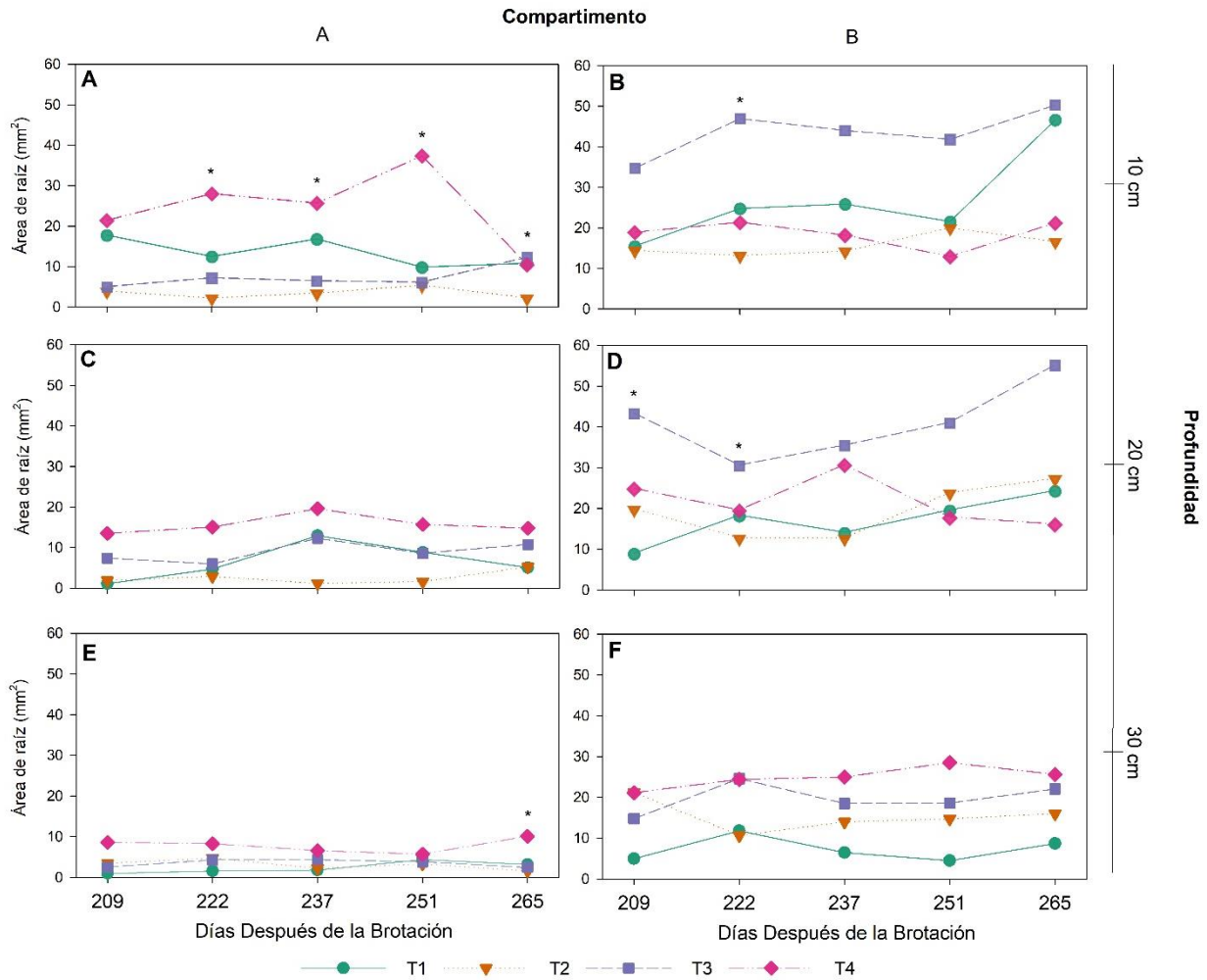




**Figura 24.** Evolución del diámetro ecuatorial del fruto en función de los grados hora de crecimiento (GHC) acumulados durante las etapas de crecimiento de 3 frutos consecutivos conforme fueron apareciendo a los 62 (A), 91 (B) y 132 (C) días después de la brotación (DDB) de la yema vegetativa de la misma rama madre que los generó. Cada punto representa la media de 6 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

## V. 10 Estimación del crecimiento de las raíces

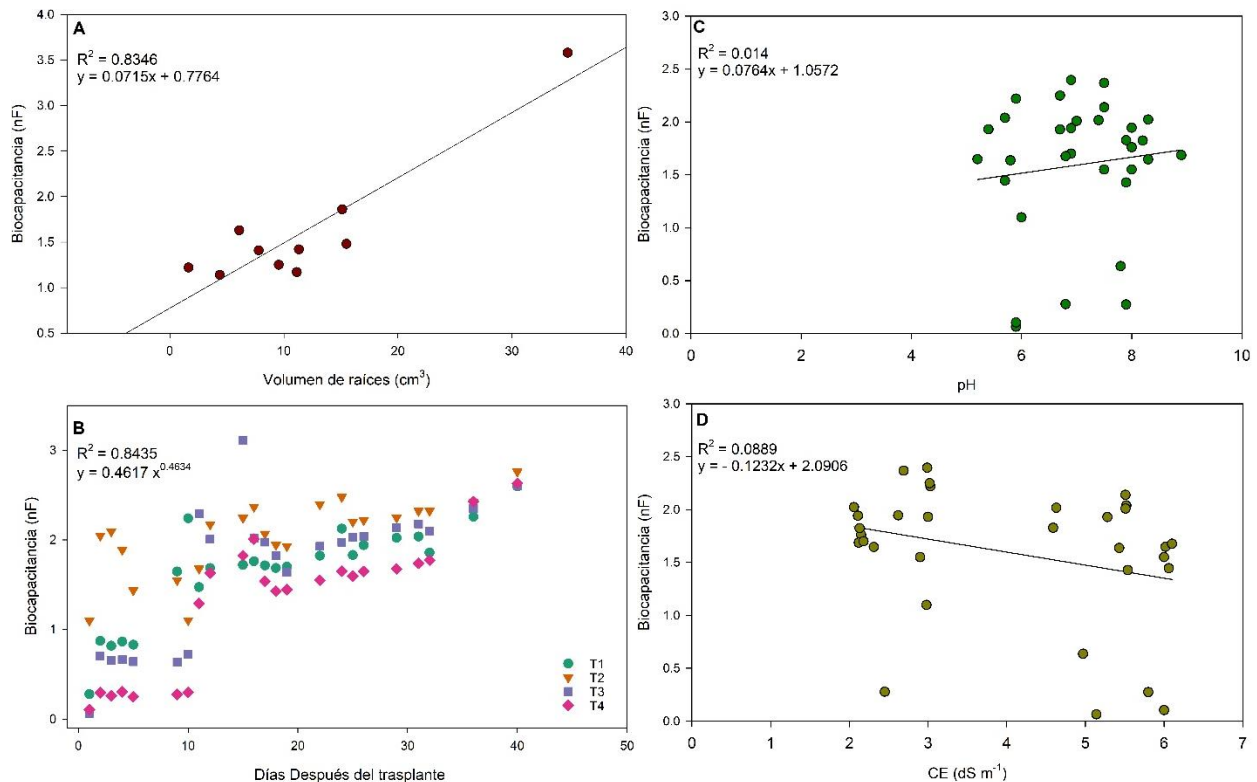
La evolución del crecimiento del área de la raíz estimada por medio de imágenes dentro del sustrato en higuera en dos compartimentos (Compartimento A =  $C_A$ ; Compartimento B =  $C_B$ ) y a tres diferentes profundidades (10 cm =  $P_{10}$ ; 20 cm =  $P_{20}$ ; 30 cm =  $P_{30}$ ) del 209 al 265 Días Después de la Brotación (DDB) se ilustra en la Figura 25. Se observaron valores estadísticamente diferentes de acuerdo a los factores tratamiento, tiempo, profundidad y compartimento. El área de raíces fue diferente en  $C_A$  que en  $C_B$ . De igual manera, el comportamiento a la  $P_{10}$  no fue igual que en  $P_{30}$ . El T4 fue superior que los demás tratamientos en  $C_A$  a las tres profundidades y estadísticamente significativo en cuatro de los cinco muestreos (222, 237, 251 y 265 DDB) en  $P_{10}$  (Figura 25A). El compartimento que se regó con agua de pozo ( $C_B$ ) en el T3 fue superior que los demás tratamientos en  $P_{10}$  y  $P_{20}$ , teniendo diferencias estadísticamente significativas al principio del muestreo (209, 222 DDB) (Figura 25B y 25D).



**Figura 25.** Crecimiento del área de raíz en higuera (*Ficus carica* L. var “Black Mission”) de acuerdo al compartimento (A y B) y profundidad (10 cm, 20 cm y 30 cm). T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. Cada punto representa la media de 3 valores y los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas según la MDS de Fisher ( $p < 0.05$ ).

## V. 11 Biocapacitancia eléctrica

La señal de Biocapacitancia (SBcap) del sistema Solución Nutritiva-Esqueje de higuera evolucionó siguiendo un modelo potencial durante los primeros 40 días desde el establecimiento del ensayo y la inserción de los esquejes en la solución nutritiva (Figura 26A) sin manifestar correlación significativa con valores de pH (Figura 26C) y CE (Figura 26D) de la misma. Las lecturas de SBcap manifestaron una correlación muy prometedora con alto coeficiente de determinación tal como se observa en la figura 26B.



**Figura 26.** Evolución de la biocapacitancia eléctrica de esquejes de higuera (*Ficus carica* L.) var. “Black Mission” en respuesta al volumen de raíces (A), al desarrollo del tiempo después del trasplante (B), al pH (C) y a la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (D).

## VI. DISCUSIÓN

### VI. 1 Entorno ambiental

Los componentes del agroecosistema determinan el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos. Los factores abióticos como la temperatura, humedad relativa y radiación influyen directamente sobre la fisiología, fenología y morfología de las plantas; para el caso de la higuera se ha considerado una temperatura basal mínima de 8° C y una temperatura crítica máxima de 36 °C (Pacheco De Souza *et al.*, 2009). En el trabajo de investigación desarrollado las plantas de higo dentro de la estructura de agricultura (casa de malla sombra) si estaban expuestas a temperaturas mayores o iguales a 36° C en los meses de verano, pero el tiempo de exposición no superaba las 3 horas.

La máxima actividad fotosintética se ha documentado a diferentes temperaturas; en el trabajo de Higgins *et al.*, (1992) con plantas de higo cultivar “Black Mission” de un año de edad bajo condiciones de invernadero determinó que la temperatura óptima para la fotosíntesis era de 26°C, mientras que Pisimisi *et al.*, (2012) reportan que en plantas de higo de cinco años de edad el rango fue de 34 a 38°C.

### VI. 2 Estado hídrico en la planta

De acuerdo al balance hídrico entre la diferencia de riego y drenaje se determinó la Evapotranspiración Real del Cultivo (ET<sub>r</sub>) y con la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se calculó el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) cuyo valor máximo de 0.98 se alcanzó en el mes de agosto, tiempo en el que la higuera estaba en cosecha de frutos, coincidiendo con lo reportado por De S. Andrade *et al.*, (2013) en *Ficus carica* L. cv. Roxo de Valinhos de 2 años de edad con un K<sub>c</sub> en etapa de producción de 1.1, igualmente en el estudio de Moura *et al.*, (2023) en plantas de 5 años del mismo cultivar con K<sub>c</sub> de 1.00.

Los requerimientos hídricos de la higuera varían de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas de donde se sitúen, si es bajo sistema de agricultura protegida o condiciones de temporal. La lámina promedio de riego aplicada en este experimento fue similar a la de De S. Andrade *et al.*, (2013) y Moura *et al.*, 2023) que fue de 816.4 y 780 mm, respectivamente. Sin embargo, en regiones de Chile recomiendan una dosis de entre 400 y 650 mm en un huerto maduro a una densidad de 1250 plantas por hectárea (Lobos *et al.*, 2017).

La revisión de la evolución horaria del  $\psi_{\text{tallo}}$  realizada los días 10 de junio y 18 de julio, permite observar en el primer día valores más negativos en todos los tratamientos. Además, en el horario de 16:00 a 18:00 horas, las plantas del T1 y T4 manifestaron una recuperación anticipada en comparación con las del T2 y T3. En ambas fechas, las plantas quedaron sin riego todo el día, no obstante, el DPV después del mediodía fue ligeramente mayor el 10 de junio que el 18 de julio; en esta última fecha se presentó un evento de lluvia alrededor de las 17:00 horas lo que provocó una recuperación similar entre tratamientos. Los valores más negativos que se presentaron el 10 de junio a las 18:00 h en T2 y T3 se pueden explicar por un mayor agotamiento del contenido de humedad fácilmente disponible en los compartimentos que se regaban con agua de pozo ( $CE=1.7 \text{ dS m}^{-1}$ ) y mayor dificultad de seguir extrayendo la fracción disponible de humedad desde los compartimentos regados con solución de fertirriego ( $CE = 3 \text{ y } 6 \text{ dS m}^{-1}$ ). Las plantas del T1 y T4 y debido a su adaptación a mayores concentraciones de sales en la solución del riego, podrían haber incrementado su potencial osmótico y por tanto haber accedido a una mayor fracción de la humedad disponible tan pronto se redujo el nivel de la evapotranspiración. Este comportamiento está de acuerdo con el modelo de (Feddes & Raats, 1978) que describe el patrón de absorción de agua por las raíces bajo diferentes niveles de potencial hídrico en el suelo y diferentes intensidades de demanda por evapotranspiración y el cual fue adoptado e implementado en el modelo de simulación del movimiento de agua en el suelo llamado HYDRUS (Radcliffe & Simunek, 2010).

El aumento en la CE de la solución de drenaje donde en los compartimentos que se aplicó fertirriego de  $6 \text{ dS m}^{-1}$  se atribuyen al momento de la colecta, ya que al momento en que recogía la muestra para dichos compartimentos, coincidía con la fracción de

lavado. Este hecho fue lo que impactó en que en promedio disminuyera la CE del drenaje hasta  $2 \text{ dS m}^{-1}$  en toda la temporada, pero no lo suficiente para el pH, ya que este no presentó diferencias notables en comparación del pH del fertirriego.

### **VI. 3 Ecofisiología, crecimiento y desarrollo de plantas de higuera**

Las plantas pueden sufrir perturbaciones fisiológicas y bioquímicas a causa de las fluctuaciones en su entorno. La salinidad es un tipo de estrés abiótico causado por la presencia de altas concentraciones de solutos en el suelo o en el agua de riego. Los efectos primarios del estrés salino incluyen la reducción del potencial hídrico, la deshidratación celular y la citotoxicidad iónica. Algunos de los efectos secundarios se manifiestan a través de la expansión reducida y abscisión de hojas, reducción de las actividades metabólicas, cierre de estomas, inhibición fotosintética, cavitación, citorrrisis, desestabilización de las membranas y proteínas, producción de especies reactivas de oxígeno y la citotoxicidad de iones (Taiz & Zeiger, 2010).

Los dendrómetros son sensores que nos ayudan a coleccionar datos en tiempo real sobre el proceso de hidratación de las plantas por medio de la variación del diámetro del tronco, dentro de los cuáles se pueden determinar algunos indicadores importantes para la programación de riego, como lo es la Máxima Contracción Diaria (MCD) (Ortuño *et al.*, 2010). Los datos de la MCD de este trabajo indican que el estado hídrico de las plantas fue similar entre tratamientos, correspondiendo con los datos de ETr. La MCD reportada por Altamirano Pacheco (2022) en plantas de higuera (*Ficus carica* L. var "Black Mission) de un año de edad fue aproximadamente 50 % menor comparada con los datos de este estudio.

Se observó una disminución en los valores de la tasa fotosintética y conductancia estomática a lo largo del día en las evoluciones del 10 de junio del 2022 y 18 de julio del 2022 a causa de la suspensión de riego desde que se iniciaron las mediciones; conforme fueron avanzando las horas la demanda de agua incrementó y la disponibilidad de agua en el sustrato se redujo, activando el mecanismo de cierre de estomas para evitar la pérdida de agua y disminuyendo la conductancia estomática y la entrada de  $\text{CO}_2$  (Buckley, 2019; Chaves *et al.*, 2009).

Contrario a lo presentado en este proyecto, Caruso *et al.* (2022) reportaron en plantas de *Ficus carica* L. cv. "Dottato" de un año de edad irrigadas con solución salina de entre 0 y 200 mM de NaCl que al incrementar la concentración de la sal se reducía la tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática, al igual que en el estudio de Zarei *et al.* (2016) en plantas de *F. carica* L. de diferentes cultivares disminuyeron dichas variables a medida que aumentaba la conductividad eléctrica de la solución de fertirriego.

La presencia de altas concentraciones de sales en la rizosfera provoca una respuesta rápida inducida por la diferencia de potencial osmótico entre la solución del suelo y la raíz y, otra respuesta lenta causada por la acumulación y/o translocación de iones Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en las hojas. Esto se manifiesta primero en una reducción de la expansión de las hojas, del crecimiento de los brotes e inhibición de los brotes laterales. Más adelante comienza la acumulación de cantidades tóxicas de Na<sup>+</sup> en las hojas, lo que se traduce en la inhibición de fotosíntesis y varios procesos metabólicos (Taiz & Zeiger, 2010). Concordando con la información anterior, observamos que el menor crecimiento en longitud y diámetro de brotes del año se registró en el T4. El T3 pudo mantener niveles de crecimientos cercanos al T1 debido a un posible ajuste osmótico interno que consiguió la planta al tener acceso parcial a aguas con CE reducida. La reducción del crecimiento en el T2 fue provocada por la recepción de menor cantidad de nutrientes equivalente al 50% de lo aplicado al T1 tal como se planteó desde el principio en el diseño de los tratamientos. Zarei *et al.*, (2016) reportaron en diferentes cultivares híbridos de *Ficus carica* L. una disminución significativa de número de hojas, longitud y diámetro de brotes, peso fresco y peso seco de brote y raíces a medida que aumentaba la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego, que iba desde 0.6 hasta 8 dS m<sup>-1</sup>, donde el efecto negativo pronunciado fue en la CE más alta.



En términos de producción total no se registraron diferencias entre tratamientos, sino solo el tratamiento T4 manifestó cierta aceleración en la emisión y desarrollo de frutos entre julio y septiembre. La cosecha anual alcanzó los 19.14 t ha<sup>-1</sup>, muy por encima de la media nacional e internacional con un valor de entre 4 y 6 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. La literatura reporta rendimientos superiores de hasta 109.5 t ha<sup>-1</sup> con peso promedio de fruto de 54 g en huertos de higueras de 1 año edad de la variedad Nezahualcóyotl con ocho ramas productivas (Mendoza-Castillo *et al.*, 2017). No obstante, este rendimiento fue generado en una plantación de alta densidad de plantación (1.25 plantas m<sup>-2</sup>), lo que equivale a un 13.68 kg árbol<sup>-1</sup>, una cantidad similar a la obtenida en este estudio (13.8 kg árbol<sup>-1</sup>) y al valor reportado en la misma parcela por Altamirano Pacheco, (2022) con pesos promedio de sicono de 40 a 42 g.

El crecimiento y desarrollo de los frutos manifestó siempre la misma curva sigmoidea con un excelente ajuste con los GHC sin mostrar diferencias significativas entre tratamientos ni entre frutos monitoreados en fechas distintas.

#### **VI. 4 Dinámica de crecimiento de raíces**

Las características fisiológicas y morfológicas del sistema radical en condiciones de salinidad y estrés hídrico son extremadamente dinámicas (Duan *et al.*, 2015), por lo que se necesita realizar monitoreo frecuente y medición de variables de la arquitectura de la raíz para entender las funciones e interacciones que tiene con la rizósfera (Comas *et al.*, 2013).

La estimación del área de las raíces visualizadas por medio del tubo de acrílico para los tratamientos de salinidad homogénea (T1 y T4) tuvieron un comportamiento similar a diferencia de T3, en el cual tuvo un valor más alto en el compartimento de menor CE, y en T2, donde ligeramente fue superior en el compartimento donde se aplicó la solución nutritiva.

En condiciones de salinidad heterogénea las raíces de las plantas compensan la reducción del potencial osmótico absorbiendo agua del lugar donde sea menos costoso energéticamente y esta compensación, usualmente va acompañada de un mayor crecimiento de las raíces (Flores *et al.*, 2002). Las plantas que crecen en ambientes hostiles de salinidad pueden resistir dicho estrés siempre y cuando tengan alguna parte del sistema radical bajo un suministro adecuado de agua en calidad y cantidad (Bazihizina *et al.*, 2012).

En plantas de vid sometidas a riego salino mediante división radical se concluyó que las raíces absorbieron y translocaron más agua hacia los brotes de la parte de donde se irrigaba con agua ( $1.5 \text{ dS m}^{-1}$ ); además, en este mismo estudio el comportamiento de la tasa de absorción de agua por las raíces fue dinámico en función de la CE de la solución con la que se regó (Shani *et al.*, 1993).

No obstante, es necesario desarrollar más estudios de monitoreo de alta frecuencia para entender mejor este comportamiento e inferir sobre la distribución y dinámica de crecimiento de las raíces a la exposición espacial y temporal de condiciones de salinidad.

La evolución progresiva de la señal de biocapacitancia y su correlación positiva con el volumen de raíces registradas en condiciones de laboratorio son alentadoras para seguir apostando por el desarrollo de nuevas herramientas e indicadores para dar seguimiento al comportamiento de las raíces sin necesidad de realizar muestreo destructivo. Preston *et al.*, (2004) obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson de 0.78 entre el peso seco de raíces y la capacitancia eléctrica de álamos (*Populus deltoides* X *P. nigra*) de uno (regresión lineal) y tres años de edad (regresión polinómica de segundo grado); a medida que los árboles crecen, sus raíces se suberizan y por ende la capacitancia eléctrica disminuye.

## VII. CONCLUSIONES

La exposición de raíces de higuera (*Ficus carica* L. var. "Black Mission") a diferentes niveles de sal en la solución nutritiva no alteró los términos del balance hídrico.

Para el caso de los indicadores ecofisiológicos, la tasa de fotosíntesis y conductancia estomática fue superior en plantas expuestas a una CE alta entre un 70 y 90 % a las primeras horas del día. El potencial hídrico del tallo decreció un 50 % en plantas con fertirriego de menor salinidad.

No se afectó de manera negativa el crecimiento en órganos vegetativos en diámetro del brote ni el desarrollo de frutos en términos de rendimiento. La evidencia sugiere que las plantas con CE alta aumentaron el crecimiento en la madera del año anterior en lugar de los brotes nuevos.

La dinámica de crecimiento de raíces cambió en función del nivel de sal de la solución nutritiva aplicada, presentando una mayor área de raíz en los primeros 20 cm de profundidad del sustrato y en condiciones de menor salinidad.

La relación entre la capacitancia bioeléctrica y el volumen de raíces en esquejes de higuera es lineal y conveniente como método no destructivo para caracterizar el sistema radical.

## VIII. REFERENCIAS

- Abou Hadid, A. F. (2013). Protected cultivation for improving water-use efficiency of vegetable crops in the NENA region. En FAO (Ed.), *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops* (pp. 137–148).
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Altamirano Pacheco, J. G. (2022). *Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo (Ficus carica L) 'Black Mission' bajo condiciones de malla sombra y sometido a riego salino controlado mediante división radicular* [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Anderson, J. L., Richardson, E. A., & Kesner, C. D. (1986). Validation of Chill unit and Flower Bud Phenology models for “Montmorency” sour Cherry. *Acta Horticulturae*, 184, 71–78.
- Babaghayou, M. I., Mourad, A. H. I., Ochoa, A., Beltrán, F., & Cherupurakal, N. (2021). Study on the thermal stability of stabilized and unstabilized low-density polyethylene films. *Polymer Bulletin*, 78(9), 5225–5241. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03363-5>
- Bazihizina, N., Barrett-Lennard, E. G., & Colmer, T. D. (2012). Plant growth and physiology under heterogeneous salinity. En *Plant and Soil* (Vol. 354, Números 1–2, pp. 1–19). <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1193-8>
- Brahmanand, P. R. P. S., & Kumar Singh, A. (2022). Precision Irrigation Water Management - Current Status, Scope and Challenges. *Indian Journal of Fertilisers*, 18(4), 372–380. <https://www.researchgate.net/publication/360119350>
- Brar, A. S., Kaur, K., Sindhu, V. K., Tsolakis, N., & Srari, J. S. (2022). Sustainable water use through multiple cropping systems and precision irrigation. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130117. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130117>

- Buckley, T. N. (2019). How do stomata respond to water status? En *New Phytologist* (Vol. 224, Número 1, pp. 21–36). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15899>
- Caruso, G., Gennai, C., Ugolini, F., & Gucci, R. (2017). Gas exchange and growth response of young *Ficus carica* L. plants to water deficit and relief. *Acta Horticulturae*, 1173, 157–161. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1173.26>
- Caruso, G., Palai, G., Macheda, D., Tozzini, L., & Gucci, R. (2022). Growth, gas exchange, water relations, fresh and dry matter partitioning in young fig (*Ficus carica* L.) plants irrigated with saline water. *European Journal of Horticultural Science*, 87(2). <https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/023>
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. M. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S13593-015-0338-6>
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. En *Annals of Botany* (Vol. 103, Número 4, pp. 551–560). <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. En *Frontiers in Plant Science* (Vol. 4, Número NOV). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- CONAGUA. (2021a). Reporte del Clima en México. En *Reporte Anual 2020*.
- CONAGUA. (2021b). *Calidad del agua en México*. Calidad del Agua Subterránea a nivel nacional. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- CONAGUA. (2023, enero 31). *Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes*. Consulta a la base de datos del REPDA. <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2022). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Dannoura, M., Kominami, Y., Oguma, H., & Kanazawa, Y. (2008). The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root*, 2(April 2008), 14–18. <https://doi.org/10.3117/plantroot.2.14>
- De S. Andrade, I. P., De Carvalho, D. F., De Almeida, W. S., Gonçalves, J. B. S., & Da Silva, L. D. B. (2013). WATER REQUIREMENT AND YIELD OF FIG TREES UNDER DIFFERENT DRIP IRRIGATION MANAGEMENT. *Associação Brasileira de Engenharia Agrícola*, 1, 17–27.
- Dehbi, A., Mourad, A. H. I., Djakhdane, K., & Hilal-Alnaqbi, A. (2015). Degradation of thermomechanical performance and lifetime estimation of multilayer greenhouse polyethylene films under simulated climatic conditions. *Polymer Engineering and Science*, 55(2), 287–298. <https://doi.org/10.1002/pen.23895>
- Disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, (2015).
- Disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (2020).
- Duan, L., Sebastian, J., & Dinneny, J. R. (2015). Salt-stress regulation of root system growth and architecture in Arabidopsis seedlings. *Methods in Molecular Biology*, 1242, 105–122. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1902-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1902-4_10)
- El Diario de Coahuila. (2020, diciembre 22). *Gobierno del Estado ratifica impulso a la producción de higo en Coahuila*. Comunicado. <https://eldiariodecoahuila.com.mx/2020/12/22/gobierno-del-estado-ratifica-impulso-a-la-produccion-de-higo-en-coahuila/>
- El Financiero. (2018, octubre 12). *Se enfoca Coahuila al cultivo de higo*. <https://www.elfinanciero.com.mx/monterrey/se-enfoca-coahuila-al-cultivo-de-higo/>

- FAOSTAT. (2022a, diciembre 22). *Producción, Rendimiento y Área Cosechada del cultivo de Higo*. Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- FAOSTAT. (2022b, diciembre 23). *Valor de Importaciones y Exportaciones del Cultivo de Higo*. Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>
- Feddes, R. A., & Raats, P. A. C. (1978). Parameterizing the soil-water-plant root system. En *Unsaturated-zone modeling: progress, challenges and applications* (pp. 95–141). Kluwer Academic Publishers.
- Flores, P., Angeles Botella, M., Martínez, V., & Cerdá, A. (2002). Response to salinity of tomato seedlings with a split-root system: Nitrate uptake and reduction. *Journal of Plant Nutrition*, 25(1), 177–187. <https://doi.org/10.1081/PLN-100108789>
- García, Enriqueta. (1990). *Climas, 1: 4 000 000. IV.4.10 (A): Vol. II*. Instituto de Geografía, UNAM.
- García-Tejero, I., Jiménez-Bocanegra, J. A., Martínez, G., Romero, R., Durán-Zuazo, V. H., & Muriel-Fernández, J. L. (2010). Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. salustiano]. *Agricultural Water Management*, 97(5), 614–622. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.005>
- Giertych, M. J., & Leski, T. (2023). Split-root system as a useful tool to study woody plant biology. En *Plant and Soil*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06025-3>
- Gobierno De Coahuila. (2021, diciembre 30). *Productores coahuilenses evolucionan con el cultivo de higo*. <https://coahuila.gob.mx/noticias/index/productores-coahuilenses-evolucionan-con-el-cultivo-de-higo-30-12-21>
- Goldhamer, D. A., & Fereres, E. (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20(3), 115–125. <https://doi.org/10.1007/s002710000034>

- Golla, B. (2021). Agricultural production system in arid and semi-arid regions. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 234–244. <https://doi.org/10.17352/2455-815x.000113>
- Grupo Milenio. (2022, septiembre 26). *Productores laguneros exportarán higo a Estados Unidos*. <https://www.milenio.com/estados/coahuila-durango-productores-exportaran-higo-unidos>
- Hemaid, I., Ahemaidan, S., Mohamed, R. A., & Abd, A. (2017). Evaluation of salt tolerance ability in some fig (*Ficus carica* L.) cultivars using tissue culture technique. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 5(6), 29–39. <https://doi.org/10.7324/jabb.2017.50605>
- Heraldo de Saltillo. (2020). *Amplía Coahuila el programa de plantación de higo a 150 hectáreas*. Nota de prensa. <https://doi.org/https://www.elheraldodesaltillo.mx/2020/03/16/amplia-coahuila-el-programa-de-plantacion-de-higo-a-150-hectareas/>
- Higgins, S., Larsen, F., Bendel, R., Radamakeff, G., Bassman, J., & Bidlake, W. (1992). Comparative gas exchange characteristics of potted, glasshouse-grown almond, apple, fig, grape, olive, peach and Asian pear. En *Scientia Horticulturae* (Vol. 52).
- Hiwale, S. (2015). Fig (*Ficus carica*). En *Sustainable Horticulture in Semiarid Dry Lands* (First edit, pp. 159–175). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2244-6>
- Hochmuth, G. (2017). Drip Irrigation. En *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (pp. 79–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00005-1>
- INFONOR. (2022, julio 25). *Se quedan sin agua municipios de Coahuila*. <https://www.infonor.com.mx/articulo/entry/se-quedan-sin-agua-municipios-de-coahuila>
- Jovanovic, Z., & Stikic, R. (2018). Partial Root-Zone Drying Technique: from water Saving to the improvement of a Fruit Quality. *Front. Sustain. Food Syst*, 1, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2017.00003>



- Khapte, P. S., Kumar, P., Burman, U., & Kumar, P. (2019). Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. *Scientia Horticulturae*, 248(October 2018), 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.006>
- Köppen, W. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64(193–203), 243–248.
- Kusakabe, A., Contreras-Barragan, B. A., Simpson, C. R., Enciso, J. M., Nelson, S. D., & Melgar, J. C. (2016). Application of partial rootzone drying to improve irrigation water use efficiency in grapefruit trees. *Agricultural Water Management*, 178, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.012>
- La Jornada. (2022, junio 13). *Emergencia en los 38 municipios de Coahuila por falta de lluvias y calor extremo*. <https://www.jornada.com.mx/2022/06/13/estados/030n1est>
- Laribi, A. I., Palou, L., Intrigliolo, D. S., Nortes, P. A., Rojas-Argudo, C., Taberner, V., Bartual, J., & Pérez-Gago, M. B. (2013). Effect of sustained and regulated deficit irrigation on fruit quality of pomegranate cv. “Mollar de Elche” at harvest and during cold storage. *Agricultural Water Management*, 125, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.04.009>
- Lobos L., G., Veas V., A., Balbontin N., C., Muñoz A., V., Franck B., N., & Portilla S., Á. (2017). *Manejo hídrico en frutales bajo condiciones edafoclimáticas de Limarí y Choapa*.
- Melgarejo, P., Martínez, J. J., Hernández, F., Salazar, D. M., & Martínez, R. (2007). Preliminary results on fig soil-less culture. *Scientia Horticulturae*, 111(3), 255–259. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2006.10.032>
- Mendoza-Castillo, V. M., Pineda-Pineda, J., Vargas-Canales, J. M., & Hernández-Arguello, E. (2019). Nutrition of fig (*Ficus carica* L.) under hydroponics and greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42(11–12), 1350–1365. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609510>
- Mendoza-Castillo, V. M., Vargas-Canales, J. M., Calderón-Zavala, G., Mendoza-Castillo, M. D. C., & Santacruz-Varela, A. (2017). INTENSIVE PRODUCTION SYSTEMS of

- FIG (*Ficus carica* L.) under GREENHOUSE CONDITIONS. *Experimental Agriculture*, 53(3), 339–350. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000405>
- Milenio. (2022, junio 17). *Coahuila. Ante desabasto, venden agua a domicilio en San Pedro*. <https://www.milenio.com/estados/coahuila-desabasto-venden-agua-domicilio-san-pedro>
- Moura, E. A., Mendonça, V., Figueirêdo, V. B., Oliveira, L. M., Melo, M. F., Irineu, T. H. S., Andrade, A. D. M., Chagas, E. A., Chagas, P. C., Ferreira, E. S., Mendonça, L. F. M., & Figueiredo, F. R. A. (2023). Irrigation Depth and Potassium Doses Affect Fruit Yield and Quality of Figs (*Ficus carica* L.). *Agriculture*, 13(3), 640. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030640>
- Nicola, S., Pignata, G., Ferrante, A., & Bulgari, R. (2020). *Water use efficiency in greenhouse systems and its application in horticulture*. <https://www.researchgate.net/publication/342397217>
- Ortuño, M. F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D. S., Biel, C., Mellisho, C. D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M. C., Casadesus, J., Bonany, J., & Torrecillas, A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97(1), 1–11.
- Pacheco De Souza, A., Carvalho, A., Silva, D. A., Leonel, S., & Escobedo, J. F. (2009). TEMPERATURAS BASAIS E SOMA TÉRMICA PARA A FIGUEIRA PODADA EM DIFERENTES ÉPOCAS. En *Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal-SP* (Número 2).
- Pisimisi, E., Vemmos, S. N., & Mili, E. (2012). The photosynthetic activity and evaluation of fruit quality in seven fig cultivars (*Ficus carica* L.). *Acta Horticulturae*, 940, 341–348. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.940.48>
- Preston, G. M., McBride, R. A., Bryan, J., & Candido, M. (2004). *Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the electrical capacitance method*.
- Radcliffe, D. E., & Simunek, J. (2010). *Soil Physics with HYDRUS* (1st Edition). CRC Press.

- Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017a). Irrigation Methods. En *Planning and Evaluation of Irrigation Projects* (pp. 353–363). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811748-4.00010-8>
- Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017b). Scheme Irrigation Efficiency. En *Planning and Evaluation of Irrigation Projects* (pp. 525–538). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811748-4.00018-2>
- Reddy, P. P. (2016). Deficit Irrigation. En *Sustainable Intensification of Crop Production* (pp. 241–252). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2702-4>
- Sa'adu, I., & Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review. En *Environmental Sciences Europe* (Vol. 35, Número 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9>
- SADER. (2019). *Compendio de indicadores 2018 Coahuila de Zaragoza*.
- Shah, F., & Wu, W. (2020). Use of plastic mulch in agriculture and strategies to mitigate the associated environmental concerns. En *Advances in Agronomy* (Vol. 164, pp. 231–287). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.06.005>
- Shani, U., Waisel, Y., Eshel, A., Xue, S., & Ziv, G. (1993). Responses to salinity of grapevine plants with split root systems. *New Phytologist*, 124(4), 695–701. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03860.x>
- SIAP. (2022). *Datos Abiertos*. Estadística de Producción Agrícola. [http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos\\_a.php](http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php)
- SIAP, (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). *Cierre de la producción agrícola (1980-2020)*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Soberanes-Pérez, A., Calderón-Zavala, G., López-Jiménez, A., & Alvarado-Raya, H. E. (2020). Biorreguladores para la Producción de Higo bajo Condiciones de Invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(1), 61–69. <https://doi.org/10.35196/RFM.2020.1.61>

- Srinivas, N. (2015). *Integrated nutrient and water management in fig (Ficus carica L.)* [Tesis de doctorado]. University of Agricultural Sciences.
- UNEP. (2021). *Plastics in agriculture: sources and impacts*.
- Vanguardia. (2021a, agosto 16). *Rostros de la sequía en Coahuila: sed por el derecho al agua*. <https://www.borderhub.org/noticias-especiales/rostros-de-la-sequia-en-coahuila-sed-por-el-derecho-al-agua/>
- Vanguardia. (2021b, diciembre 6). *Campo, sequía y omisión, secan acuífero de Coahuila*. <https://www.borderhub.org/noticias-especiales/campo-sequia-y-omision-secan-acuifero-de-coahuila/>
- Vanguardia. (2022, agosto 31). *Acaba sequía con 30% de capacidad ganadera en Coahuila*. <https://vanguardia.com.mx/coahuila/acaba-sequia-con-30-de-capacidad-ganadera-en-coahuila-KB3883396>
- Vázquez Yañes, C. (1999). *Ficus carica L. [Ficha técnica de especie]*. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?Id=20220305130646>
- Werner, L. M., Hartwig, R. P., Engel, I., Franzisky, B. L., Wienkoop, S., Brenner, M., Preiner, J., Repper, D., Hartung, J., Zörb, C., & Wimmer, M. A. (2022). Local and systemic metabolic adjustments to drought in maize: Hydraulic redistribution in a split-root system. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(5), 632–642. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200279>
- Zarei, M., Azizi, M., Rahemi, M., & Tehranifar, A. (2016). Evaluation of NaCl salinity tolerance of four fig genotypes based on vegetative growth and ion content in leaves, shoots, and roots. *HortScience*, 51(11), 1427–1434. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11009-16>