

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Riego deficitario controlado en los cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y  
tomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico bajo invernadero

Jean Carlo Tames Ortiz

TESIS, PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO  
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

AÑO 2022

Riego deficitario controlado en los cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y  
tomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico bajo invernadero.

Jean Carlo Tames Ortiz.

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO  
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA


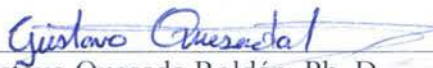
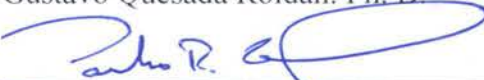



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA

AÑO 2022

Riego deficitario controlado en los cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico bajo invernadero.

Jean Carlo Tames Ortiz

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO  
CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

 Freddy Soto Bravo. Ph. D.	DIRECTOR TESIS
 Gustavo Quesada Roldán. Ph. D.	MIEMBRO TRIBUNAL
 Carlos Echandi Gurdian M. Sc.	MIEMBRO TRIBUNAL
 Juan Benavides Valverde. Ph. D.	MIEMBRO TRIBUNAL
 Luis Gómez Alpízar. Ph. D.	DIRECTOR ESCUELA
 Jean Carlo Tames Ortiz	SUSTENTANTE

2022

## **Dedicatoria.**

Esta tesis se la dedico a mi amada familia, agradezco profundamente todo el apoyo que me han brindado a través de los años.

A mi madre que todas las mañanas ha estado conmigo y que no me deja irme sin darle un beso y un abrazo.

A mi padre, por enseñarme que no importan los obstáculos de la vida, hay que abrirse paso en ella.

A mi hermana, la persona más inteligente que conozco, cuyo esfuerzo me demuestra que existen personas extraordinarias en este mundo.

**Ex nihilo nihil fit.**

Esta tesis está escrita con sudor y estrés.

## **Agradecimientos.**

Mi agradecimiento a Ph. D. Freddy Soto Bravo por brindarme esta oportunidad de aprendizaje, por el conocimiento tan valioso que me ofreció en el transcurso de este viaje y confiar en mi persona para llevar a cabo esta investigación.

Agradezco a Don Julio Vega, por todo el apoyo, a su conocimiento, amabilidad y a la paciencia que me brindó.

A Luis Oreamuno, por siempre estar pendiente del cultivo.

A mis queridos amigos, que, en tiempos de ayuda, me brindaron un poco de su valioso tiempo.

A la Universidad de Costa Rica, por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera al ofrecerme una beca de apoyo socioeconómico.

A todos ellos les estoy muy agradecido.

## Índice.

Resumen.....	1
1. Introducción. ....	2
2. Objetivos.....	5
Objetivo General .....	5
Objetivos específicos .....	5
3. Revisión de literatura. ....	6
3.1 Panorama general del agua en Costa Rica. ....	6
3.2 La eficiencia del uso del agua (EUA). ....	7
3.3 El riego deficitario controlado (RDC) en la agricultura.....	8
3.4 Factores asociados al riego.....	10
3.5 Requerimiento hídrico en tomate. ....	11
3.6 Requerimiento hídrico en chile dulce. ....	12
3.7 Variables morfológicas. ....	13
3.8 Variables Fisiológicas. ....	15
3.9 Variables de rendimiento. ....	16
4. Metodología. ....	17
4.1 Sitio experimental. ....	17
4.2 Condiciones microclimáticas. ....	17
4.3 Sistema de cultivo hidropónico.....	19
4.3.1 Características físicas del sustrato de cultivo. ....	19
4.4 Material experimental. ....	20
4.4.1 Trasplante. ....	21
4.5 Sistema de riego. ....	21
4.6 Nutrición de los cultivos. ....	22

4.7 Manejo agronómico de los cultivos .....	23
Manejo integrado de plagas y enfermedades. ....	23
4.8 Descripción del experimento.....	24
4.8.1 Tratamientos. ....	24
4.8.2 Curva de absorción de sustrato.....	24
4.8.3 Distribución del cultivo en el área experimental. ....	25
4.9 Variables de respuesta.....	27
Variables morfológicas:.....	27
Variables fisiológicas: .....	28
Productividad:.....	28
Variables de riego:.....	28
4.10 Análisis estadístico de los datos. ....	29
4.10.1 Descripción del modelo bloques completos al azar .....	30
5. Resultados.....	31
5.1.1 Morfología y fisiología en tomate:.....	31
5.1.2 Morfología y fisiología en chile dulce: .....	35
5.2.1 Comportamiento productivo del cultivo de tomate.....	39
5.2.2 Comportamiento productivo del cultivo de chile dulce. ....	40
5.3.1 Dinámica hídrica en el cultivo de tomate.....	42
5.3.2 Dinámica hídrica en el cultivo de chile dulce. ....	44
6. Discusión. ....	47
Tomate.....	47
Efecto del RDC sobre las variables morfológicas en tomate. ....	47
Efecto del RDC sobre las variables fisiológicas en tomate.....	48
Efecto del RDC sobre las variables de riego de tomate. ....	49

Efecto del RDC sobre el rendimiento en tomate. ....	51
Chile dulce. ....	52
Efecto del RDC sobre las variables morfológicas en chile dulce. ....	52
Efecto del RDC sobre las variables fisiológicas de chile dulce. ....	53
Efecto del RDC sobre las variables de riego en chile dulce. ....	54
Efecto del RDC sobre el rendimiento en chile dulce. ....	55
7. Conclusiones. ....	57
Recomendaciones. ....	57
8. Referencias bibliográficas. ....	58
9. Anexos. ....	72



## Índice de figuras.

- Figura 1.** Temperatura máxima, mínima y promedio dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica 2021. .... 18
- Figura 2.** Humedad máxima, mínima y promedio dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica 2021. .... 18
- Figura 3.** Integral de radiación solar global diaria dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica 2021. .... 19
- Figura 4.** Bandeja de riego a la demanda empleada para monitoreo del riego en cultivos de tomate y chile dulce en el invernadero de la EEAFBM. En rojo se marca la sonda capacitiva dieléctrica (DECAGON DEVICES mod. GS3), y en azul el pluviómetro de precisión (Mod. ECRN-100, ETCO Rain) (Fotografía tomada en junio, 2021). .... 22
- Figura 5.** Contenido de partículas sólidas y capacidad de aireación según curva de desorción de agua a diferente potencial mátrico; y contenidos de agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua total disponible (ATD), en la fibra de coco utilizada. Laboratorio de hortalizas de la Universidad de Costa Rica. .... 25
- Figura 6.** Distribución de los tratamientos de chile dulce y tomate según diseño experimental. Alajuela, Costa Rica, 2021..... 26
- Figura 7.** Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la hoja (A), longitud de hoja (B) y número de hojas (C), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). 31
- Figura 8.** Evolución de valores promedio durante tres etapas de muestreo del área foliar, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). .... 32

<b>Figura 9.</b> Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la longitud de tallo (A), diámetro de tallo (B) y cantidad de nudos (C), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO <sub>9</sub> ), 26% (TO <sub>26</sub> ) y 44% (TO <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	33
<b>Figura 10.</b> Valores promedio peso seco en tres muestreos durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO <sub>9</sub> ), 26% (TO <sub>26</sub> ) y 44% (TO <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	34
<b>Figura 11.</b> Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la hoja (A), longitud de hoja (B) y número de hojas (C), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). ....	35
<b>Figura 12.</b> Evolución de valores promedio durante tres etapas de muestreo del área foliar, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). ....	36
<b>Figura 13.</b> Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la altura de planta (A) y diámetro de tallo (B), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). 37	37
<b>Figura 14.</b> Valores promedio del peso seco en tres muestreos durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	38
<b>Figura 15.</b> Evolución de valores promedio quincenales del número de racimos, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO <sub>9</sub> ), 26% (TO <sub>26</sub> ) y 44% (TO <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	39

<b>Figura 16.</b> Evolución de valores promedio quincenales del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). (n = 9).....	41
<b>Figura 17.</b> Evolución de la evapotranspiración (ETc) semanal durante el ciclo de un cultivo de tomate hidropónico en invernadero, utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% (TO <sub>9</sub> ), 26% (TO <sub>26</sub> ) y 44% (TO <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9).....	43
<b>Figura 18.</b> Evolución de la evapotranspiración (ETc) semanal durante el ciclo de un cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero, utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9).....	45

## Índice de Cuadros.

<b>Cuadro 1.</b> Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce ( <i>Capsicum annuum</i> L.) y tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) hidropónico en invernadero.....	20
<b>Cuadro 2.</b> Aporte de las sales a utilizar para realizar el fertirriego en los cultivos de chile dulce y tomate en hidroponía bajo invernadero.....	22
<b>Cuadro 3.</b> Descripción de los tratamientos en ambos cultivos de tomate y chile dulce.	24
<b>Cuadro 4.</b> Rendimiento promedios total y comercial en el cultivo de tomate, obtenidos durante 180 días después del trasplante (DDT), utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% 26% y 44% de la humedad volumétrica en el sustrato, en el cultivo de tomate en hidroponía bajo invernadero (n = 9).....	40
<b>Cuadro 5.</b> Rendimiento promedios total y comercial en el cultivo de chile dulce, obtenidos durante 180 días después del trasplante (DDT), utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% 26% y 44% de la humedad volumétrica en el sustrato, en el cultivo de chile dulce en hidroponía bajo invernadero (n = 9). ....	41
<b>Cuadro 6.</b> Valores promedio de eficiencia de uso de agua (EUA), porcentaje de drenaje y frecuencia entre riegos durante el ciclo de cultivo de tomate hidropónico en invernadero. ....	42
<b>Cuadro 7.</b> Valores promedio de pH y conductividad eléctrica (CE) medido en el drenaje durante el ciclo de un cultivo de tomate hidropónico en invernadero. ....	43
<b>Cuadro 8.</b> Valores promedio de humedad volumétrica ( $\theta$ ) y conductividad eléctrica (CE) medidos del sustrato, durante el ciclo del cultivo de tomate hidropónico en invernadero. ....	44
<b>Cuadro 9.</b> Valores promedio de eficiencia de uso de agua (EUA), porcentaje de drenaje y frecuencia entre riegos durante el ciclo de cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero. ....	44
<b>Cuadro 10.</b> Valores promedio de pH y conductividad eléctrica (CE) medido en el drenaje durante el ciclo de un cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero. ....	45

**Cuadro 11.** Valores promedio de humedad volumétrica ( $\theta$ ) y conductividad eléctrica (CE) medidos del sustrato, durante el ciclo del cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero. .... 46

## Índice de Anexos.

<b>Anexo 1.</b> Evolución de valores promedio quincenales de la longitud de entrenudo, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO <sub>9</sub> ), 26% (TO <sub>26</sub> ) y 44% (TO <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	72
<b>Anexo 2.</b> Evolución de valores promedio quincenales de la longitud de entrenudo, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH <sub>9</sub> ), 26% (CH <sub>26</sub> ) y 44% (CH <sub>44</sub> ) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).....	72
<b>Anexo 3.</b> Análisis de varianza del número de hojas (NH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	73
<b>Anexo 4.</b> Análisis de varianza de la longitud de hoja (LH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	73
<b>Anexo 5.</b> Análisis de varianza del ancho de hoja (AH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	73
<b>Anexo 6.</b> Análisis de varianza de la longitud de tallo (LT), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	74
<b>Anexo 7.</b> Análisis de varianza del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	74

<b>Anexo 8.</b> Análisis de varianza del diámetro de tallo (DT), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	75
<b>Anexo 9.</b> Análisis de varianza del área foliar (AF), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	75
<b>Anexo 10.</b> Análisis de varianza de la calidad de fruta según categoría, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	76
<b>Anexo 11.</b> Análisis de varianza de la evapotranspiración del cultivo (ETc), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	76
<b>Anexo 12.</b> Análisis de varianza del número de hojas (NH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	77
<b>Anexo 13.</b> Análisis de varianza de la longitud de hoja (LH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	77
<b>Anexo 14.</b> Análisis de varianza del ancho de hoja (AH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	77
<b>Anexo 15.</b> Análisis de varianza de la longitud de tallo (LT), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	78

<b>Anexo 16.</b> Análisis de varianza del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.....	78
<b>Anexo 17.</b> Análisis de varianza del diámetro de tallo (DT), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ...	78
<b>Anexo 18.</b> Análisis de varianza del área foliar (AF), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	79
<b>Anexo 19.</b> Análisis de varianza de la calidad de fruta según categoría, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato. ....	79
<b>Anexo 20.</b> Análisis de varianza de la evapotranspiración del cultivo (ETc), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.....	80



## Resumen.

La potencial crisis del agua a nivel mundial se agudiza con el cambio climático y el aumento de la población mundial en las próximas décadas. Adicionalmente, el sector agrícola utiliza aproximadamente un 70% del recurso hídrico disponible. Por tanto, es imprescindible investigar metodologías que permitan aumentar la eficiencia de uso del agua (EUA). El riego deficitario controlado (RDC), es una técnica que permite incrementar la EUA, al reducir los aportes de riego aplicado al cultivo, manteniendo o incrementando el rendimiento. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del RDC de tres porcentajes de agotamiento hídrico en un sustrato de fibra de coco, sobre parámetros de manejo de riego, comportamiento morfológico, fisiológico y productivo de los cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero, con el fin de mejorar la eficiencia de uso del agua. El estudio se realizó en el año 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno localizada en La Garita de Alajuela, Costa Rica. Se aplicaron porcentajes de 9%, 26% y 44% de agotamiento de humedad volumétrica en el sustrato en los cultivos de tomate (TO) y chile dulce (CH). Se utilizó un diseño estadístico de bloques completamente al azar. Las variables de respuesta fueron número de hojas (NH), longitud de hoja (LH), ancho de hoja (AH), longitud de tallo (LT), diámetro de tallo (DT), número de nudos, área foliar (AF), número de bifurcaciones/racimos, peso seco, rendimiento total y comercial, evapotranspiración del cultivo (ETc) y eficiencia del uso de agua (EUA). En las variables morfofisiológicas de tomate no hubo efecto ( $p > 0,05$ ) del RDC sobre el NH, AH y LH. En DT, AF, peso seco (g) y número de racimos del cultivo de tomate, los tratamientos TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub> fueron estadísticamente superiores a TO<sub>44</sub>. El rendimiento en frutos de segunda, total y comercial en TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub> fue superior ( $p < 0,05$ ) a TO<sub>44</sub>. En parámetros de riego de tomate la mayor EUA se obtuvo en TO<sub>44</sub> con 24,9 kg m<sup>-3</sup>; la ETc en TO<sub>44</sub> fue menor a los demás tratamientos. En el cultivo de chile dulce, no hubo diferencias estadísticas en LH, AH, DT; mientras que LT, NH, AF, peso seco y número de bifurcaciones, el CH<sub>9</sub> fue superior ( $p < 0,05$ ). En rendimiento de frutos de primera, segunda, total y comercial, el tratamiento CH<sub>9</sub> fue estadísticamente mejor. En parámetros de riego de chile dulce, la mayor EUA se obtuvo en CH<sub>26</sub> con 17,2 kg m<sup>-3</sup>; la ETc en CH<sub>9</sub> fue superior a los demás tratamientos. Se concluye que el mejor porcentaje de agotamiento con RDC fue de 26% para tomate y de 9% para chile dulce.

## **1. Introducción.**

El tomate se caracteriza por ser un cultivo intensivo que se siembra durante todo el año. Es la hortaliza que más se siembra en Costa Rica y su producción se da mayormente en el Valle Central, donde según la época del año el 90% del cultivo se efectúa a campo abierto o semiprotegido y el 10% en ambiente protegido (López, 2017). En el año 2015, a nivel nacional, la actividad del cultivo de tomate generó ganancias por \$37 millones, con un consumo per cápita de 17,3 kg (López, 2017). Posteriormente, en el año 2018, se estimó que el área cultivada fue de 1100 ha con una producción total de 57 238 toneladas (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2020).

Por otra parte, en el año 2020 la siembra de chile dulce en Costa Rica abarcó un área de 500 ha con una producción total de 8533 toneladas (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2020). Su cultivo se realiza principalmente a campo abierto; el 54% utiliza sistema de riego por goteo y 42% siembra bajo algún tipo de ambiente protegido, ya sea sarán, casa sombra o bajo techo (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2014). Los rendimientos reportados van desde 8,2 t ha<sup>-1</sup> a 42,9 t ha<sup>-1</sup> en campo abierto, mientras que en ambiente protegido se pueden alcanzar rendimientos de 150 t ha<sup>-1</sup> (Elizondo & Monge, 2017).

El tema del recurso hídrico actualmente adquiere mucha importancia a nivel mundial debido a la potencial crisis global del agua (United Nations World Water Assessment Programme, 2016). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2019a), la agricultura en algunos países utiliza un 70% de recurso hídrico, llegando incluso al 95% en países en vías de desarrollo, lo que resalta la necesidad de realizar un uso eficiente del agua.

La problemática sobre este recurso se agudiza con el cambio climático y el incremento en la población mundial en las próximas décadas. Se estima que para el año 2050, la población incrementará a unos 9100 millones de habitantes, aumentando las necesidades alimentarias del planeta y consecuentemente la demanda de agua en la agricultura (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019b).

Actualmente existen tecnologías de riego que permiten mejorar la aplicación del recurso hídrico en los cultivos. El sistema de riego localizado por goteo consiste en la aplicación de agua al suelo por medio de mangueras delgadas o cintas de goteo que conducen el agua a presión; este sistema presenta varias ventajas, tales como una correcta distribución del agua, poca mano de obra para su operación, facilita la aplicación de insumos y mejora la eficiencia del uso de agua (Calvo, 2005). Además, este método de riego es ampliamente utilizado en invernaderos, con el fin de asegurar una aplicación localizada del agua, mejorando así la eficiencia de uso del recurso hídrico (Calvo, 2005).

El sistema de riego por goteo permite implementar alternativas de riego, tales como el riego deficitario controlado (RDC), una práctica que implica disminuir la cantidad de riego que necesita el cultivo para un crecimiento óptimo, con la finalidad de mejorar la respuesta de la planta a un nivel de estrés hídrico y optimizar la eficiencia del uso del agua (EUA), esta técnica se puede aplicar a una etapa específica del ciclo del cultivo, a una determinada zona radicular y en distintos grados de disminución de riego (Chai et al., 2016).

La respuesta del cultivo al RDC es variable según el genotipo, la etapa en la cual se aplica y la severidad del estrés. En cultivos susceptibles al estrés hídrico tales como el tomate y el chile dulce, la respuesta se manifiesta a nivel molecular, morfológico, fisiológico y celular; estas modificaciones en la planta llegan a afectar el rendimiento, debido a esto, es necesario el conocimiento detallado previo a la aplicación de esta metodología para evitar rendimientos inferiores a lo esperado (Florido & Bao 2014).

El uso del RDC tiene la finalidad de aumentar la EUA, no obstante, su mejora se apoya igualmente en prácticas de cultivo adecuadas como la deshoja, tutorado, poda, densidad de siembra y la nutrición balanceada; siendo el clima, genotipo y el manejo agronómico lo que llega a definir la demanda hídrica del cultivo (Soto, 2019).

Según estudios realizados en Cuba y Costa Rica, la EUA en el cultivo de tomate bajo condiciones de campo abierto osciló entre 100-300 L kg<sup>-1</sup>; mientras que en un sistema de invernadero se puede llegar a utilizar de 30 a 40 L kg<sup>-1</sup> de fruto producido (Stanghellini, 2010); por otro lado, el cultivo de chile dulce en condiciones protegidas puede llegar a utilizar de 20 a 35 L kg<sup>-1</sup> (Duarte, 2019; Tornés et al., 2020).

Esta investigación nace de la necesidad de incrementar la EUA en la agricultura, aplicando RDC en cultivos hortícolas importantes a nivel nacional como tomate y chile dulce, ya que, al traer mejoras en cuanto al riego necesario requerido por el cultivo, se traduce en un ahorro a futuro de este valioso recurso.

## **2. Objetivos**

### **Objetivo General**

Determinar el efecto del riego deficitario controlado de tres porcentajes de agotamiento hídrico en el sustrato de fibra de coco, sobre parámetros de manejo de riego, el comportamiento morfológico, fisiológico y productivo de los cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero, con el fin de mejorar la eficiencia de uso del agua.

### **Objetivos específicos**

1. Contrastar el comportamiento morfológico y fisiológico de los cultivos de chile dulce y tomate hidropónico en invernadero, bajo tres porcentajes de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en sustrato de fibra de coco.
2. Estimar el efecto de tres porcentajes de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en el sustrato, sobre el rendimiento de frutos de los cultivos de chile dulce y tomate en fibra de coco, bajo invernadero.
3. Determinar el efecto del nivel de agotamiento hídrico en el sustrato sobre parámetros de manejo de riego en los cultivos de chile dulce y tomate en fibra de coco, bajo invernadero.

### **3. Revisión de literatura.**

El recurso hídrico es altamente demandante en la agricultura, con una tendencia a aumentar su uso, debido a la creciente demanda de alimentos asociado al crecimiento de la población mundial. Esto conlleva a la necesidad de explorar alternativas que permitan un manejo más adecuado de este valioso recurso, ya sea implementando mejores prácticas de riego, ambientes protegidos y semillas mejoradas, entre otros, para así, aumentar la eficiencia de uso del consumo hídrico en el campo agrícola (Banco Mundial, 2020).

#### **3.1 Panorama general del agua en Costa Rica.**

En Costa Rica, el porcentaje de extracción total del agua por sector (la cual incluye el agua de recursos renovables primarios y secundarios, agua extraída del subterráneo, agua desalinizada, aguas residuales tratadas y aguas de drenaje para uso agrícola), en el año 2018 fue de 72% de agua para uso agrícola, 20% para el sector industrial y 7,5% para el sector municipal (Comisión económica para América Latina y el Caribe, 2021).

Conociendo que el mayor impacto en la extracción de agua lo realiza la parte agrícola, este sería el sector que podría verse amenazado ante una eventual escasez de agua, y es que para el 2100 se pronostica una disminución anual en las precipitaciones en las zonas del Caribe central (280 mm), Zona Norte (655 mm), Liberia (330 mm) y la Región Central (318 mm); por otro lado, se pronostica un aumento de las precipitaciones anuales en el Caribe sur (664 mm), Pacífico Sur (555 mm), Pacífico Central (515 mm) (Ordaz et al., 2010).

En relación a la problemática de escasez de agua, se ha determinado que el nivel de precipitación actual para la producción nacional de cultivos es óptimo. Sin embargo, las proyecciones climáticas futuras prevén disminuciones en las precipitaciones anuales, por lo que los rendimientos nacionales de los cultivos tenderán a disminuir (Ordaz et al., 2010).

Debido a esto, es que surge la necesidad de plantear alternativas para reducir el consumo de agua en agricultura, tales como mejoras en la infraestructura de riego, sistemas de riego más eficientes; la implementación de nuevos métodos para mejorar el

uso eficiente del agua y cambio en los patrones de uso; y mejorar la eficiencia de riego, entre otros (Sánchez & Reyes, 2015).

### **3.2 La eficiencia del uso del agua (EUA).**

La necesidad de mejorar el uso de agua en los cultivos es un tema que se remonta aproximadamente desde los años 1960, considerando que el sector agrícola utilizaba el 70% del recurso hídrico, por lo que la agricultura fue presionada a mejorar la EUA, aún más en zonas en las cuales el agua era muy escasa (zonas semiáridas y con poca precipitación anual); a esto se le sumaba la competencia de los sectores y la demanda del mercado por los productos agrícolas; dando paso a investigaciones enfocadas en este ámbito (Viets, 1962).

El concepto de EUA se define como el uso del agua que se requiere para alcanzar una producción específica o en los mejores casos, el aumento de la misma; y este concepto se puede abordar desde el punto de vista de riego, este relaciona la cantidad de agua utilizada en el cultivo y la cantidad de agua que se pierde de la fuente; del punto de vista fisiológico, el cual refleja la cantidad de biomasa obtenida y su relación con la pérdida de agua por transpiración, y finalmente desde el punto de vista económico, el cual considera todos los costos asociados al riego del cultivo (Salazar et ál., 2014; Velasco-Muñoz et al., 2018).

Entre los métodos que optimizan la EUA, la adecuada nutrición de los cultivos ha demostrado una relación positiva, atribuyéndose a una mejora en el crecimiento y consecuentemente en el rendimiento del cultivo (Martínez et al. 2016). Otra forma es reducir las pérdidas de agua por percolación y consecuentemente de nutrientes minerales, lo que a su vez tiene implicaciones en la disminución de costos de fertilización.

Por otra parte, la disminución de la evaporación junto a la reducción de la percolación, baja el uso energético necesario para el mantener la humedad óptima en el medio de cultivo; logrando así que se reduzca la explotación de los recursos hídricos; lo que finalmente ayudarían a mejorar la rentabilidad de la agricultura en zonas de escaso acceso al agua (López-Elías et al., 2016).

Otro método para mejorar la EUA, es la implementación de la tecnología de agricultura de precisión (AP), tales como los sistemas de posicionamiento global, sistemas de información geográfica y mapas de terrenos, complementado con estudios amigables con el medio ambiente (Orozco & Llano, 2016).

Un método que en los últimos años ha sido muy utilizado para mejorar la EUA, es la determinación de umbrales de riego (UR) aplicados en sistemas de fertiriego de precisión inteligente (IoT). Para determinar los UR se define un límite superior que es el valor máximo de humedad volumétrica sobre el cual hay excesos de agua para el cultivo, y un límite inferior que es el valor mínimo por debajo del cual, el cultivo entra en estrés fisiológico por déficit hídrico. El inconveniente es que no todos los umbrales están definidos, aunque se encuentren en la literatura, estos valores dependen del clima, genotipo, localización, tipo de sustrato, método de riego, aportes de riego y el manejo nutricional del cultivo (Lipinski y Gaviola, 2011; Soto, 2018).

Para determinar los UR se utiliza el método de riego deficitario controlado (RDC), el cual se basa en reducir los aportes de agua en determinadas etapas fisiológicas del cultivo, particularmente en los períodos de mayor sensibilidad al déficit hídrico, supliendo la demanda hídrica de la planta sin afectar el rendimiento y la calidad de frutos (Linares et ál., 2020; Rodríguez et ál., 2014).

### **3.3 El riego deficitario controlado (RDC) en la agricultura.**

Diferentes estudios en múltiples cultivos han demostrado que la práctica del RDC es muy útil para mejorar la EUA en agricultura (Rodríguez et ál., 2014). A nivel fisiológico en tomate, el RDC disminuye la asimilación del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y consecuentemente la tasa fotosintética, debido a la baja difusión del  $\text{CO}_2$  al sitio de carboxilación (Chaves et ál., 2009; Pinheiro & Chaves 2011). Aun así, estos factores no parecen estar involucrados en el crecimiento, sino más bien en la distribución y el uso de fotoasimilados en el órgano fuente (Pérez-Alfocea et ál., 2010).

En un estudio realizado con RDC en dos variedades de ajo (*Allium sativum*), considerada una especie altamente sensible al estrés hídrico en distintas etapas de cultivo (Lipinski y Gaviola, 2011), encontraron que el efecto del déficit hídrico varió según la etapa fenológica, mejorando la EUA durante la formación de bulbo. Además, se determinó



que la variedad también influyó, y que, aunque mejoró la EUA en etapa de bulbo, el RDC también puede generar pérdidas de producción, por lo que un conocimiento más detallado puede contribuir a evitar pérdidas en rendimientos.

En los cultivos de chile dulce y tomate los resultados del RDC han sido prometedores, tanto en sistemas de cultivo a campo abierto como en invernadero, y dependiendo de factores genéticos, climáticos y de manejo del cultivo, entre otros. Un estudio realizado en chile dulce por León et ál. (2019), se utilizó láminas de riego de 40, 60, 80, 100 y 120% de la ETc, utilizando un tanque de evaporación clase A para calcular la evapotranspiración de referencia. En dicho estudio la mayor EUA en función del rendimiento se obtuvo con un aporte de 40% de la ETc. Sin embargo, los autores concluyeron que la mejor alternativa de riego según el análisis económico de la producción es con 80% de la ETc, ya que cuenta con la mejor tasa de retorno marginal.

Resultados similares se obtuvieron en otro estudio realizado en *Capsicum annuum* L. var. grossum por Lodhi et ál. (2015), donde se determinó el impacto de los regímenes de riego en el crecimiento, rendimiento y EUA; aplicando láminas de agua de 10 y 30 mm, con distinta frecuencia de riegos. La mejor EUA se obtuvo con una lámina de riego de 10 mm con una duración de riego de 1 hora 14 minutos, mientras que utilizando láminas de riego de 30 el crecimiento, rendimiento y EUA fueron inferiores. El estudio menciona que convencionalmente se utilizan láminas de 30 mm, por lo cual una reducción a 10 mm contribuiría a mejorar evidentemente el consumo de agua.

En otro estudio similar (Ormaza y Rosado, 2018), aplicaron el RDC en la etapa inicial del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) utilizando tres tratamientos de déficit de riego de 10%, 20% y 30%. El tratamiento con 20% de RDC, obtuvo mayor altura, número de hojas y peso por fruto sin afectar el rendimiento.

Otro estudio en *C. annuum* L. var Ancho St. Luis realizado por (Dorji et ál. 2005), se aplicó riego comercial (RC), RDC (50% del riego comercial) y riego aplicado en la mitad de la zona radical utilizando un volumen de 50% del riego comercial (RM). Se obtuvo que, al realizar un RDC, el rendimiento y el tamaño de fruto se reduce, aumenta el aborto floral y disminuye la cantidad de frutos por planta, sin embargo, mejoró la calidad del fruto. Los autores concluyeron que esta estrategia de riego puede ser útil en zonas con

escasez de agua muy marcada, con el beneficio de una mejora en la calidad del fruto a expensas de una reducción en el rendimiento.

Por otra parte, en el cultivo de tomate las etapas fenológicas más sensibles para realizar un RDC, son las etapas de floración y desarrollo de fruto (Foolad, 2006; WiChombe et ál., 2008; Chen et ál. (2013). Al implementar esta práctica se obtiene frutos de menor peso, menor cantidad de frutos por planta y una disminución del área foliar y del número de flores (Florido & Bao 2014).

En un meta-análisis de datos de RDC en el cultivo de tomate, Lu et ál. (2019), encontraron que el rendimiento disminuyó entre un 3,8 y 4,8% independientemente del tratamiento de RDC aplicado, sin embargo, favoreció la calidad del fruto y mejoró así la EUA. Dichos autores concluyeron que la textura del suelo tiene un efecto significativo ante RDC fuertes y recomiendan realizar el tratamiento en las etapas tempranas de crecimiento, donde el rendimiento no se ve afectado significativamente. En dicho estudio, no se consideró el rendimiento según calidad de frutos, aspecto que podría ser utilidad para optimizar desde el punto de vista económico.

En relación a la idea anterior, estudios con RDC en tomate a diferentes etapas fenológicas, Chen et ál. (2013), cuantificaron el rendimiento y calidad de fruto de tomate bajo invernadero en los cultivares Jinzuan-3 y Taikong-1 durante dos años consecutivos. El estudio demostró que el RDC en etapas tempranas del cultivo no disminuyó el rendimiento, por lo que aplicando RDC en dicha etapa se puede ahorrar de 3 a 6% de agua. Adicionalmente, el RDC aplicado en etapas de floración y desarrollo, mejoró la calidad de fruto.

### **3.4 Factores asociados al riego.**

Existen varios factores que afectan la cantidad de riego a aplicar en un cultivo. Entre ellos está la humedad del suelo, la cual tiene distintas variables como lo es la capacidad de campo (CC); el punto de marchitez permanente (PMP), y el agua fácilmente disponible para las plantas que se encuentra entre CC y PMP; y el punto de saturación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2005).

Otro factor que influye en la cantidad de riego a aplicar al cultivo, es el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), el cual expresa la relación entre la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) y la evapotranspiración real ( $ET_c$ ), definida mediante la fórmula:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Donde:

$ET_c$  = evapotranspiración del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ ),

$K_c$  = coeficiente del cultivo (adimensional),

$ET_0$  = evapotranspiración del cultivo de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

El  $K_c$  cambia según el tipo de cultivo, su etapa fenológica y la morfología. Por tanto, en un mismo cultivo, este tiende a ser menor en las etapas iniciales del cultivo, luego aumenta debido al crecimiento vegetativo y finalmente decrece con la senescencia del cultivo (Calvo, 2005).

Del mismo modo que el suelo, el sustrato influye en el valor umbral de humedad para optimizar el riego, ya que un óptimo sustrato de fibra de coco, presenta una adecuada retención de humedad y de aireación, con un pH entre 5,5 y 6,2, lo cual estimula el enraizamiento de la planta (Valverde, 2011; Puerta et al., 2012).

### **3.5 Requerimiento hídrico en tomate.**

Las necesidades de riego en el cultivo de tomate dependen de varios factores, entre ellos la capacidad de retención de humedad del suelo, la tasa de evapotranspiración, las condiciones climáticas de la zona, la etapa fenológica y, del manejo agronómico del cultivo, entre otros (Antúnez & Felmer, 2017).

El nivel de tecnología en el cultivo en ambientes protegidos es otro factor que influye en los requerimientos hídricos de las plantas, por ejemplo, la cantidad de agua requerida para la producción de tomate en un invernadero con baja tecnología puede llegar a utilizar  $41 \text{ L kg}^{-1}$  de fruto producido, en comparación con un sistema de alta tecnología, que llega a utilizar  $24 \text{ L kg}^{-1}$  (Page et al., 2012).

En Costa Rica, el método de riego que más se utiliza en el cultivo de tomate, es por goteo localizado, ya que permite la aplicación de fertilizante directo al cultivo, contribuyendo a la disminución en la incidencia de enfermedades (López, 2017). Además,

la producción en invernadero ha demostrado que puede mejorar la EUA en un 20%, con aumentos en el rendimiento en un 19% (Biswas et al., 2015).

Algunos valores de  $K_c$  para calcular la cantidad de riego a aplicar en tomate, basados en el método de Hargreaves, diferencian tres etapas de cultivo, la fase inicial con una  $K_c$  de 0,25 - 0,50, la fase de mediados de ciclo con 1,05 - 1,25 y la fase final con valores entre 0,60-0,85 (Calvo, 2005).

Finalmente, se debe prestar especial atención al manejo del riego, ya que es el principal factor que afecta el rendimiento. En tomate, el manejo del riego inoportuno e insuficiente, promueve la aparición de enfermedades y desórdenes fisiológicos (Flores et al., 2007).

Entre los efectos adversos en el cultivo debido al déficit hídrico, están las siguientes: la tasa de crecimiento del cultivo disminuye, deficiencias nutricionales como por ejemplo el calcio, pérdida de racimos y flores; mientras que, ante un exceso de agua, se presenta un retraso en la floración y consecuentemente en la producción de frutos debido a que se pudre la raíz (López, 2017).

### **3.6 Requerimiento hídrico en chile dulce.**

Para cubrir las necesidades de agua del cultivo, en general se requieren láminas totales de riego de 600 a 900 mm. En el caso de ciclos vegetativos largos, se puede llegar a requerir hasta 1250 mm; siendo necesario un adecuado suministro durante el periodo vegetativo. Por lo tanto, para obtener un rendimiento óptimo del cultivo y aportar los requerimientos hídricos necesarios, el nivel de agotamiento de agua del suelo no debe exceder el 30-40% del agua total disponible (Orellana et al., 2000).

En cuanto a los valores de  $K_c$  para el cultivo de chile dulce se reportan valores para ser usados con la ecuación FAO Penman-Monteith  $E_{To}$  de 0,60 para la fase inicial; de 1,05-1,15 para mediados de estación y de 0,90 para el fin de temporada (Allen et al., 2006).

En un estudio realizado por Soto, (2019), en el híbrido de chile dulce Dulcítico en sustrato de fibra de coco bajo invernadero, utilizando dos densidades de siembra de 1,4 y 2,4 plantas  $m^{-2}$  y tres volúmenes de sustrato por planta de 7,14 y 21 L; encontró valores

máximos de  $K_c$  que van desde 0,08-0,15 en etapa de establecimiento a inicios de floración; con un incremento lineal ( $R^2 = 0,97$ ) durante la etapa de crecimiento rápido y finalmente 0,94 - 1,25 durante la etapa productiva. el estudio sugiere que los  $K_c$  en cultivo hidropónico en invernadero se reducen sustancialmente durante las etapas iniciales del cultivo.

Otro aspecto a considerar es la etapa fenológica en la que se encuentre la planta, y es que según detalla Ismail, (2010), la etapa más sensible del cultivo de chile dulce a un estrés hídrico, es la etapa de floración, exactamente la etapa al inicio de la floración, por lo que durante esta fase, el nivel de agotamiento que se le aplica a la planta no debe exceder el 25% de la evapotranspiración, ya que puede llevar a pérdidas de rendimiento producto de la disminución del número de frutos provocado por el aborto foliar.

Similar a lo que sucede con el cultivo de tomate, entre los efectos negativos para el cultivo de chile dulce cuando no se abastecen sus necesidades hídricas están el aborto y agrietamiento de frutos, provocando que el rendimiento se vea afectado; esto se debe a que se disminuye la actividad fotosintética, el transporte de sacarosa y el crecimiento celular (Jovicich et al., 2007; Quesada, 2015).

### **3.7 Variables morfológicas.**

Las características morfológicas de los cultivos son influenciadas por muchos factores, entre ellos el manejo del riego y de la nutrición. En el caso del cultivo de tomate, cuando se aplican tratamientos de RDC, el diámetro del tallo de las plantas tiende a ser más delgado debido a que ante un estrés hídrico este se contrae, producto de la incorporación de agua del floema mediante el flujo de transpiración; posteriormente durante la noche el tallo se expande como resultado de la rehidratación y crecimiento de la planta (Gallardo et al., 2006). Desde el punto de vista de manejo de la planta, esto tiene consecuencia en que tallos delgados son más propensos a quebrarse y a su vez presentan un menor crecimiento en altura.

Otro efecto del déficit hídrico en el tomate, es el aborto floral, al respecto, Silva et al., (2021), reportaron que un RDC del 55% de la evapotranspiración, aumenta el porcentaje de aborto floral y se tiene un menor número de flores por racimo, como consecuencia de una menor fotosíntesis y poca acumulación de macronutrientes como

nitrógeno, fósforo y potasio en las hojas. En otro estudio similar, Ismail & Mousa, (2014), reportaron que al aplicar una lámina del 70% de la evapotranspiración (W1) en tomate comparada con la aplicación de la lámina completa (W2), no hubo diferencias significativas en altura de planta durante el primer año de producción. No obstante, en el segundo año la altura fue mayor para W2, mientras que el peso fresco en W2 fue un 31% mayor en los dos años del experimento.

Debido a que la planta de tomate presenta un requerimiento hídrico del 90% de su peso fresco, realizar un RDC tiene resultados en el tamaño y calidad de sus frutos. Un experimento realizado por Mendonça et al., (2020), demostró que al aplicar láminas de riego del 50% de la evapotranspiración, la longitud y el diámetro del fruto disminuyeron un 13% y un 8% respectivamente en comparación a la aplicación del 100% de la ETc. El estudio concluyó que realizar un RDC puede favorecer el cultivo del tomate, siempre que se lleve a cabo un manejo adecuado y sin afectar las plantas.

Otras características morfológicas como el ancho y el largo de las hojas del cultivo de tomate son afectados por el agotamiento hídrico, probablemente debido a una limitada división celular y a una disminución en la elongación celular (Farooq et al, 2009). Este efecto fue verificado en un estudio realizado por Medyouni et al, (2021), el cual determinó que un déficit hídrico de 60% en plantas de tomate, redujo el ancho y largo de hoja un 9% en comparación al testigo con 100% de la ETc. La reducción en el tamaño de la hoja y la consecuente menor área foliar, pudo afectar el rendimiento producto de un desequilibrio entre fuente y sumidero, mientras que la calidad de frutos disminuyó por quemaduras de sol debido a la falta de cobertura foliar.

Asociado a la reducción en el tamaño de hojas producto del estrés hídrico, el área foliar disminuye, teniendo como consecuencia que la planta deba utilizar los azúcares acumulados de forma protectora, para realizar ajustes osmóticos, dejando menos recursos para crecimiento y producción (Patanè, 2011). El autor llegó a la conclusión de que una menor área foliar, disminuye la transpiración y que la actividad fotosintética es afectada ya que la planta tiene una menor intercepción de luz. Además, menciona que un RDC del 50% en tomate afecta de un 10-15% la intercepción de luz, lo que puede explicar el por qué la biomasa no se ve mayormente afectada.

### 3.8 Variables Fisiológicas.

Con respecto a las alteraciones fisiológicas que sufre la planta, está la pérdida de biomasa, atribuible a la disminución del potencial de turgencia, la cual es de importancia para la elongación celular ya que permite que la célula se expanda en su totalidad (Sussmilch et al., 2017). Por otra parte, como una respuesta fisiológica al estrés hídrico, ocurre el cierre estomático y la inhibición de la fotosíntesis, debido a que el flujo de ácido abscísico de las raíces hacia las hojas tiende a disminuir la apertura estomática, causando a su vez la disminución del tamaño de la hoja (May et al., 2011; Ullah et al., 2021).

En cuanto al proceso de elongación celular, esta requiere de una presión de turgencia generada dentro de la célula, producto de la osmosis, la cual permite la entrada de agua a la célula, haciendo que se mantenga una presión constante que va del interior hacia al exterior de la célula. Posterior a esto, ocurre un periodo de relajación de las paredes celulares, lo que hace que disminuya la turgencia celular, haciendo que el potencial hídrico de la célula se pierda, por lo que inicia nuevamente el proceso de entrada de agua a la célula para reestablecer este potencial, haciendo a su vez, que la célula se expanda (Cosgrove, 2014).

Respecto a lo anterior, Balaguera et al., (2008) reportaron que la expansión de las hojas y la altura de plántulas de tomate, disminuyeron al aplicar distintas láminas de riego desde 0,2 hasta los 2,0 mm de la evaporación medida en invernadero, mediante un tanque evaporímetro; en dicho estudio los tratamientos con mayor estrés hídrico, obtuvieron menos biomasa; lo que se atribuyó a un ajuste osmótico lento y a la poca extensibilidad de la membrana celular presente en las hojas.

Otro estudio desarrollado en Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), por Quinta et al., (2012), utilizando cuatro porcentajes de agotamiento: 60%, 50%, 40%, 30% y 20%; disminuyó el área foliar del cultivo al aumentar el estrés hídrico, lo que afectó directamente la producción de biomasa; llegando a la conclusión de que la disponibilidad de agua para el cultivo limita el desarrollo foliar.

Otras causas que pueden dar como resultado una reducción en la biomasa es la aceleración en la senescencia foliar (Husen, 2021), lo que contribuye a la pérdida de biomasa no por una disminución de crecimiento, sino más bien por una pérdida de hojas.

### **3.9 Variables de rendimiento.**

Una mejora en la EUA puede darse a expensas de una disminución en el rendimiento obteniendo menos frutos, pero de mayor calidad. Al respecto, un estudio realizado por Obreza et ál. (1996) en tomate var. Sunny, donde se aplicó RDC de 15 - 30%, se observó que la producción disminuyó y provocó pérdidas económicas de un 9 a 22%. Esto debido a que el mercado de tomate demandaba fruta extra larga y al aplicar los tratamientos el fruto modificó hacia una forma más redondeada. Lo anterior sugiere, que es necesario conocer la variedad de fruta y el mercado antes de realizar esta práctica en tomate.

En relación con lo anterior, en el cultivo de tomate Capraro et ál. (2019) implementaron un sistema de telemetría con la finalidad de registrar y monitorizar la información de clima, riego y cultivo. Para ello, aplicaron tres tratamientos con RDC: 100, 70 y 40% de ETc, donde obtuvieron bajos rendimientos en los tratamientos de 70 y 40% RDC, con diferencias de 13-26%; concluyendo que el RDC puede generar pérdida en calidad y rendimiento. Este estudio demostró que cuanto menor sea el riego aplicado en el cultivo, menor será el rendimiento obtenido. Por tanto, el éxito del RDC como herramienta para mejorar la EUA, se enfoca en encontrar el umbral de agotamiento hídrico en el cual se mantiene o se incrementa el rendimiento y calidad de fruto con un ahorro significativo de agua.

Finalmente, en un estudio en tomate y chile dulce bajo invernadero realizado por Soto (2018), aplicó dos tratamientos en cada cultivo, uno sin riego y el otro con riego como testigo, donde evaluó el contenido de humedad volumétrica, el potencial hídrico y la temperatura de la hoja. En el tratamiento sin riego, se encontró que dos días después de suspender el riego, hubo un efecto fisiológico negativo sobre la planta, ya que disminuyó significativamente el potencial hídrico e incremento apreciablemente la temperatura de la hoja. Esto se manifestó a una reducción de la humedad hasta un 32% en tomate y de 34% en chile dulce, valores cercanos al punto de marchitez permanente (30%).



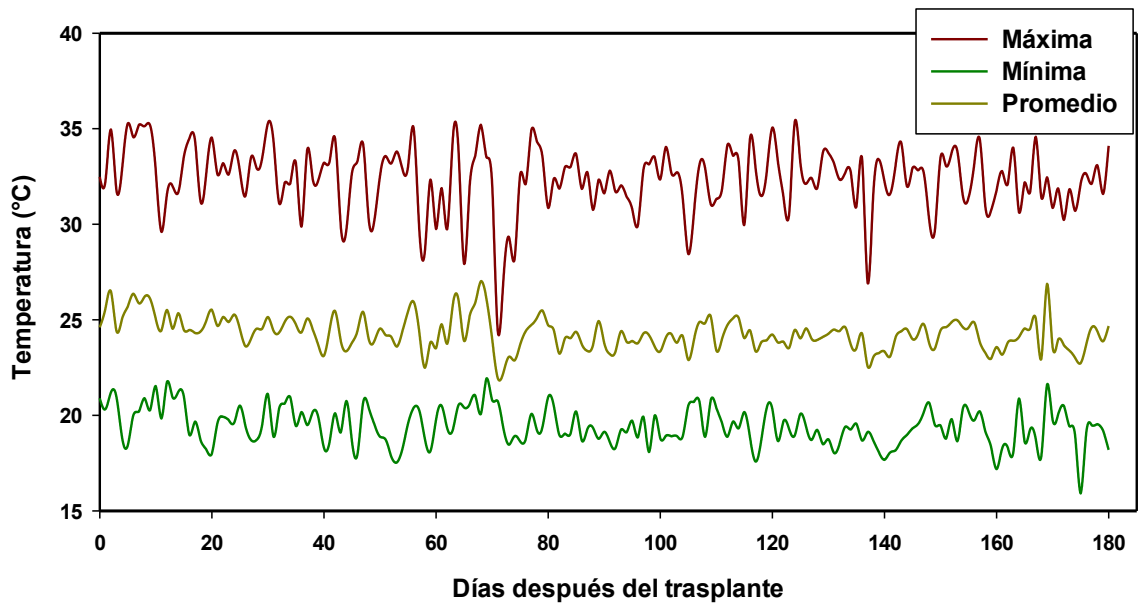
## **4. Metodología.**

### **4.1 Sitio experimental.**

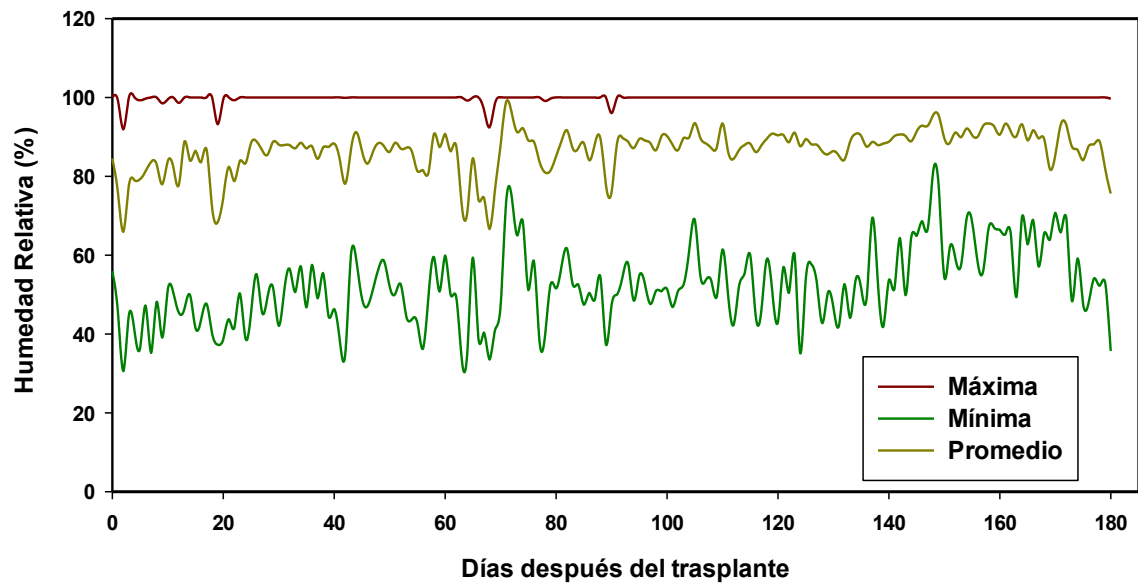
Esta investigación se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno Universidad de Costa Rica, en los meses que se comprenden de mayo a noviembre, del año 2021, ubicado en La Garita de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N y 84° 16' W, 840 msnm) con una precipitación anual promedio de 1940 mm, temperatura promedio de 21,3 °C y una humedad relativa promedio de 78%. Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con una cubierta de polietileno transparente de 200 µm y una malla anti-insectos de 43 mesh en las paredes, con una altura de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa, orientado en dirección este-oeste. El control de clima del invernadero fue pasivo combinado con el uso de motores que abren y cierran ventanas cenitales según la velocidad del viento.

### **4.2 Condiciones microclimáticas.**

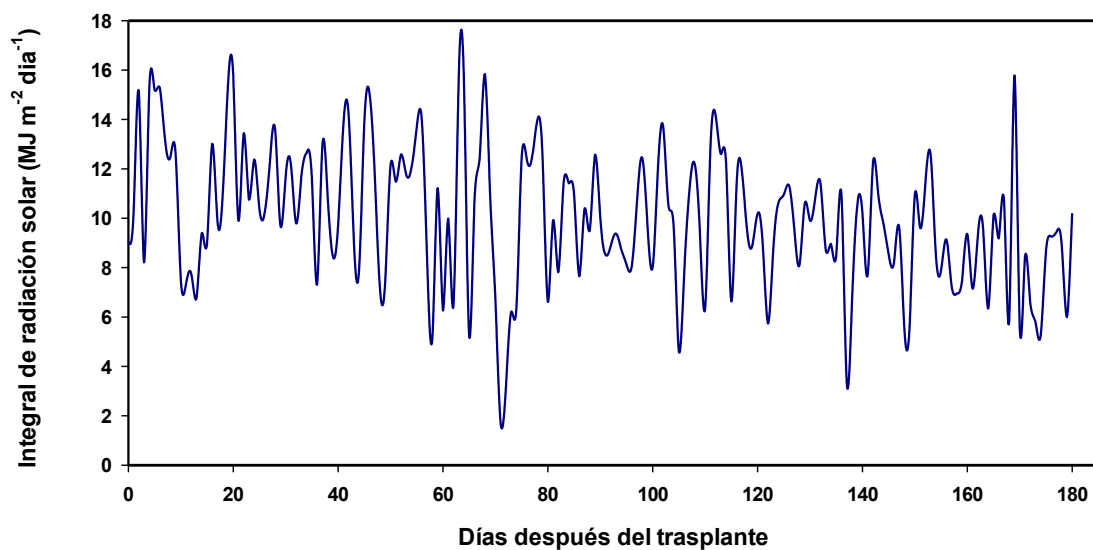
Durante la ejecución de la investigación, se monitoreó el clima en el interior del invernadero, que incluyó la temperatura (Figura 1), la humedad del aire (Figura 2), (VAISALA Modelo HMP-35C) y la radiación solar global (Figura 3) (Piranómetro LICOR Modelo LI-200SA), (el proceso de evapotranspiración está limitado por la cantidad de energía disponible proveniente de la radiación solar (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura, 2006)); todos estos datos fueron almacenados en un "data logger" (Campbell Scientific. Mod. CR1000).



**Figura 1.** Temperatura máxima, mínima y promedio dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la



**Figura 2.** Humedad máxima, mínima y promedio dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica 2021.



**Figura 3.** Integral de radiación solar global diaria dentro del invernadero que se presentó durante el desarrollo del cultivo, según días después del trasplante (DDT), en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica 2021.

#### **4.3 Sistema de cultivo hidropónico.**

El cultivo se realizó en hidroponía bajo invernadero, utilizando pacas de fibra de coco (FICO®) con una dimensión de 100 cm largo × 15 cm alto × 12 cm ancho y un volumen aproximado de 18,2 L.

##### **4.3.1 Características físicas del sustrato de cultivo.**

Se realizó una curva de liberación de humedad volumétrica de fibra de coco para determinar los valores de capacidad de contenedor (CC), valores de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible. Las características físicas del sustrato (Cuadro 1) fueron obtenidas según la normativa UNE-EN-13041-2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007). Para ello, se recolectaron muestras de 15 pacas seleccionadas al azar s en el campo de cultivo. Para el análisis granulométrico se utilizó una columna de tamices (Geotech) con cinco frascos con sus respectivas cribas desde > 2,0 mm a 0,25 mm el primer frasco se llenó hasta el 100%, luego se agitó manualmente hasta obtener la separación de partículas en cada uno de los cinco frascos. Seguidamente, se determinó la distribución porcentual ( $p\ p^{-1}$ ) de cada fracción.

**Cuadro 1.** Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico en invernadero.

Características físicas	Valor
Partículas < 1 mm = índice de grosor (%)	77,10
Partículas entre 1 y 4 mm (%)	58,00
Partículas > 4 mm (%)	25,00
Densidad aparente (gr cm <sup>-3</sup> )	0,084
Densidad real (gr cm <sup>-3</sup> )	0,70
Porosidad total (%)	88,00
Partículas sólidas (%)	12,00

#### 4.4 Material experimental.

Para el chile dulce se utilizó el híbrido indeterminado desarrollado en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno “Dulcítico”, el cual presenta un tallo erecto ligeramente lignificado, cilíndrico y con ramificaciones dicotómicas, presenta un porte que puede alcanzar desde 1,5 m a nivel de campo hasta 3,0 m en invernadero (Mora et al., 2018). El cultivar se desarrolla en condiciones climáticas óptimas de 20 a 25 °C, humedades relativas de 60 y 80%, y con alturas de 800 a 2300 msnm, con el inicio de la cosecha entre los 75 y 90 días después de siembra, frutos de forma cónica color verde-rojizo, alto grado brix (Echandi, 2012) y un rendimiento de hasta 12,8 kg m<sup>-2</sup> (Soto-Bravo et al., 2020).

En tomate, se utilizó el híbrido determinado “Gladiador” proveniente de la compañía chilena, ANASAC; resistente a *Verticillium* y *Fusarium* 1 y 2, con resistencia intermedia al TYLCV, presenta un follaje vigoroso, con el inicio de cosecha de 70 a 100 DDT con fruto de forma globosa achatada con un peso medio de 180-240 g (Anasac Agropecuario, 2017), y rendimientos en ambiente protegido de 10,9 kg m<sup>-2</sup> (Betancourt, 2022).

#### **4.4.1 Trasplante.**

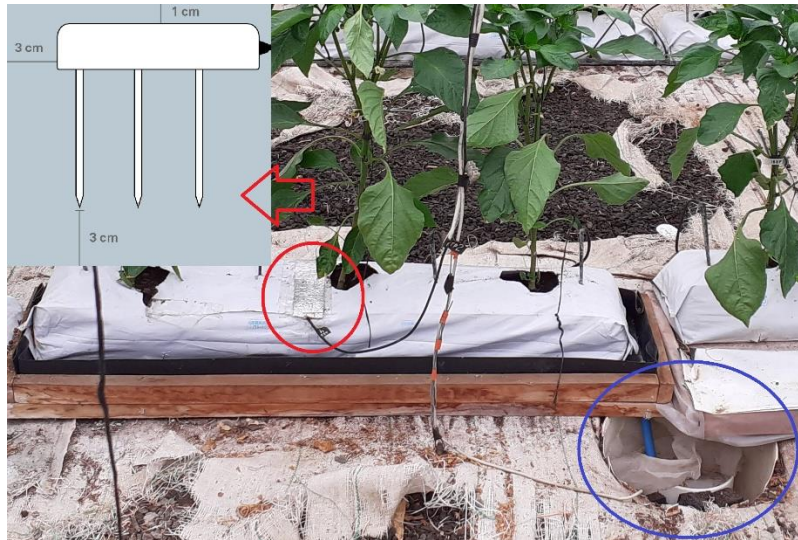
El almácigo de tomate fue encargado a una empresa que se dedica a la venta de semillas. El almácigo de chile dulce fue de elaboración propia, se realizó la siembra de la semilla en 8 bandejas con 128 espacios cada una, se utilizó peat-moss como sustrato (las bandejas fueron desinfectadas con una solución de yodo y luego con cloro y agua), posterior a la siembra, se humedeció el sustrato y se colocó en una cámara oscura para favorecer la emergencia de las semillas, durante la etapa de crecimiento, las bandejas fueron colocadas en el mismo invernadero en el cual se realizó la tesis. Las semillas fueron proporcionadas por M. Sc Carlos Echandi.

Antes de realizado el trasplante, se cuantificaron las características morfológicas que determinan la calidad del almácigo en diez plántulas seleccionadas al azar, tales como la altura (cm), longitud de raíz (cm), diámetro del tallo (mm), área foliar (cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), materia seca y relación raíz/parte aérea. Adicionalmente, se valoró la calidad del adobe (ausencia de raíz enrollada) y la sanidad del almácigo (raíz blanca u oscura). El trasplante se realizó a los 32 y a los 28 días después de la siembra, para los cultivos de chile dulce y tomate, respectivamente.

#### **4.5 Sistema de riego.**

Se utilizó un sistema de riego por goteo, con goteros autocompensados de 2,3 L h<sup>-1</sup> a una presión de operación de 14-18 psi, donde cada unidad experimental se irrigó de manera independiente y controlada por un sistema automático de bandeja de riego a la demanda. Además, se realizaron labores semanales de limpieza y mantenimiento, de los goteros y filtros, para asegurar un correcto funcionamiento del sistema de riego.

Se utilizó la bandeja de riego a la demanda del cultivo en tiempo real (Figura 4), compuesto por un caudalímetro (ARAD, Mod. SF 15) para cuantificar el volumen de agua aportada, un pluviómetro de precisión (ETCO Rain Mod. ECRN-100), para medir el volumen de drenaje y un sensor capacitivo (Decagon Devices®) denominado TDR (Time domain reflectometry) para monitorear el contenido de humedad del sustrato. Todos los datos recolectados son almacenados en el datalogger marca Campbell Scientific. Mod. CR1000.



**Figura 4.** Bandeja de riego a la demanda empleada para monitoreo del riego en cultivos de tomate y chile dulce en el invernadero de la EEAFBM. En rojo se marca la sonda capacitiva dieléctrica (DECAGON DEVICES mod. GS3), y en azul el pluviómetro de precisión (Mod. ECRN-100, ETCO Rain) (Fotografía tomada en junio, 2021).

#### 4.6 Nutrición de los cultivos.

Las concentraciones de nutrientes en solución nutritiva utilizada durante todo el ciclo de cultivo (Cuadro 2), fueron validadas en investigaciones previas por Monge (2020) para el cultivo de chile y Duarte (2018) para el cultivo tomate.

**Cuadro 2.** Aporte de las sales a utilizar para realizar el fertirriego en los cultivos de chile dulce y tomate en hidroponía bajo invernadero.

Concentración de nutrientes en solución nutritiva aplicada (mg L <sup>-1</sup> )													CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH
Ca	K	Mg	N	S	P	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo			
150	200	40	140	64,7	35,4	1	0,3	0,8	0,3	0,5	0,1	1,6	5,5	

La dosificación de nutrientes se realizó mediante un sistema de inyección proporcional que consta de tres inyectores tipo Venturi. Cada inyector está conectado a un tanque de 450 L con solución nutritiva concentrada denominados tanque A, B y C, los cuales contienen los nutrientes mayores, menores y el calcio, respectivamente. Cada

solución fue diluida con agua, proporcionalmente en un tanque de 2500 L. Este sistema de inyección se encuentra dirigido por otro sistema que censa el nivel de líquido en el tanque diluido y procede a rellenar cuando este llega al nivel inferior.

La solución nutritiva fue preparada a partir de las siguientes fuentes de fertilizantes: nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato mono potásico, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, molibdeno, ácido bórico, hierro quelatado, sulfato de cobre, sulfato de zinc, sulfato de manganeso y ácido nítrico.

#### **4.7 Manejo agronómico de los cultivos**

##### **Manejo integrado de plagas y enfermedades.**

Antes del establecimiento del cultivo se realizó un lavado del sistema de riego, bajando el pH del agua con nítrico a alrededor de pH 3. También se desinfectó con una mezcla de cloro y agua las pacas de fibra de coco, el suelo cubierto y las paredes del invernadero.

Con el objetivo de disminuir la carga química de la aplicación de productos fitosanitarios y mantener las poblaciones por debajo del umbral de plaga, se efectuaron monitoreos semanales de incidencia de plagas y enfermedades en los cultivos para aplicar según las necesidades.

En apego a las buenas prácticas de prevención de plagas, se utilizó un pediluvio para la desinfección de la suela del calzado y un lavatorio con jabón y alcohol para lavado de manos ubicados en el cubículo de entrada con doble puerta para evitar la entrada de plagas.

## 4.8 Descripción del experimento.

### 4.8.1 Tratamientos.

Se realizaron tres tratamientos de agotamiento hídrico en el sustrato (Cuadro 3) manteniendo un gradiente constante de disminución del agua total disponible (ATD: 4,7 L paca<sup>-1</sup>), entre capacidad contenedor (CC: 1 kPa) y punto de marchitez permanente (PMP: 10 kPa) (Figura 5); con la respectiva duración de cada vez que hubo un evento de riego.

**Cuadro 3.** Descripción de los tratamientos en ambos cultivos de tomate y chile dulce.

Tratamiento	Humedad Volumétrica (%)	Porcentaje de agotamiento según humedad volumétrica en sustrato	Agotamiento respecto a CC (L)	Duración de cada riego (minutos)
TO <sub>9</sub> y CH <sub>9</sub>	72	9	1,27	14
CH <sub>26</sub> y CH <sub>26</sub>	58	26	3,81	38
TO <sub>44</sub> y CH <sub>44</sub>	45	44	6,35	57

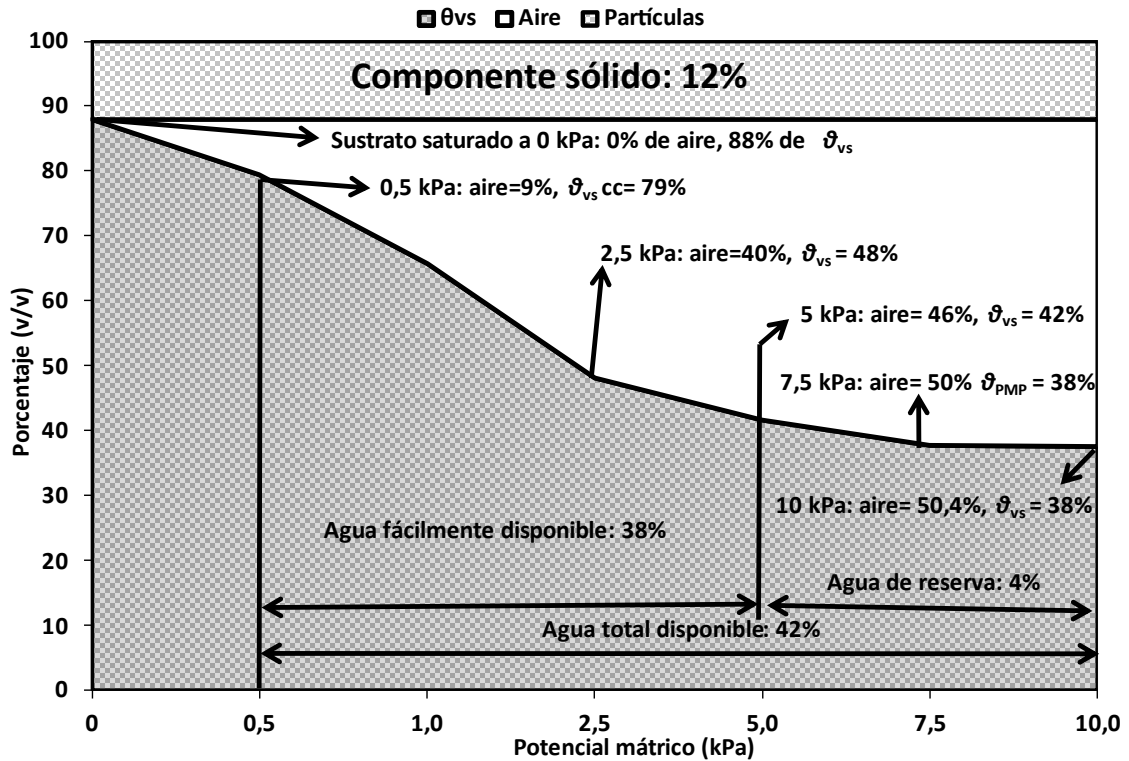
\*CH: Tratamiento chile dulce. \*\*TO: Tratamiento tomate.

### 4.8.2 Curva de absorción de sustrato.

Los agotamientos del contenido de humedad volumétrica en el sustrato fueron definidos según la curva de liberación de agua del sustrato (Figura 5) determinada previamente en laboratorio. Para ello se recolectaron al azar quince muestras del sustrato de fibra de coco en las pacas distribuidas en el área experimental en invernadero; utilizando un cilindro afilado que permite recolectar la muestra sin disturbar el sustrato.

A estos cilindros se les determinó el porcentaje de humedad en el sustrato utilizando el método de la caja de arena, el cual se basa en la dinámica hídrica en la planta representada a través de la curva de desorción de agua, sometiendo submuestras de sustrato a un potencial matricial ( $\psi_m$ ) creciente, en las cuales se determina el contenido de humedad volumétrica ( $\theta$ ) respectivo. Las muestras recolectadas se colocaron en cilindros de PVC (100 cm<sup>3</sup>) se saturaron con agua durante 24 horas, luego se dejan drenar y se someten progresivamente a succiones de 0,25, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 5,0, 7,5 y 10 kPa.





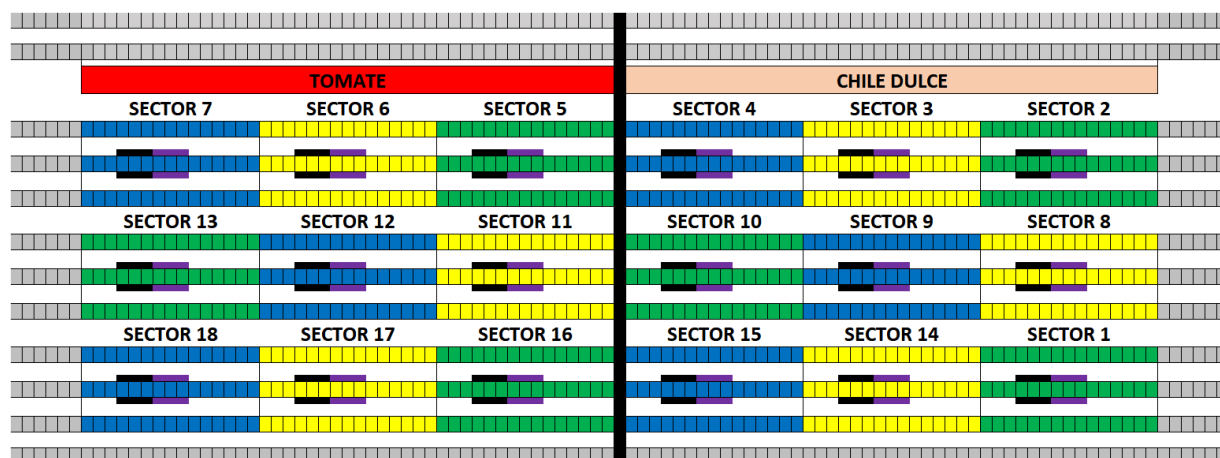
**Figura 5.** Contenido de partículas sólidas y capacidad de aireación según curva de desorción de agua a diferente potencial mátrico; y contenidos de agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua total disponible (ATD), en la fibra de coco utilizada. Laboratorio de hortalizas de la Universidad de Costa Rica.

#### 4.8.3 Distribución del cultivo en el área experimental.

El área de investigación estuvo compuesta por doce hileras con un distanciamiento de 1,5 m entre hileras. Cada hilera estaba conformada por treinta y cuatro sacos de fibra de coco, para un total de cuatrocientos ocho sacos en total. En cada saco se sembró tres plantas con un distanciamiento de 0,33 m entre plantas, para un total de 1224 plantas, con una densidad de dos plantas por metro cuadrado. De las 1224 plantas, 414 conformaron los bordes de la parcela y 810 fueron parte de la parcela útil.

En cada uno de los cultivos se utilizó un diseño experimental en bloques, donde los tratamientos correspondieron a los tres niveles de agotamiento de humedad en el sustrato, con tres repeticiones cada uno. Cada unidad experimental estuvo compuesta de tres hileras con cinco sacos de fibra de coco que contenían tres plantas/saco, para un total de quince sacos por unidad experimental y cuarenta y cinco plantas del cultivo a evaluar.

En el diseño experimental en campo (Figura 6), los colores verdes, amarillos y azules, corresponden a los tratamientos con 9, 26 y 44% de agotamiento hídrico en el sustrato, respectivamente, cada sector representa un bloque experimental. Los cuadros de color gris corresponden a los bordes, el color negro y morado corresponde a la canaleta de demanda inteligente y a la canaleta de recolección de riego respectivamente.



**Figura 6.** Distribución de los tratamientos de chile dulce y tomate según diseño experimental. Alajuela, Costa Rica, 2021.

#### **4.9 Variables de respuesta.**

Durante el periodo de la investigación, se evaluó variables de morfología, fisiología, rendimiento y riego.

##### **Variables morfológicas:**

Estas evaluaciones se realizaron quincenalmente en cada cultivo en nueve plantas por tratamiento, a excepción del número de hojas en chile dulce y el área foliar en ambos cultivos, los cuales se realizaron en tres muestreos destructivos.

1. Número de hojas (NH): Se realizó un conteo manual; en chile dulce se realizaron tres conteos en nueve plantas por tratamiento, durante tres periodos establecidos de fenología, los cuales abarcaron el inicio de la productividad, etapa media de productividad y etapa final del cultivo.
2. Longitud de hoja (LH): Se midió la hoja más nueva completamente expandida, desde el peciolo hasta la punta de la hoja.
3. Ancho de hoja (AH): Se midió desde el punto más ancho, la hoja más nueva completamente expandida.
4. Número de nudos o bifurcaciones: Se midió desde la base del tallo, el número de nudos presentes en el cultivo de tomate; en chile dulce se midió desde la primera bifurcación.
5. Longitud del tallo (LT): Medida desde la base del tallo hasta el ápice de la planta o el punto más alto en chile dulce.
6. Diámetro de tallo (DT): En tomate se midió el grosor del tallo entre el espacio del último racimo fecundado y la hoja superior, en caso de chile dulce la medición se realizó en la primera bifurcación.
7. Área foliar (AF): Se realizó la cosecha de tres plantas por repetición durante tres periodos establecidos de fenología, los cuales abarcaron el inicio de la productividad, etapa media de productividad y etapa final del cultivo. Las hojas fueron retiradas de cada planta y posteriormente se determinó el AF con una máquina de medición de área foliar (LI-COR Mod. 3100C).

### **Variables fisiológicas:**

Las evaluaciones de materia fresca y seca por componente de tallo, hojas y frutos por planta, fueron realizadas en tres etapas del ciclo del experimento en tres plantas/repetición y nueve plantas/tratamiento. Las etapas de muestreo abarcaron el inicio de la productividad, etapa media de productividad y etapa final del cultivo. Con la finalidad de medir la acumulación de biomasa y el contenido de humedad de la planta. Las plantas fueron pesadas en peso fresco, y luego se secaron en una estufa a 70 °C hasta peso constante para obtener el peso seco.

### **Productividad:**

El comportamiento productivo se evaluó por el número de racimos presentes en tomate y de bifurcaciones en chile dulce.

Además, en ambos cultivos se cuantificó el rendimiento de fruto fresco por planta y por m<sup>2</sup> para cada repetición y tratamiento, durante 16 y 17 semanas de cosecha en tomate y en chile dulce, respectivamente. Los frutos fueron clasificados según calidad, para chile dulce en primera (107-185 g, sin deformaciones ni manchas), segunda (81-132 g, con deformaciones y manchas), tercera (46-80 g) (Elizondo & Monge, 2017) y frutos de desecho (con daños o que no cumplen con el peso). En tomate se clasificó según calibre en primera (diámetro de 8 cm), segunda (diámetro de 6 cm), tercera (diámetro de 4 cm), (López, 2017) y frutos de desecho dañados o que no cumplían con el calibre comercial.

### **Variables de riego:**

Para cada repetición y tratamiento se realizaron mediciones diarias en el sustrato, y semanales en el volumen de solución drenada.

1. En el sustrato se midió la conductividad eléctrica (CE) y la humedad volumétrica con un sensor capacitivo TDR (Decagon Device, Mod. GS3), que mide la permisividad dieléctrica del medio la cual es proporcional a su contenido de humedad ( $\theta$ ) y calculada utilizando la ecuación de calibración del sensor. A la hora de medir la CE del medio, se hace referencia a la CE del agua, el sustrato y aire combinado, en donde el sensor hace la medición aplicando una pequeña corriente eléctrica alterna al medio y midiendo mediante los electrodos la resistencia entre ellos, con un rango de CE de 0 a 23 dSm<sup>-1</sup> (Alcaraz, 2013).

2. En el volumen de drenaje recolectado se midió el pH y la CE directamente en el campo, utilizando un pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod.HI98129).
3. El porcentaje de drenaje se determinó desde la bandeja de riego a la demanda, a partir de la relación entre el volumen de agua drenada medida con pluviómetro (Mod. ECRN-100, ETCO Rain) y el volumen de agua aplicada medida con caudalímetro (ARAD, Mod. SF 15).
4. La evapotranspiración del cultivo (ETc), definida como la cantidad de agua absorbida por el cultivo (Cisneros et ál., 2015), se determinó mediante la siguiente ecuación (Soto, 2013):

$$ETc = (Hvi - Hvf) + R - D$$

Donde:

- Hvi: es la humedad volumétrica en sustrato al inicio.
- Hvf: es la humedad volumétrica al final.
- R: corresponde al volumen de riego en sustrato (L m<sup>2</sup>)
- D: volumen de riego en el drenaje (L m<sup>2</sup>).

Se utilizaron los instrumentos de caudalímetro (ARAD, Mod. SF 15) para medir el volumen de riego (L) y el pluviómetro (Mod. ECRN-100, ETCO Rain) para medir el volumen de agua drenado (L).

5. La eficiencia de uso del agua (EUA: kg m<sup>-3</sup>) es la relación de la biomasa producida por unidad de agua utilizada por un cultivo (Salazar et ál., 2014). La EUA fue estimada con el rendimiento total de fruto fresco por planta y la cantidad de agua aplicada en todo el ciclo de la investigación.

#### **4.10 Análisis estadístico de los datos.**

Se procedió a realizar un análisis de normalidad y homocedasticidad de los datos generados. Cuando se cumplieron los supuestos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) mediante el uso del software InfoStat. Al detectarse efectos significativos en el ANDEVA, se realizó la prueba de diferencia de medias según Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC), con un P-Valor de 5%. Cuando no se cumplieron los supuestos, se procedió a utilizar un ANDEVA mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

#### 4.10.1 Descripción del modelo bloques completos al azar

Se siguieron los siguientes pasos para la realización del análisis de varianza:

Se cumplió los siguientes supuestos:

Normalidad:

- $H_0$ :  $H_0$ : los residuales siguen una distribución normal.
- $H_1$ :  $H_1$ : los residuales no siguen una distribución normal.

Homocedasticidad:

- $H_0$ :  $H_0$ : todas las varianzas son iguales.
- $H_1$ :  $H_1$ : no todas las varianzas son iguales.

Seguidamente se realizó un ANDEVA:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

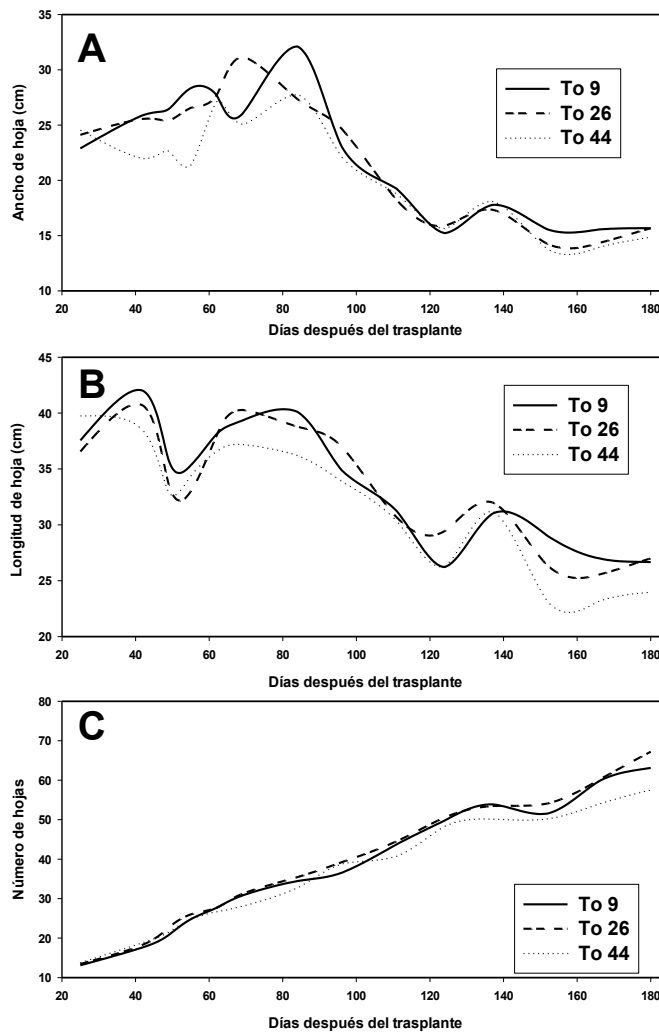
Donde:

- $\mu$  = media general.
- $\tau_i$  = efecto del  $i$  – *esimo* tratamiento.  $\begin{cases} i = 1 \Rightarrow 9\% \\ i = 2 \Rightarrow 26\% \\ i = 3 \Rightarrow 44\% \end{cases}$
- $\beta_j$  = efecto del  $j$  – *esimo* bloque.  $\begin{cases} j = 1 \Rightarrow \text{bloque 1} \\ j = 2 \Rightarrow \text{bloque 2} \\ j = 3 \Rightarrow \text{bloque 3} \end{cases}$
- $\epsilon_{ij}$  = error experimental en el bloque  $j$  – *esimo* del tratamiento  $i$  – *esimo*

## 5. Resultados.

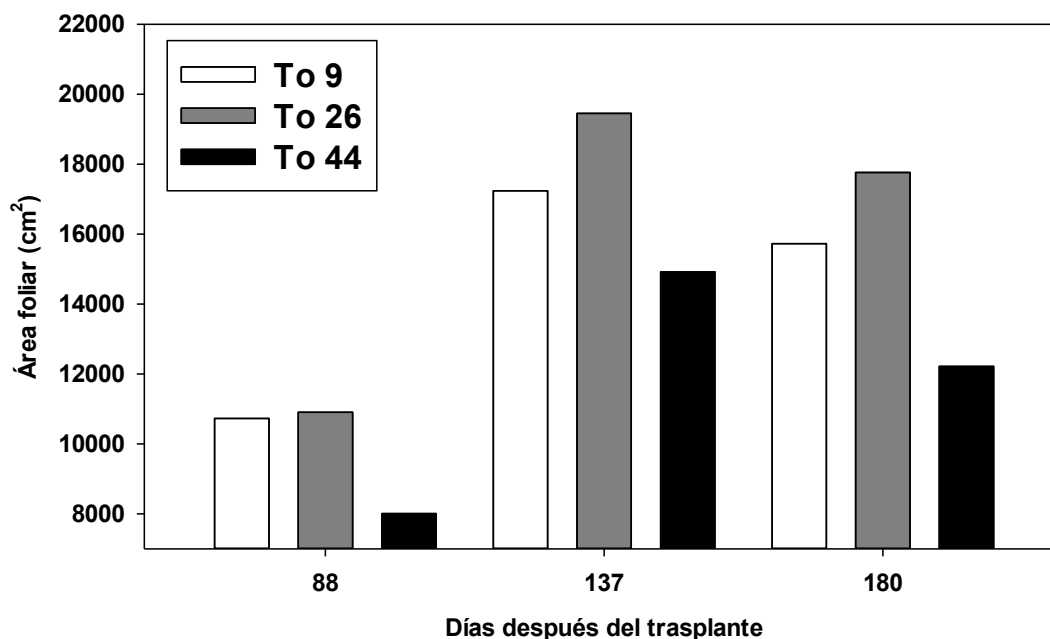
### 5.1.1 Morfología y fisiología en tomate:

El ancho de hoja (AH) (Figura 7, A), longitud de hoja (LH) (Figura 7, B) y número de hojas (NH) (Figura 7, C), no presentaron diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ), en su valor promedio durante el ciclo de cultivo, se presentó un valor máximo total de 32 cm y mínimo de 14 cm para ancho de hoja, para longitud de hoja un valor máximo total de 42 cm y mínimo de 23 cm, finalmente para número de hojas, se llegó a presentar un máximo total de 67 hojas por planta.



**Figura 7.** Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la hoja (A), longitud de hoja (B) y número de hojas (C), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).

El área foliar (AF) (Figura 8) presentó diferencias estadísticas en cuanto al valor promedio durante el ciclo de cultivo ( $p < 0,05$ ), entre el tratamiento  $TO_{44}$  y los tratamientos  $TO_9$  y  $TO_{26}$ , siendo  $TO_{44}$  un 24% menor, con un valor máximo total de 14920  $cm^2$  y mínimo de 8006  $cm^2$ .

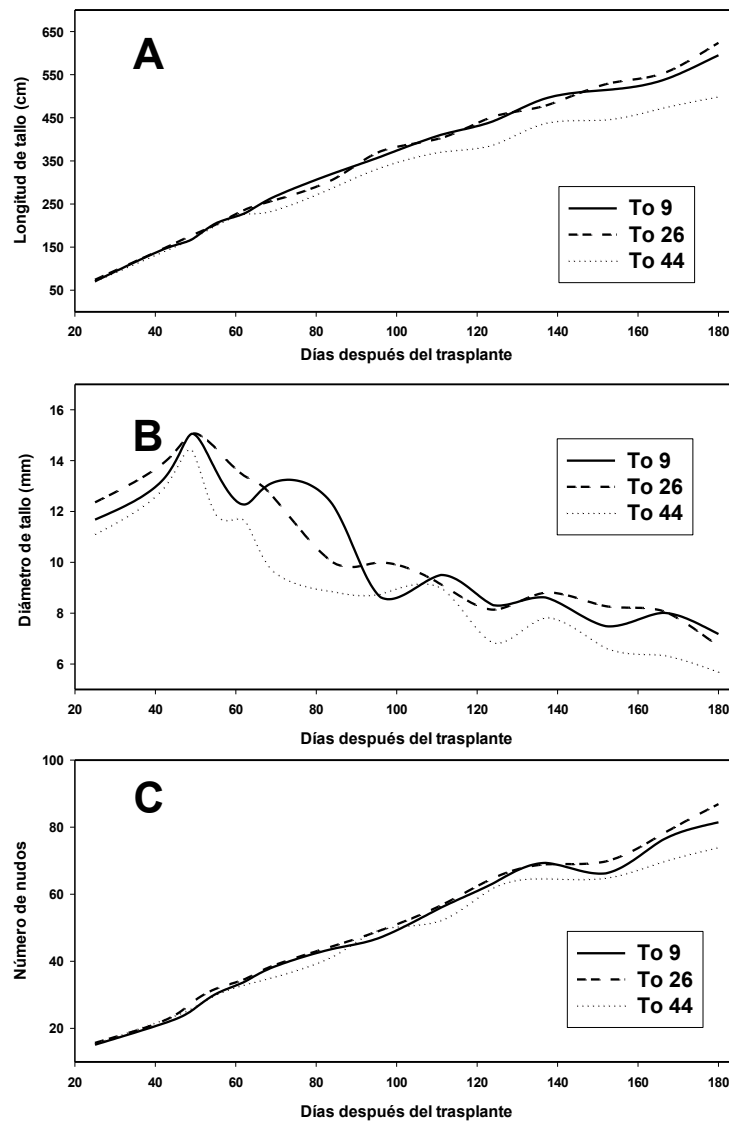


**Figura 8.** Evolución de valores promedio durante tres etapas de muestreo del área foliar, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% ( $TO_9$ ), 26% ( $TO_{26}$ ) y 44% ( $TO_{44}$ ) de la humedad volumétrica en el sustrato ( $n = 9$ /muestreo).

La altura total de la planta (LT) (Figura 9, A) y la cantidad de nudos totales (Figura 9, C), al final del ciclo de cultivo presentó diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ), siendo  $TO_{44}$  menor en altura un 18% y un 12% en la cantidad de nudos, en comparación a los otros dos tratamientos.



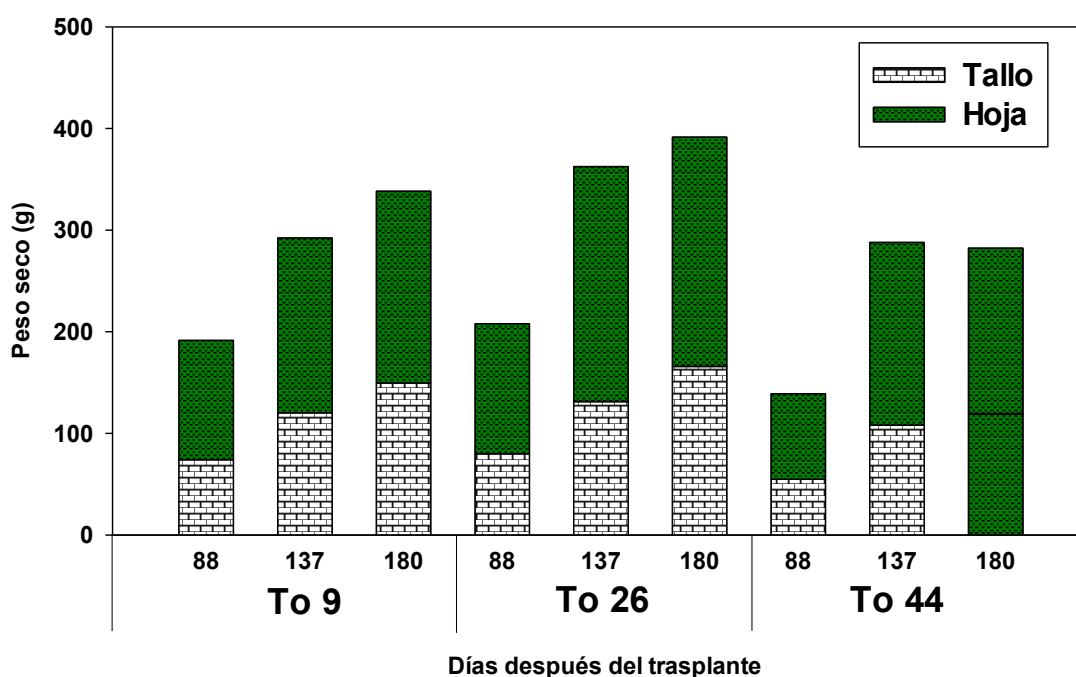
En diámetro de tallo (DT) (Figura 9, B), los tratamientos alcanzaron valores máximos similares a los 40 DDT. Posteriormente, se empezaron a evidenciar diferencias entre tratamientos, donde el DT promedio del tratamiento TO<sub>44</sub> fue estadísticamente inferior ( $p < 0,05$ ) al de los tratamientos TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub>, con valores similares entre estos último



**Figura 9.** Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la longitud de tallo (A), diámetro de tallo (B) y cantidad de nudos (C), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).

Para peso seco (Figura 10), se presentaron diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) entre valores promedio durante el ciclo de cultivo, entre el tratamiento  $TO_{44}$  y los tratamientos  $TO_9$  y  $TO_{26}$ , siendo  $TO_{44}$  en promedio 21% inferior. El tratamiento  $TO_{44}$  obtuvo un valor máximo de 288 g y mínimo de 139 g, mientras que  $TO_9$  y  $TO_{26}$  con valores similares, obtuvieron valores promedios máximos de 391 g y de mínimos de 191 g.

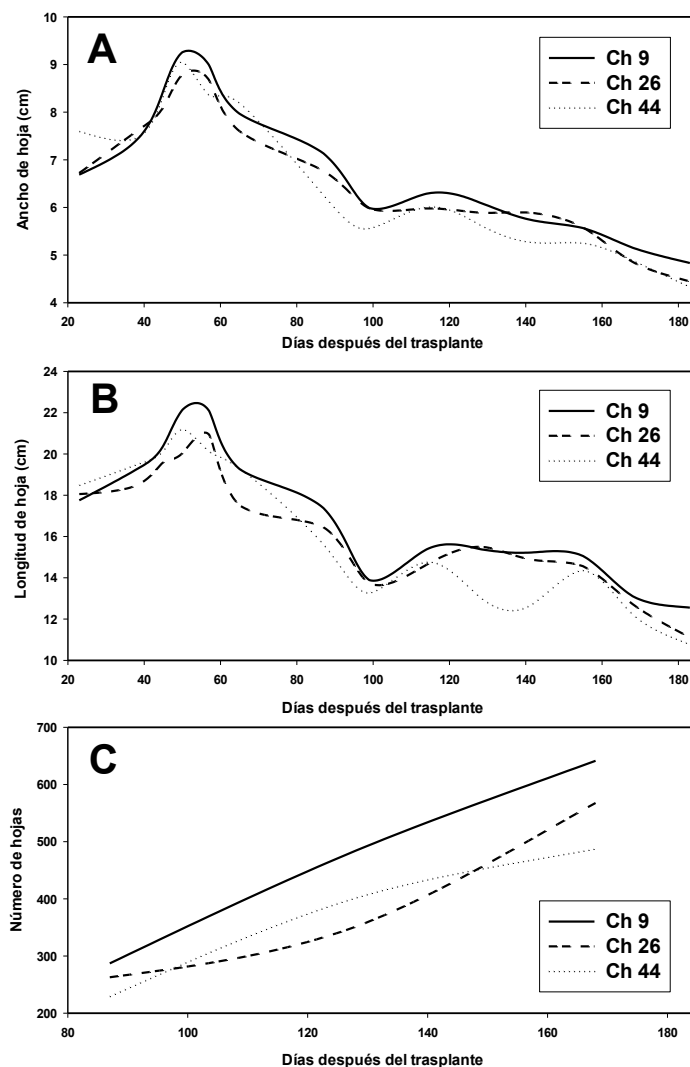
En cuanto a la distribución tallo-hoja en la planta, esta se mantuvo constante en los tratamientos, con un porcentaje de 60% hojas y un 40% tallos, esto para los tres tratamientos durante los tres muestreos realizados.



**Figura 10.** Valores promedio peso seco en tres muestreos durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% ( $TO_9$ ), 26% ( $TO_{26}$ ) y 44% ( $TO_{44}$ ) de la humedad volumétrica en el sustrato ( $n = 9/\text{muestreo}$ ).

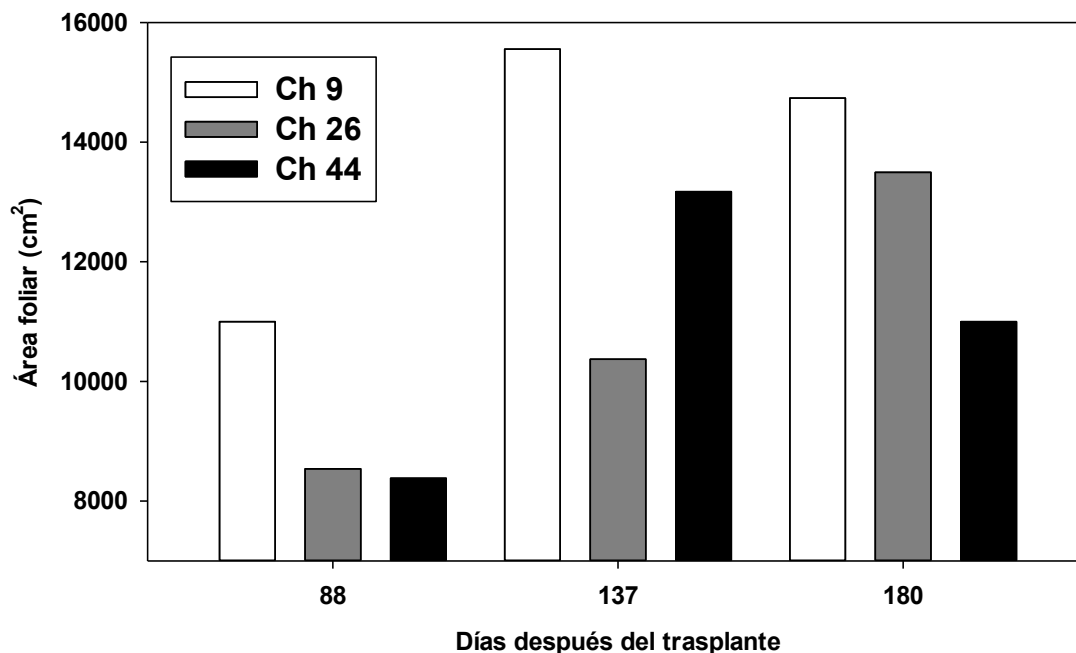
### 5.1.2 Morfología y fisiología en chile dulce:

El AH (Figura 11, A) (Figura 11, B), fue estadísticamente igual entre tratamientos ( $p > 0,05$ ); para LH, CH<sub>9</sub> fue estadísticamente superior, para el valor promedio durante el ciclo de cultivo, se presentó un valor máximo total de 9,3 cm para AH, para LH un valor máximo total de 22 cm, finalmente el NH (Figura 11, C), fue estadísticamente diferente, siendo Ch<sub>9</sub> superior en un 19% en comparación a Ch<sub>26</sub> y Ch<sub>44</sub>.



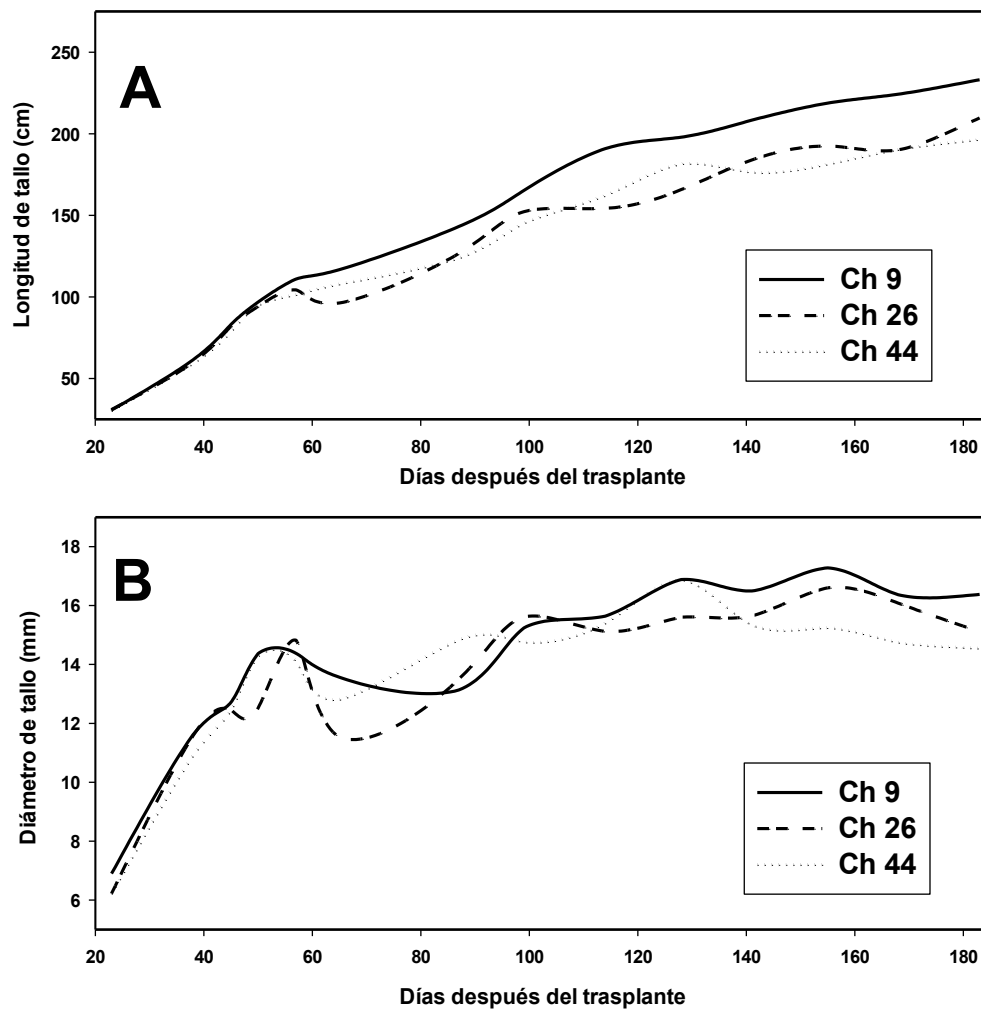
**Figura 11.** Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la hoja (A), longitud de hoja (B) y número de hojas (C), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH<sub>9</sub>), 26% (CH<sub>26</sub>) y 44% (CH<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).

El área foliar (Figura 12) fue estadísticamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre el tratamiento  $CH_9$  y los tratamientos  $CH_{26}$  y  $CH_{44}$ , esto para el valor promedio durante el ciclo de cultivo; siendo  $CH_9$  en promedio 21% superior, con un valor máximo total de  $15555 \text{ cm}^2$  y mínimo de  $10999 \text{ cm}^2$ , para  $CH_{26}$  y  $CH_{44}$  con un valor máximo total de  $13496 \text{ cm}^2$  y mínimo de  $8381 \text{ cm}^2$ .



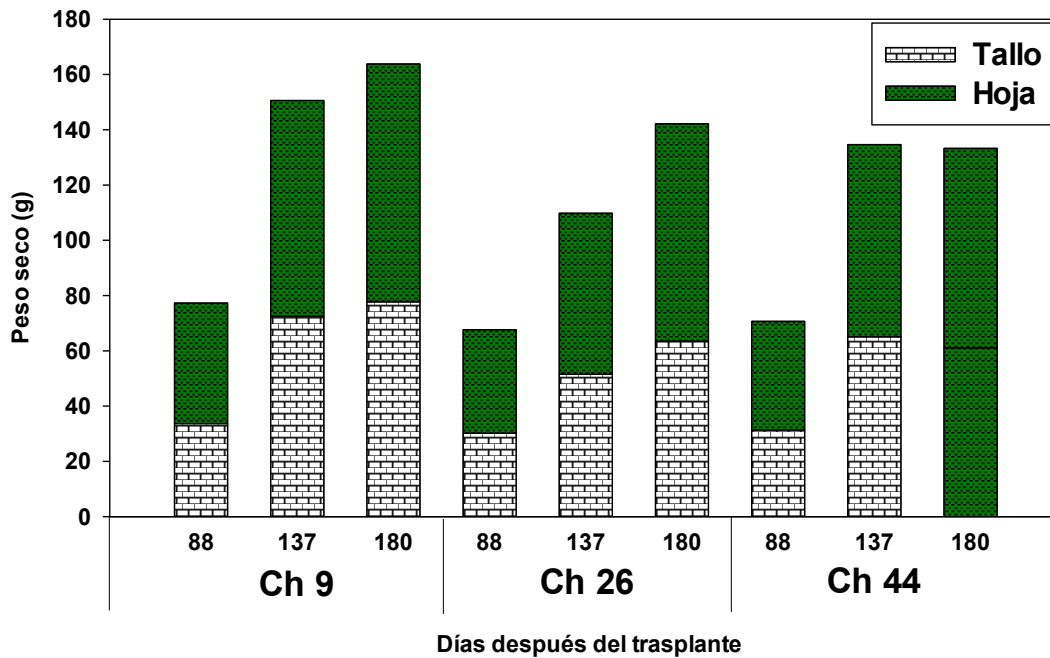
**Figura 12.** Evolución de valores promedio durante tres etapas de muestreo del área foliar, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% ( $CH_9$ ), 26% ( $CH_{26}$ ) y 44% ( $CH_{44}$ ) de la humedad volumétrica en el sustrato ( $n = 9/\text{muestreo}$ ).

La LT (Figura 13, A) fue estadísticamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre el tratamiento  $CH_9$  y los tratamientos  $CH_{26}$  y  $CH_{44}$ , con valores similares entre estos últimos, esto en cuanto al valor promedio durante el ciclo de cultivo. La mayor LT la alcanzó el tratamiento  $CH_9$  con un valor máximo total de 233 cm, frente a un valor promedio de 210 cm en los tratamientos  $CH_{26}$  y  $CH_{44}$ . El DT (Figura 13, B), fue estadísticamente igual ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos, alcanzando un valor máximo total de 17,3 mm en  $CH_9$ .



**Figura 13.** Evolución de valores promedio quincenales del ancho de la altura de planta (A) y diámetro de tallo (B), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% ( $CH_9$ ), 26% ( $CH_{26}$ ) y 44% ( $CH_{44}$ ) de la humedad volumétrica en el sustrato ( $n = 9$ /muestreo).

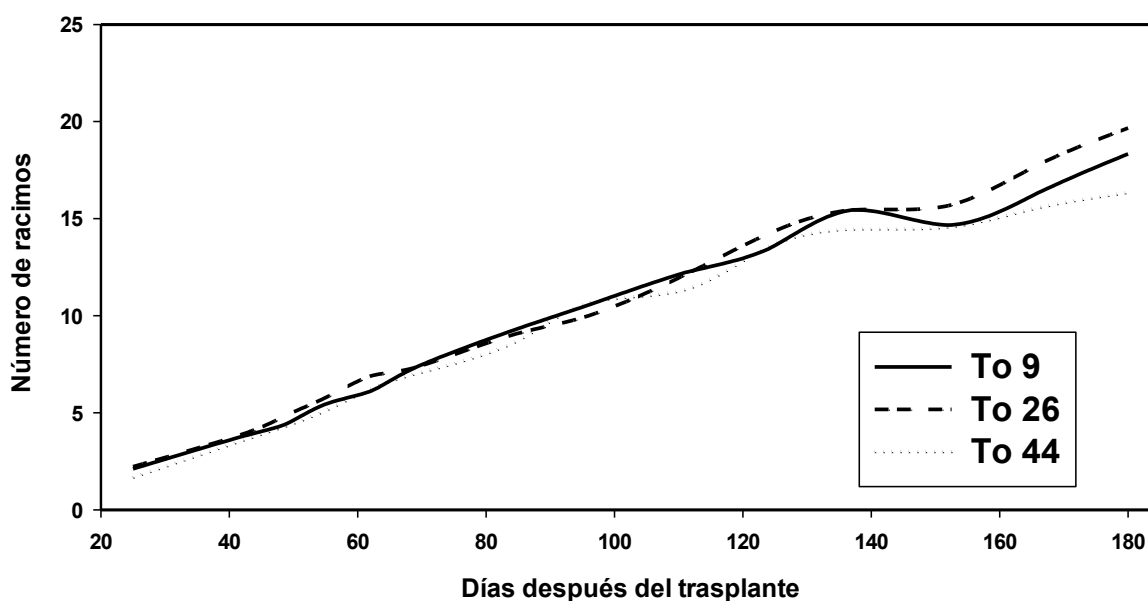
Para peso seco (Figura 14), se presentaron diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) en cuanto al valor promedio durante el ciclo de cultivo; entre CH<sub>9</sub> y los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub>, siendo CH<sub>9</sub> en promedio un 16% superior. El tratamiento presentó CH<sub>9</sub> con un valor máximo de 164 g y mínimo de 77 g, mientras que CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub> con valores máximos de 142 g y mínimos de 68 g.



**Figura 14.** Valores promedio del peso seco en tres muestreos durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH<sub>9</sub>), 26% (CH<sub>26</sub>) y 44% (CH<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).

### 5.2.1 Comportamiento productivo del cultivo de tomate.

El promedio de número de racimos durante el ciclo de cultivo de tomate (Figura 15), no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, sí hubo diferencias estadísticamente significativas en el número total de racimos al final del ciclo. Con un orden decreciente conforme incremento el porcentaje de agotamiento ( $TO_{44} < TO_{26} < TO_9$ ) promedio durante el ciclo de cultivo; dónde  $TO_{26}$  alcanzó una cantidad máxima total de 20 racimos por planta y  $TO_{44}$  obtuvo un máximo de 16 racimos.



**Figura 15.** Evolución de valores promedio quincenales del número de racimos, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% ( $TO_9$ ), 26% ( $TO_{26}$ ) y 44% ( $TO_{44}$ ) de la humedad volumétrica en el sustrato ( $n = 9$ /muestreo).

Para el cultivo de tomate (Cuadro 4), el TO<sub>44</sub> obtuvo el menor rendimiento ( $p < 0,05$ ) en frutos de segunda calidad y en el rendimiento total. Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre tratamientos, en producción de frutos de primera, tercera y de desecho.

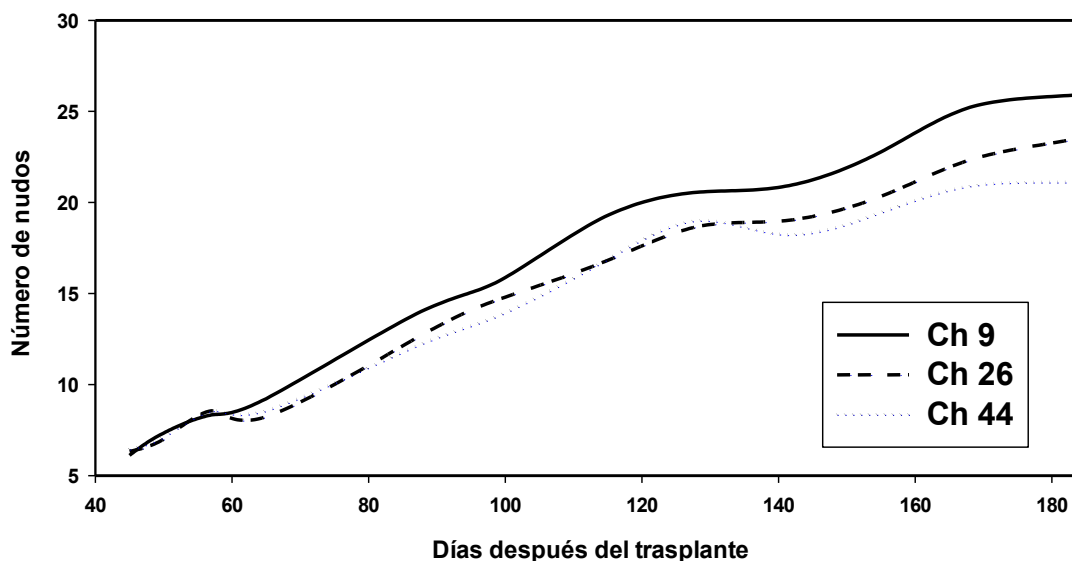
**Cuadro 4.** Rendimiento promedios total y comercial en el cultivo de tomate, obtenidos durante 180 días después del trasplante (DDT), utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% 26% y 44% de la humedad volumétrica en el sustrato, en el cultivo de tomate en hidroponía bajo invernadero ( $n = 9$ ).

Cultivo	Tratamientos	Rendimiento t ha <sup>-1</sup>					
		Primera	Segunda	Tercera	Desecho	COMERCIAL	TOTAL
Tomate	TO <sub>9</sub>	7,6	83,5 b	21,0	4,0	112,0 b	116,1 b
	TO <sub>26</sub>	7,0	84,3 b	21,8	6,1	113,1 b	119,2 b
	TO <sub>44</sub>	4,5	62,6 a	21,6	4,8	88,7 a	93,4 a

### 5.2.2 Comportamiento productivo del cultivo de chile dulce.

La cantidad nudos en el cultivo de chile dulce (Figura 16), presentó diferencias estadísticas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ) en cuanto al valor promedio durante el ciclo de cultivo, siendo CH<sub>9</sub> un 14% superior en comparación a los demás tratamientos, llegó a alcanzar una cantidad máxima total de 26 nudos por planta en el tratamiento CH<sub>9</sub> y de 22 en los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub>.





**Figura 16.** Evolución de valores promedio quincenales del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH<sub>9</sub>), 26% (CH<sub>26</sub>) y 44% (CH<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo). (n = 9).

El rendimiento promedio observado en el cultivo de chile dulce (Cuadro 5), muestra como CH<sub>9</sub> obtuvo diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) en comparación a CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub>, obteniendo un mayor rendimiento en frutos de primera y segunda calidad, así también para el rendimiento comercial. Por otra parte, no se observaron diferencias entre tratamientos en la producción de frutos de tercera y de desecho.

**Cuadro 5.** Rendimiento promedios total y comercial en el cultivo de chile dulce, obtenidos durante 180 días después del trasplante (DDT), utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% 26% y 44% de la humedad volumétrica en el sustrato, en el cultivo de chile dulce en hidroponía bajo invernadero (n = 9).

		Rendimiento t ha <sup>-1</sup>					
Cultivo	Tratamientos	Primera	Segunda	Tercera	Desecho	COMERCIAL	TOTAL
Chile dulce	CH <sub>9</sub>	22,5 a	32,6 a	17,4	4,5	72,5 a	77,0 a
	CH <sub>26</sub>	12,6 b	25,5 b	21,7	5,2	59,8 b	65,0 b
	CH <sub>44</sub>	11,6 b	24,1 b	19,9	4,3	55,6 b	59,9 b

### 5.3.1 Dinámica hídrica en el cultivo de tomate.

La EUA (Cuadro 6), fue estadísticamente igual ( $p > 0,05$ ) entre tratamientos; por su parte, TO<sub>44</sub> fue superior requirió menos agua por kilogramo de fruto producido.

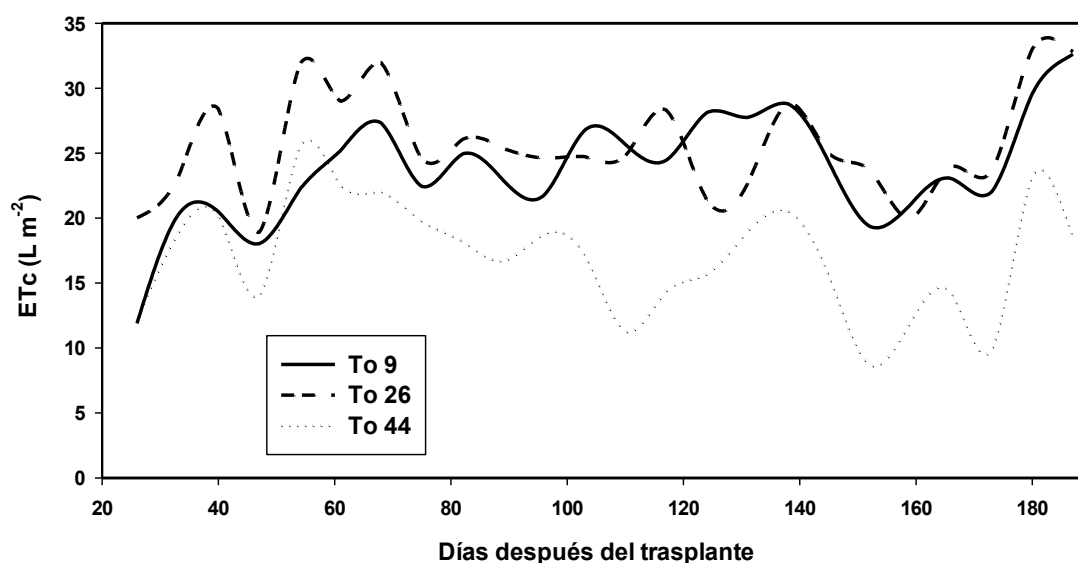
En otros parámetros de riego (Cuadro 6), el porcentaje de drenaje en el tratamiento TO<sub>9</sub> fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que los tratamientos TO<sub>26</sub> y TO<sub>44</sub>. El intervalo de riego fue estadísticamente diferente entre tratamientos ( $p < 0,05$ ), dónde TO<sub>44</sub> obtuvo la mayor frecuencia de riego, mientras que en TO<sub>9</sub> los riegos fueron más frecuentes.

**Cuadro 6.** Valores promedio de eficiencia de uso de agua (EUA), porcentaje de drenaje y frecuencia entre riegos durante el ciclo de cultivo de tomate hidropónico en invernadero.

Tratamiento	EUA (kg m <sup>-3</sup> )	EUA (L kg <sup>-1</sup> )	Drenaje (%)	Intervalo de riego (horas)
TO <sub>9</sub>	21,9	45,6	12,5 b	9 a
TO <sub>26</sub>	21,0	47,7	10,4 a	26 b
TO <sub>44</sub>	24,9	40,2	10,7 a	61 c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Los valores promedio de evapotranspiración del cultivo (ETc) de tomate (Figura 17), fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos ( $p < 0,05$ ). El tratamiento TO<sub>44</sub> presentó la menor ETc con un valor máximo de 25,5 L m<sup>-2</sup>, seguido por TO<sub>9</sub> con 32,6 L m<sup>-2</sup> y por último el tratamiento TO<sub>26</sub> con un valor máximo de ETc de 33,0 L m<sup>-2</sup> y.



**Figura 17.** Evolución de la evapotranspiración (ETc) semanal durante el ciclo de un cultivo de tomate hidropónico en invernadero, utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9).

El pH promedio obtenido en el drenaje durante el ciclo del cultivo de tomate (Cuadro 7), no fue estadísticamente diferente entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Respecto a la CE (Cuadro 7), el tratamiento TO<sub>44</sub>, presentó una CE estadísticamente superior ( $p < 0,05$ ) a los tratamientos TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub>, sin diferencia entre estos últimos.

**Cuadro 7.** Valores promedio de pH y conductividad eléctrica (CE) medido en el drenaje durante el ciclo de un cultivo de tomate hidropónico en invernadero.

Tratamiento	pH	CE ( $\mu\text{Sm}^{-1}$ )
TO <sub>9</sub>	6,63 ± 0,13	3267 b ± 186
TO <sub>26</sub>	6,82 ± 0,13	3605 b ± 196
TO <sub>44</sub>	6,92 ± 0,12	2578 a ± 173

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

El promedio de  $\theta$  (Cuadro 8), presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ), donde el tratamiento TO<sub>9</sub> presentó los mayores valores de  $\theta$  mientras que TO<sub>44</sub> fue el menor de los tres tratamientos. La CE entre los tres tratamientos fue estadísticamente diferente ( $p > 0,05$ ), donde TO<sub>44</sub> presentó el menor valor (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Valores promedio de humedad volumétrica ( $\theta$ ) y conductividad eléctrica (CE) medidos del sustrato, durante el ciclo del cultivo de tomate hidropónico en invernadero.

Tratamiento	Humedad volumétrica (%)	CE ( $\mu\text{Sm}^{-1}$ )
TO <sub>9</sub>	81,30 c $\pm$ 0,05	946 c $\pm$ 2
TO <sub>26</sub>	71,59 b $\pm$ 0,05	600 b $\pm$ 1
TO <sub>44</sub>	63,45 a $\pm$ 0,05	256 a $\pm$ 1

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### 5.3.2 Dinámica hídrica en el cultivo de chile dulce.

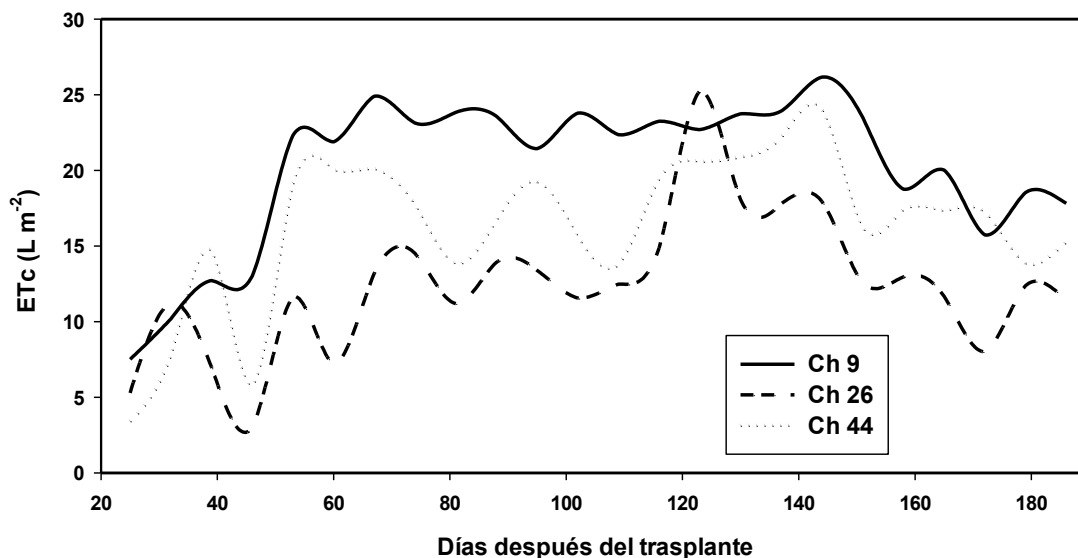
La EUA en  $\text{kg m}^{-3}$  (Cuadro 8), fue estadísticamente igual a los tratamientos ( $p > 0,05$ ), por su parte, CH<sub>26</sub> utilizó la menor cantidad de litros de agua para la producción de 1 kg de fruto. Respecto al porcentaje de drenaje (Cuadro 8), todos los tratamientos fueron estadísticamente distintos ( $p < 0,05$ ); mientras que el intervalo de riego fue menor en CH<sub>9</sub>, seguido de CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub> con la mayor frecuencia de riego (Cuadro X).

**Cuadro 9.** Valores promedio de eficiencia de uso de agua (EUA), porcentaje de drenaje y frecuencia entre riegos durante el ciclo de cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero.

Tratamiento	EUA ( $\text{kg m}^{-3}$ )	EUA ( $\text{L kg}^{-1}$ )	Drenaje (%)	Intervalo de riego (horas)
CH <sub>9</sub>	16,3	61,4	13,1 c	12 a
CH <sub>26</sub>	17,2	58,1	11,3 a	39 b
CH <sub>44</sub>	16,7	59,9	12,7 b	59 c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Los valores de evapotranspiración del cultivo (Figura 18), en CH<sub>9</sub> fueron estadísticamente superiores ( $p < 0,05$ ) a los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub> durante todo el ciclo de cultivo, llegando a obtener valores máximos de 24,0 L m<sup>-2</sup> en CH<sub>44</sub>, 25,2 L m<sup>-2</sup> en CH<sub>26</sub>



**Figura 18.** Evolución de la evapotranspiración (ETc) semanal durante el ciclo de un cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero, utilizando tres distintos porcentajes de agotamiento de 9% (CH<sub>9</sub>), 26% (CH<sub>26</sub>) y 44% (CH<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9).

El pH obtenido del drenaje en el cultivo de chile dulce (Cuadro 10), no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Respecto a la CE (Cuadro 10), el tratamiento CH<sub>44</sub> fue estadísticamente inferior ( $p < 0,05$ ) a los otros tratamientos.

**Cuadro 10.** Valores promedio de pH y conductividad eléctrica (CE) medido en el drenaje durante el ciclo de un cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero.

Tratamiento	pH	CE ( $\mu\text{Sm}^{-1}$ )
CH <sub>9</sub>	6,06 ± 0,36	3259 b ± 149
CH <sub>26</sub>	5,89 ± 0,38	2993 b ± 160
CH <sub>44</sub>	6,29 ± 0,34	2460 a ± 140

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

La  $\theta$  (Cuadro 11), fue estadísticamente diferente entre los tres tratamientos ( $p < 0,05$ ). El tratamiento CH<sub>44</sub> fue estadísticamente inferior a los tratamientos CH<sub>9</sub> y CH<sub>26</sub>, con valores similares entre estos últimos. La CE fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) en CH<sub>44</sub>, siendo CH<sub>9</sub> la que presentó la mayor CE (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Valores promedio de humedad volumétrica ( $\theta$ ) y conductividad eléctrica (CE) medidos del sustrato, durante el ciclo del cultivo de chile dulce hidropónico en invernadero.

Tratamiento	Humedad volumétrica (%)	CE ( $\mu\text{Sm}^{-1}$ )
CH <sub>9</sub>	73,00 c $\pm$ 0,04	822 c $\pm$ 1
CH <sub>26</sub>	71,28 b $\pm$ 0,04	528 b $\pm$ 1
CH <sub>44</sub>	58,65 a $\pm$ 0,04	395 a $\pm$ 1

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## **6. Discusión.**

### **Tomate**

#### **Efecto del RDC sobre las variables morfológicas en tomate.**

En el presente estudio, en el cultivo de tomate no hubo efecto de los tratamientos de agotamiento hídrico para las variables de AH, LH y NH. Por otra parte, al final del ciclo las variables DT, LT, AF y el número de nudos sí fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos.

Las plantas de tomate en el tratamiento TO<sub>44</sub> al estar expuestas a un mayor RDC (Cuadro 3), obtuvieron tallos más pequeños y delgados que TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub> (Figura 9, B), lo anterior fue coincidente con lo expuesto por Gallardo et al., (2006), respecto al fenómeno de contracción y expansión del tallo ante variaciones en la disponibilidad de agua en el sustrato.

Siguiendo lo anterior, los autores Meng et al., (2017), detallan que el RDC afecta el proceso de contracción y expansión del tallo, indicando que al disminuir la cantidad de agua disponible entre un 50% a 60% de la capacidad de contenedor, el DT no se expande a su tamaño original luego de un periodo de contracción, ya que, tiende a disminuir gradualmente a lo largo del ciclo de cultivo; esto contrasta con los tratamientos que se aplicaron.

Al final del ciclo, concordante con el comportamiento observado en DT, TO<sub>44</sub> presentó una menor LT (Figura 9, A). Al respecto, Ghannem et al., (2021), reportaron que al aplicar un RDC del 50% en el cultivo de tomate durante la etapa de crecimiento vegetativo, se presentó un menor crecimiento en comparación a un riego que cumpla el 100% de la demanda hídrica del cultivo. Los autores concluyen que en la etapa de crecimiento vegetativo el tomate es muy susceptible al RDC, sin embargo, si después de esta etapa se restablece el riego normal la planta tiene la capacidad de recuperarse.

Los autores Zheng et al., (2016), reportaron que el RDC durante la etapa de desarrollo vegetativo afectó la altura de las plantas de tomate, debido a su alta tasa de crecimiento durante dicho periodo. Además, concluyen que la aplicación de un RDC de 33% durante la etapa de floración, es el mejor momento para mejorar el rendimiento y la EUA.

La importancia de un parámetro morfológico como es el número de nudos, está relacionada con la cantidad de racimos totales. Esto a su vez está determinado por la LT de la planta, ya que un cultivo con crecimiento constante y una arquitectura compacta, tendrá mayor número de entrenudos y serán más cortos; generalmente, por cada nudo solo se manifiesta una hoja y por cada dos o tres nudos se genera un racimo (López, 2017).

Coincidente con el patrón observado en el DT y LT, el tratamiento TO<sub>44</sub> obtuvo la menor área foliar y consecuentemente menor biomasa. Esto se puede atribuir a que el estrés hídrico aceleró el proceso de senescencia (Husen, 2021), limitando la cantidad y el número de hojas.

La disminución del AF en TO<sub>44</sub> (Figura 8), también pudo deberse al efecto del enrollamiento de la hoja, el cual tiene como función aminorar la incidencia de la radiación solar sobre las hojas, ayudando a reducir la transpiración, con efectos adversos como la disminución de la actividad fotosintética y la captación de asimilados (Patanè, 2011). Esto pudo alterar las mediciones, ya que lo ideal es colocar una hoja completamente expandida en la máquina de medición de área foliar (LI-3100C).

### **Efecto del RDC sobre las variables fisiológicas en tomate.**

El tratamiento TO<sub>44</sub> presentó el menor peso seco (Figura 10); esto puede deberse a la disminución de la expansión celular, lo que llega a afectar el crecimiento de la planta de tomate (May et al., 2011; Sussmilch et al., 2017), o la aceleración de la senescencia foliar debido al estrés hídrico aplicado (Husen, 2021), disminuyendo la cantidad de hojas.

Otro factor es la reducción del DT, ya que el transporte de nutrientes disminuye conforme menor sea el diámetro, llegando a limitar el desarrollo de la planta (Gallardo et al., 2006), contrastando con los datos obtenidos, ya que TO<sub>44</sub> obtuvo el menor DT.

Estos resultados coinciden con Zhang et al., (2017), en el cual se probó cuatro distintos tratamientos basados en la ETc: 100%, 80%, 60% y 40%, en este caso, señalaron que no hubo diferencias entre el 80% y 60%, pero sí con el tratamiento más severo, lo que llevó a la disminución del rendimiento y la calidad de los frutos. Resultados similares los obtuvieron Patanè et al., (2011), que señalan que al aumentar la evapotranspiración del



cultivo de tomate, aumenta la producción de biomasa y se da el efecto contrario al disminuirla.

### **Efecto del RDC sobre las variables de riego de tomate.**

La mayor EUA se obtuvo en el tratamiento TO<sub>44</sub> (Cuadro 6), el cual utilizó la menor cantidad de agua por unidad de biomasa de frutos (Velasco-Muñoz et al., 2018), ahorrando hasta un 14% de agua en comparación a TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub>. Esta mejora en la EUA se logró debido a que las variables morfológicas, fisiológicas y de rendimiento fueron afectadas de manera negativa.

Si se necesita mejorar la EUA, se debe conocer el porcentaje de agotamiento óptimo del cultivo y así reducir la cantidad de agua aportada en el riego sin llegar a afectar el rendimiento (Linares et ál., 2020). Desde esta perspectiva; se puede recomendar los porcentajes de agotamiento de TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub>, con resultados similares entre sí, tanto para EUA como para los rendimientos obtenidos.

Otros estudios han llegado a utilizar un 49,8 kg m<sup>-3</sup> bajo una ET<sub>c</sub> del 75% (Lahoz et al., 2016), siendo la EUA de TO<sub>9</sub> y TO<sub>26</sub> un 57% menos eficiente en comparación. Otro estudio con valores similares de EUA utilizó una ET<sub>c</sub> del 80%, pero alcanzando un 31% menos en rendimiento (Zhang et al., 2017), o una EUA de 19,2 kg m<sup>-3</sup> y con un 35% menos del rendimiento obtenido en comparación (Patanè et al., 2011).

La ET<sub>c</sub> de TO<sub>44</sub> fue menor a TO<sub>26</sub> y TO<sub>9</sub> (Figura 17), esto puede deberse a las variables morfológicas que fueron afectadas negativamente, y es que al poseer menor AF, la evapotranspiración disminuyó, lo mismo sucede con el DT, que disminuye al ser menor el transporte de agua a través de la planta.

Respecto a la humedad volumétrica medida en el sustrato en tiempo real (Cuadro 8), todos los tratamientos mostraron diferencias estadísticas entre sí, demostrando así que se aplicaron correctamente los porcentajes de agotamiento respectivos al cultivo de tomate.

Estos datos se relacionan con la CE del sustrato (Cuadro 8), ya que TO<sub>9</sub> (tratamiento con mayor cantidad de riegos por día) obtuvo la mayor CE. Esto se debe a que se inyectaba solución nutritiva en cada riego, llevando a un incremento gradual de la

CE en el sustrato y a un desbalance de la solución nutritiva, ocasionada por los iones menos utilizados por la planta (Sánchez et al., 2014). Esto produce como resultado, un incremento en la CE debido a que los aportes son mayores que la demanda del cultivo, por lo que el exceso se acumula en partículas del sustrato.

El pH obtenido en el drenaje (Cuadro 7), comparado con el pH de la solución de entrada (Cuadro 2), fue básico, demostrando que la solución nutritiva en la paca era aprovechada por la planta, ya que, el pH de la solución nutritiva varía según la relación de absorción de aniones y cationes.

Cuando el pH de salida es básico, se deduce que las plantas absorbieron más aniones debido a que el intercambio de aniones a nivel radical produce liberación de compuestos  $\text{OH}^-$ . De ser un pH ácido, significaría un aumento en las sales nutritivas, lo que deriva en problemas de salinidad (Lara, 1999).

Otra explicación, es un exceso de absorción de cationes sobre aniones, provocando una liberación de iones  $\text{H}^+$  y la consecuente disminución del pH (Baixauli & Aguilar, 2002). Finalmente, el porcentaje de drenaje se mantuvo dentro del margen que establecido en el desarrollo de esta tesis (Cuadro 6).

En cuanto a la CE del drenaje, los tratamientos  $\text{TO}_9$  y  $\text{TO}_{26}$  (Cuadro 7), obtuvieron valores encima de  $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ; estos son los valores máximos en la tolerancia del cultivo de tomate (Meimandi et al., 2019). Se registraron datos de CE hasta  $3,8 \text{ dS m}^{-1}$ , lo que pudo ocasionar pérdidas de rendimiento de un 25 % (Jones, 1999).

Debido a lo anterior, el efecto entre los tratamientos  $\text{TO}_9$  y  $\text{TO}_{26}$  pudo verse influenciado por la CE, obteniendo resultados similares en cuanto su rendimiento. Esto lo confirma Medeiros et al., (2012), ya que generó una regresión lineal ( $R^2 = 0,98$ ) en la que se demostró como al aumentar la CE, el rendimiento del cultivo va disminuyendo.

Otro efecto que pudo tener el incremento de la CE sobre el cultivo, fue en la calidad del fruto, ya que se obtuvo un alto rendimiento en frutos de segunda calidad en los tres tratamientos (Cuadro 4). Esto puede deberse a dos factores: el RDC aplicado y la CE. En el caso de un cultivo expuesto a una alta CE, la entrada de agua a los frutos se reduce,

debido a la alta presión osmótica del agua de riego, dando como resultado frutos de menor tamaño (Li et al., 2001).

### **Efecto del RDC sobre el rendimiento en tomate.**

El menor rendimiento total lo obtuvo el TO<sub>44</sub> (Cuadro 4), lo cual evidencia que con agotamientos hídricos de 44%, en la etapa más sensible al estrés (llenado y maduración de fruto) (Cui et al., 2020), el rendimiento se redujo apreciablemente. El tratamiento TO<sub>44</sub> recibió un 40% menos de riego que el resto de tratamientos, ya que según plantea Patanè & Cosentino, (2010), la severidad del RDC es determinante en el rendimiento de los cultivos.

Otra explicación al rendimiento de TO<sub>44</sub>, se debe a los efectos del RDC sobre las variables morfológicas, como la baja cantidad de racimos que produjo (Figura 15); otra es el AF, ya que influye directamente en la captación de radiación solar incidente, necesaria para la producción de asimilados que se destinan a los órganos sumidero de la planta (frutos en este caso), lo que daría como consecuencia frutos de menor tamaño (Li et al., 2015).

Relacionado con lo anterior, se conoce que para producir 2 kg de fruto se necesitan 100 MJ de radiación solar incidente. Es por ello que la interceptación de radiación solar (limitada por el AF), determina el rendimiento, debido a que suplementa la energía necesaria para llevar a cabo la fotosíntesis y posteriores funciones (Heuvelink et al., 2005). Como se discutió anteriormente, el AF está vinculada con el DT, las cuales fueron inferiores en TO<sub>44</sub>, confirmando que estas variables morfológicas fueron determinantes en las diferencias obtenidas entre tratamientos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio, coinciden con la investigación realizada por Ortega et al., (2003), en la cual utilizó tres láminas de riego de un 60%, 100%, 140% de la ETc en tomate bajo invernadero. Los autores reportaron que, al incrementarse las dosis de riegos, los rendimientos tienden a aumentar; mientras que la calidad de los frutos (tamaño) disminuye cuando se reduce la dosis de riego. Sin embargo, esto incrementa el contenido de sólidos solubles, azúcar y la acidez total.

## **Chile dulce.**

### **Efecto del RDC sobre las variables morfológicas en chile dulce.**

En el presente estudio, los tratamientos de RDC únicamente afectaron LH, LT, AF, NH y número de bifurcaciones; esto probablemente se debió a que el cultivo presenta una respuesta negativa al estrés hídrico, lo que explicaría por qué la mayoría de variables fueron afectadas indistintamente del tratamiento.

En cuanto a LT de la planta, el tratamiento CH<sub>9</sub> presentó la mayor altura de planta, lo cual concuerda con estudios realizados por Mardani et al., (2017), los cuales aplicaron tres distintos niveles de estrés hídrico (20, 40 y 60% de la ETc). En este caso, la mayor LT se obtuvo en el tratamiento menos estresado (Figura 13, A), por lo que los autores señalan que el crecimiento vegetativo está estrechamente relacionado con la cantidad de riego aplicado, ya que el cultivo presenta una respuesta negativa al estrés hídrico.

Otro estudio realizado por Fernández et al., (2005), aplicando un RDC de 50% y 80%, se determinó que el crecimiento de la planta de chile dulce es muy susceptible cuando se da un estrés hídrico; conforme aumentaba el RDC disminuyó la LT. Además, reportaron que no hubo diferencias en la cantidad de frutos, pero sí en la calidad de estos; esto es coincidente con una mayor LT y calidad de frutos en el tratamiento CH<sub>9</sub>.

Abdelkhalik et al., (2020), mencionan que aplicar un RDC en la etapa de crecimiento vegetativo, trae efectos negativos sobre la morfología del cultivo. Sin embargo, señalan que si después de esta etapa se establece un riego que cumpla las necesidades hídricas, estos efectos serán reversibles y la planta recuperará su crecimiento normal. Por tanto, se puede considerar una estrategia de RDC exitosa aplicada durante esta etapa para disminuir las consecuencias negativas durante el ciclo de cultivo.

Por su parte, los autores Pérez et al., (2008), detallan que en un sustrato con un potencial hídrico negativo debido a una baja humedad volumétrica, la planta realizará el ajuste osmótico que le permite a la raíz disminuir su potencial hídrico en mayor medida que el sustrato, permitiéndole absorber el agua del medio. Esto es un mecanismo que le permite acumular solutos de forma activa ante un eventual estrés hídrico, llegando a disminuir su crecimiento.

En cuanto al AF, esta disminuyó en las plantas de chile dulce expuestas al mayor RDC (Figura 12), ya que, ante el estrés hídrico, hay pérdida de hojas producto de un aumento en la senescencia foliar (Husen, 2021). Otra explicación es la diferencia que hubo en cuanto al NH presentes en Ch<sub>9</sub>; resultados similares los obtuvieron Adeoye et al., (2014), en el cual se probaron distintos intervalos de riego, y se reportó que el AF disminuyó al aumentar el intervalo entre riegos.

Así mismo, Ismail et al., (2002) detallan que la primera respuesta que se obtiene a un estrés hídrico es la restricción del crecimiento foliar (tal como se observó en CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub>, con menores LH), lo cual evidenció en dos cultivares de *Capsicum annuum*, ya que el AF disminuye debido a una baja disponibilidad de agua durante un largo periodo de tiempo (Widuri et al., 2017).

Los autores González et al., (2007), señalan lo pronto que se manifiestan las consecuencias del estrés hídrico, llegando a afectar el AF; también detallan que la arquitectura del dosel cambia para disminuir la transpiración de las hojas por la incidencia solar, lo que a largo plazo disminuye la asimilación de carbono y el crecimiento del cultivo.

### **Efecto del RDC sobre las variables fisiológicas de chile dulce.**

Respecto al peso seco (Figura 14), el tratamiento Ch<sub>9</sub> exhibió la mayor LT y AF, lo cual se reflejó en una mayor producción de biomasa, ya que están relacionadas con el crecimiento (Quinta et al., 2012). Además, también juegan un papel importante en el dosel del cultivo (Abdelkhalik et al., 2020).

Blum, (2009) menciona que la cantidad de agua que se transpira por unidad de CO<sub>2</sub> fijada, está limitada por la cantidad de agua presente en el sustrato, la cual determina la biomasa en un cultivo bajo un estrés hídrico. Lo anterior lo confirman Delfine et al., (2001), indicando que la fijación de carbono controla el crecimiento vegetativo y la producción de biomasa, detallando que los parámetros de crecimiento son afectados antes que la fotosíntesis; es por esta razón que se asocia la transpiración con la acumulación de biomasa en la planta.

Mardani et al., (2017) relacionan la pérdida de biomasa con el aumento del déficit hídrico, debido a la disminución de la translocación de fotosintatos, lo que finalmente lleva a una pérdida en la producción de masa por unidad de agua. Esto junto con la respuesta negativa que tiene el cultivo al RDC, consecuentemente se disminuye la EUA.

Se observó que tanto el AF como la biomasa disminuyeron en los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub>, coincidente con un estudio llevado a cabo por Widuri et al., (2020), en el cual aplicó un déficit hídrico con la finalidad de observar la adaptabilidad de tres variedades de *C. annuum* a la sequía. Esto reafirma que la disminución de biomasa está estrechamente relacionada con el AF y que el estrés hídrico reduce la tasa relativa de crecimiento del cultivo; confirmando que estos parámetros tienen relación entre sí.

### **Efecto del RDC sobre las variables de riego en chile dulce.**

Respecto a la EUA, el tratamiento CH<sub>26</sub> dio los mejores resultados en relación al rendimiento obtenido por unidad de agua utilizada, con una mejora de un 4% en comparación a CH<sub>9</sub> y CH<sub>44</sub> (Cuadro 8). Sin embargo, no hubo diferencias con los resultados de CH<sub>44</sub> en las variables de morfología, fisiología y rendimiento. Se puede sugerir que la mejor alternativa para ahorrar agua de riego, es el CH<sub>26</sub>, sin embargo, se debe tomar en cuenta la diferencia significativa entre rendimientos que obtuvo en comparación con CH<sub>9</sub>.

La ETc más elevada la obtuvo CH<sub>9</sub> (Figura 18), debido a la mayor LH y AF, lo que le permitió transpirar más cantidad de agua en comparación a CH<sub>44</sub> y CH<sub>26</sub>, ya que al aumentar el AF, se incrementa a su vez el consumo de agua de la planta. Esto porque casi toda el agua transpirada por el cultivo, pasa a través de sus hojas (Patanè, 2011).

Con un aumento en la cantidad de riegos, el sustrato de fibra de coco es propenso a aumentar su CE, ya que una mayor humedad volumétrica implica un mayor número de riegos (Sánchez et al., 2014), siendo el tratamiento con menor RDC, el que mayor CE presentó.

Al comparar el pH de entrada en la solución (Cuadro 2), con el pH de salida en el drenaje (Cuadro 7), se puede afirmar que la solución nutritiva se encontraba dentro del rango óptimo para el cultivo, el cual va de 5,5 – 6,5 (Sánchez et al., 2014). Por otro lado,

el porcentaje de drenaje se mantuvo dentro del rango deseado en esta investigación (Cuadro 8).

Pérez-Vazquez et al., (2020) mencionan que el chile dulce tolera una CE de hasta  $3 \text{ dS m}^{-1}$  en el sustrato. Esto lo confirma con un estudio en el cual no hubo diferencias de rendimiento entre tratamientos que poseían de 2 a  $3 \text{ dS m}^{-1}$ . Contrastando con los datos, los tres tratamientos se encontraban por debajo de este valor.

### **Efecto del RDC sobre el rendimiento en chile dulce.**

El rendimiento del chile dulce en el tratamiento CH<sub>9</sub> fue estadísticamente superior a los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub> (Cuadro 5). Esto probablemente se debe a una mayor acumulación de biomasa en el tallo y hojas, ya que afecta directamente la producción de frutos, y que una menor AF disminuye la cantidad de asimilados que llegan a los órganos sumideros; consecuencia de que se disminuye la efectividad que tiene la planta para interceptar la radiación solar incidente (Barrientos et al., 2015).

En relación con lo anterior, CH<sub>9</sub> obtuvo mayores valores en LT, AF y número de bifurcaciones, y consecuentemente su rendimiento fue superior, debido a la obtención de frutos más grandes de primera y segunda categoría que los tratamientos CH<sub>26</sub> y CH<sub>44</sub> (Cuadro 5).

Los rendimientos obtenidos en CH<sub>9</sub> concuerdan con Sánchez et al., (2003), ya que al aplicar una mayor dosis de riego por planta ( $5,32 \text{ L planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en comparación a tratamientos con dosis menores ( $4,00 - 1,32 \text{ L planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ), el rendimiento aumentó. Este resultado se atribuye a un medio que mantiene una humedad volumétrica óptima y constante, ya que la planta debe realizar un menor esfuerzo en la raíz para absorber el agua, lo que permite al cultivo desarrollarse en condiciones adecuadas.

La reducción del rendimiento conforme aumenta el RDC, se debe a la disminución del tamaño y cantidad de frutos en la planta, ya que el chile dulce es una planta altamente susceptible al estrés hídrico. En el tratamiento CH<sub>9</sub> la humedad en el sustrato se mantuvo cercana a la CC, lo cual probablemente favoreció un mayor rendimiento (Fernández et al., 2005). También se debe mencionar que la mayor reducción del rendimiento se da cuando hay un continuo déficit hídrico antes de la primera cosecha (Mardani et al., 2017).

Respecto a la tolerancia que tiene el cultivo, los autores Alherbi et al., (2014), mencionan que el cultivo es más sensible al estrés hídrico durante la etapa de floración y cuaje de frutos, lo que llega a reducir el rendimiento al final del ciclo; por lo que se recomienda realizar un RDC en la etapa de desarrollo vegetativo, ya que puede soportar un RDC del 80% de la ETc.



## **7. Conclusiones.**

Las variables morfológicas y fisiológicas de tomate y chile dulce presentan diferentes tipos de respuestas según la severidad del RDC aplicado, siendo el chile dulce el cultivo que más se ve afectado al utilizar este método de ahorro de agua. El tomate por su parte, es más tolerante a un estrés hídrico, esto se demostró al observar que en los resultados no hubo diferencias entre los tratamientos de 9% y 26%.

Para las variables de riego, en tomate, el tratamiento TO<sub>44</sub> resultó ser la mejor opción en cuanto a EUA, no obstante, este tratamiento afectó de manera negativa la morfología y el rendimiento; mientras que en chile dulce resultó ser CH<sub>26</sub>.

El rendimiento en tomate se vio afectado al aplicar el porcentaje de agotamiento más severo; por su parte, en chile dulce, este presentó una respuesta negativa al estrés hídrico a partir del 26% de agotamiento hídrico.

Según los resultados obtenidos en esta investigación y bajo las condiciones climáticas y tipo de sustrato que se trabajó, para las variables de EUA y rendimiento comercial, se puede utilizar hasta un 26% de agotamiento hídrico en tomate y hasta un 9% en chile dulce.

## **Recomendaciones.**

Para estudios futuros, se recomienda evaluar la frecuencia de aplicación de riego, el aborto floral, porcentaje de cuaje de frutos y propiedades organolépticas de los frutos, variables íntimamente ligadas a la disponibilidad de agua para la planta.

Igualmente se podía estudiar los diferentes porcentajes de agotamiento según la etapa fenológica del cultivo, ya que se ha demostrado beneficioso para el cultivo y significaría un ahorro de agua.

## 8. Referencias bibliográficas.

- Abdelkhalik, A., Pascual, B., Nájera, I., Domene, M. A., Baixauli, C., & Pascual-Seva, N. (2020). Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. *Irrigation Science*, 38(1), 89–104. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>
- Alherbi, A. R., Saleh, A. M., Al-Omran, A. M., & Wahb-Allah, M. A. (2014). Response of bell-pepper (*Capsicum annuum* L.) to salt stress and deficit irrigation strategy under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*, 1034, 443–445. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1034.54>
- Adeoye, P., Adesiji, R., Oloruntade, A., & Njemanze, C. (2014). Effect of Irrigation Intervals on Growth and Yield of Bell Pepper (*Capsicum annuum*) in a Tropical Semi-arid Region. *American Journal of Experimental Agriculture*, 4(5), 515–524. <https://doi.org/10.9734/ajea/2014/7788>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. In *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (Vol. 298, Issue 0). FAO. <https://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Anasac Agropecuario. (2017). Tomate Gladiador. <https://www.anasac.cl/agropecuario/productos/tomate-gladiador/>
- Antúnez, A., & Felmer, S. (2017). Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. In A. Torres (Ed.), *Boletín INIA* (Issue 377, pp. 66–79). INIA. <https://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/12 Manual de Tomate Invernadero.pdf>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total.*
- BancoMundial. (2020). El agua en la agricultura. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>.

- Baixauli, C., & Aguilar, J. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. In *Valencia (España), Generalitat Valenciana*. Generalitat Valenciana, Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Balaguera, H., Álvarez, J., & Rodríguez, J. (2008). Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 246–255. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34753>
- Barrientos, H., del Castillo, C., & García, M. (2015). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigacion e Innovacion Agropecuario y de Recursos Naturales*, 2(1), 7–118. [http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v2n1/v2n1\\_a10.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v2n1/v2n1_a10.pdf)
- Betancourt, A. (2022). *Determinación de umbrales de humedad volumétrica para manejo del riego en los cultivos de tomate (Solanum lycopersicum L.) y chile dulce (Capsicum annum L.) en fibra de coco bajo invernadero*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica.], Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.
- Biswas, S. K., Akanda, A. R., Rahman, M. S., & Hossain, M. A. (2015). Effect of drip irrigation and mulching on yield, water-use efficiency and economics of tomato. *Plant, Soil and Environment*, 61(3), 97–102. <https://doi.org/10.17221/804/2014-PSE>
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2–3), 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Calvo, L. (2005). *Métodos de riego: un enfoque práctico para el diseño* (F. Bertsch (ed.); 1st ed.). Asociacion Costarricense De Ciencias Del Suelo.
- Capraro, F., ToseToi, S., Mut, V., Campillo, P., Olguín, A., & Pacheco, D. (2019). Implementación del sistema “telemetría agrícola” para el manejo y análisis de estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de tomate. *Congreso Argentino de Infoagromática* 116–127. <https://http://www.inaut.unsj.edu.ar>

- 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. *Annals of Botany*, 103(4), 551–560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>.
- Chen, J., Kang, S., Du, T., Qiu, R., Guo, P. & Chen, R. (2013). Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 129, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.011>.
- Cisneros, E., García, R., Martínez, R., López, T. & González, F. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el café en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23–30.
- Comisión económica para América Latina y el Caribe. (2021). CEPALSTAT, base de datos y publicaciones estadísticas. Extracción Sectorial de Agua. <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=3&lang=es>
- Cosgrove, D. J. (2014). Plant cell growth and elongation. *ELS*, 1–12. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0001688.pub2>
- Cui, J., Shao, G., Lu, J., Keabetswe, L., & Hoogenboom, G. (2020). Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages. *Scientia Agricola*, 77(2). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0390>
- Decagon Device Inc. (2002). Operator's manual decagon devices, inc. [https://publications.decagon.com/Manuals/14640\\_GS1\\_Web.pdf](https://publications.decagon.com/Manuals/14640_GS1_Web.pdf)
- Delfine, S., Loreto, F., & Alvino, A. (2001). Drought-stress effects on physiology, growth and biomass production of rainfed and irrigated bell pepper plants in the Mediterranean region. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(3), 297–304. <https://doi.org/10.21273/jashs.126.3.297>

- Dorji, K., Behboudian, M. H. & Zegbe-Domínguez, J. A. (2005). Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Scientia Horticulturae*, 104(2), 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.015>.
- Duarte, J. (2019). *Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica.], Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/85371>.
- ETcandi, C. (2012). Híbridos promisorios de chile dulce para la zona media-alta de Costa Rica. *Boletín Técnico Quincenal de La Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Universidad de Costa Rica. Alajuela*, 7p.
- Elizondo, E., & Monge, J. (2017). Evaluación de calidad y rendimiento de 12 genotipos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 30(2), 36-47. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i2.3194>.
- Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., & Basra S.M.A. (2009) Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. In E: Lichtfouse, M., Navarrete, P., Debaeke, S, Véronique, Alberola C. (Eds) *Sustainable Agriculture 185-212*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12).
- Fernández, M. D., Gallardo, M., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R. B., & Fereres, E. (2005). Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(1), 87–96. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511897>
- Flores, J., Ojeda, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Water requirements for greenhouse tomato. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127–134.
- Florido, M. & Bao, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70–88.
- Foolad, M. R. (2006). Tolerance to a biotic stresses. En *Genetic Improvement of*

- Solanaceous Crops Volume 2: Tomato* (1st ed., Issue Blum 1988, pp. 521–590). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10744-17>.
- Gallardo, M., Thompson, R. B., Valdez, L., & Fernández, M. . (2006). Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato. *Irrigation Science*, *24*, 241–255. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0025-5>
- Ghannem, A., Ben Aissa, I., & Majdoub, R. (2021). Effects of regulated deficit irrigation (RDI) applied at different growth stages of greenhouse tomato on yield and fruit quality. *Environmental Science and Engineering*, 1153–1157. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1\\_182](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_182)
- González, V., Orgaz, F., & Fereres, E. (2007). Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. *Scientia Horticulturae*, *114*(2), 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.05.014>
- Heuvelink, E., Bakker, M. J., Elings, A., Kaarsemaker, R., & Marcelis, L. F. M. (2005). Effect of leaf area on tomato yield. *Acta Horticulturae*, *691*, 43–50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.2>
- Husen, A. (2021). Drought stress. In A. Husen (Ed.), *Plant performance under environmental stress* (p. 81). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-78521-5>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2014). Actividad agrícola| instituto nacional de estadística y censos. [https://www.inec.cr/agropecuario/actividad-agricola?keys=chile&shs\\_term\\_node\\_tid\\_depth=All&field\\_periodo\\_tid=All&field\\_anio\\_documento\\_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=](https://www.inec.cr/agropecuario/actividad-agricola?keys=chile&shs_term_node_tid_depth=All&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=).
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Anuario estadístico 2016-2018*. <https://www.inec.cr/sites/default/files/documetos-biblioteca-virtual/reanuario2016-2018.pdf>
- Ismail, S. (2010). Influence of deficit irrigation on water use efficiency and bird pepper production (*Capsicum annum* L.). *Journal of King Abdulaziz University- Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Sciences*, *21*(2), 29–43.

<https://doi.org/10.4197/met.21-2.3>

- Ismail, M. R., Davies, W. J., & Awad, M. H. (2002). Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants. *Scientia Horticulturae*, 96(1–4), 313–327. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00117-6)
- Ismail, S. M., & Mousa, M. A. A. (2014). Optimizing tomato productivity and water use efficiency using water regimes, plant density and row spacing under arid land conditions. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 640–650. <https://doi.org/10.1002/ird.1868>
- Jones, J. (1999). Tomato Plant Culture. In *The Field, Greenhouse, And Home Garden*. CRC Press. <https://doi.org/10.21273/horToETc.9.2.299a>.
- Jovicich, E., Cantliffe, D. J., Stoffella, P. J., & Haman, D. Z. (2007). Bell pepper fruit yield and quality as influenced by solar radiation-based irrigation and container media in a passively ventilated greenhouse. *HortScience*, 42(3), 642–652. <https://doi.org/10.21273/hortsci.42.3.642>
- Lahoz, I., Pérez-de-Castro, A., Valcárcel, M., Macua, J. I., Beltrán, J., Roselló, S., & Cebolla-Cornejo, J. (2016). Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae*, 200, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.051>
- Lara, A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponia. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 221–229. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57317306%0ACómo>
- León, Á., Arzube, M., Orrala, N., & Drouet, A. (2019). Efecto del riego deficitario controlado en el cultivo de pimiento ( *Capsicum annuum* L .) utilizando la tina de evaporación clase A, en Río Verde, Santa Elena, Ecuador. *Journal of Science and Research*, 5(1), 114–124.
- Li, T., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2015). Quantifying the source-sink balance and carbohydrate content in three tomato cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 6(June), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00416>

- Li, Y. L., Stanghellini, C., & Challa, H. (2001). Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Scientia Horticulturae*, 88(1), 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00190-4)
- Linares, D., Ramírez, M., Ferrer, G & Colmenares, C. (2020). Efecto del riego deficitario controlado sobre el rendimiento del cilantro y su asociación con el cebollín. *Bioagro*, 32 (1), 23-30.
- Lipinski, V. M., & Gaviola, S. (2011). Optimizing water use efficiency on violet and white garlic types through regulated deficit irrigation. In *Acta Horticulturae*, 889 (5567) 459–468). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.889.58>
- Lodhi, A. S., Kaushal, A., & Singh, K. G. (2015). Water use efficiency for sweet peppers. En *Best Management Practices for Drip Irrigated Crops* (1st ed., Vol. 6, pp. 251–260). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18709>
- López, L. M. (2017). Manual técnico del cultivo de tomate. En *Inta* (1st ed.).
- López-Elías, J., Garza O., S., Jiménez L., J., Huez L., M. A., & Garrido L., O. D. (2016). Uso de un polímero hidrófilo a base de poliacrilamida para mejorar la eficiencia en el uso del agua. *European Scientific Journal*, 12(15), 160–175. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n15p160>
- Lu, J., Shao, G., Cui, J., Wang, X. & Keabetswe, L. (2019). Yield, fruit quality and water use efficiency of tomato for processing under regulated deficit irrigation: a meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 222(June), 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.008>
- Mardani, S., Tabatabaei, S. H., Pessarakli, M., & Zareabyaneh, H. (2017). Physiological responses of pepper plant (*Capsicum annuum* L.) to drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 40(10), 1453–1464. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1269342>
- Martínez, J. M., Galantini, J. A., Landriscini, M. R., López, F. M., & Duval, M. E. (2016). Fertilización nitrogenada en trigo de la región subhúmeda: Eficiencia del uso del agua y nitrógeno. *Ciencia Del Suelo*, 34(1), 81–92.



- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Alex, C., & García, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum Chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *14*(3), 1039–1045.
- Medeiros, P. R. F., Duarte, S. N., Uyeda, C. A., Silva, Ê. F. F., & de Medeiros, J. F. (2012). Tolerance of tomato crop to salinity of soil in protected ambient. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *16*(1), 51–55. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100007>.
- Medyouni, I., Zouaoui, R., Rubio, E., Serino, S., Ahmed, Ben., & Bertin, N. (2021). Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. *Food Science and Nutrition*, *9*(4), 1949–1960. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2160>
- Mendonça, T. G., Silva, M. B., Pires, R., & Souza, C. F. (2020). Deficit irrigation of subsurface drip irrigated grape tomato. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, *40*(4), 453–461.
- Meng, Z., Duan, A., Chen, D., Dassanayake, K. B., Wang, X., Liu, Z., Liu, H., & Gao, S. (2017). Suitable indicators using stem diameter variation-derived indices to monitor the water status of greenhouse tomato plants. *PLoS ONE*, *12*(2), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171423>
- Meimandi, M., Kappel, N., & Pessarakli, M. (2019). Effects of salinity stress on tomato plants and the possibility of its mitigation. In *Handbook of Plant and Crop Stress* (4th ed., p. 6). CRC Press. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/10.1201/9781351104609>
- Monge, J. (2020). *Evaluación de la morfofisiología de chile dulce (Capsicum annum L.) variedad Dulcítico en cultivo hidropónico bajo condiciones de invernadero*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica.], Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/10669/84960>.
- Mora, J., Echandi, L. C., Fernando, L., & Bonilla, K. (2018). Manual técnico basado en experiencias con el híbrido “Dulcítico” (*Capsicum annum*) (K. Lines (ed.); 1st ed.).

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.  
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-11058.pdf>

Obreza, T. A., PiTos, D. J., McGovern, R. J. & Spreen, T. H. (1996). Deficit irrigation of micro-irrigated tomato affects yield, fruit quality, and disease severity. *Journal of Production Agriculture*, 9(2), 270–275. <https://doi.org/10.2134/jpa1996.0270>.

Ordaz, J. L., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A., & Serna, B. (2010). Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/25921/1/lcmex1972.pdf>

Orellana, F. E., Escobar, J. C., Morales, A. J., Méndez, I. S., Cruz, Ra. A., & Castellón, M. E. (2000). El cultivo del chile dulce. In *Centro Nacional De Tecnología Agropecuaria Y Forestal*. CENTA.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2005). *Glosario de términos sobre humedad del suelo*. <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019a). 2050: un tercio más de bocas que alimentar. <http://www.fao.org/news/story/es/item/35675/icode/#:~:text=Según los últimos cálculos de,en los países en desarrollo>.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura. (2019b, Marzo 22). *Escasez de agua: uno de los mayores retos de nuestro tiempo*. <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/>.

Ormaza, R. V., & Rosado, R. I. (2018). *Efecto del riego deficitario en la etapa inicial del cultivo de pimiento (Capsicum annum L.)*. [Tesis de grado, Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.], Repositorio Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí. <https://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/2314>.

- Orozco, Ó. & Llano, G. (2016). Sistemas de Información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28), 103–124. <https://doi.org/10.22395/rium.v15n28a6>.
- Ortega, S., Leyton, B., Valdés, H., & Paillán, H. (2003). Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates de invernadero producido en primavera-verano. *Agricultura Técnica*, 63(4). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072003000400008>
- Page, G., RidouTo, B., & BelloToi, B. (2012). Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. *Journal of Cleaner Production*, 32, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.036>
- Patanè, C. (2011). Leaf Area Index, Leaf Transpiration and Stomatal Conductance as Affected by Soil Water Deficit and VPD in Processing Tomato in Semi Arid Mediterranean Climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(3), 165–176. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00454.x>
- Patanè, C., & Cosentino, S. L. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 97(1), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.021>
- Patanè, C., Tringali, S., & Sortino, O. (2011). Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>.
- Pérez-Alfocea, F., Albacete, A., Ghanem, M. E. & Dodd, I. C. (2010). Hormonal regulation of sourcesink relations to maintain crop productivity under salinity: a case study of root-to-shoot signalling in tomato. *Functional Plant Biology*, 37(7), 592–603. <https://doi.org/10.1071/FP10012>.
- Pérez, G. A., Pineda, D. A., Latournerie, M. L., Pam, P. W., & Godoy, A. C. (2008). Niveles de evapotranspiración potencial en la producción de chile habanero. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 53–59. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187->

- Pérez-Vazquez, E. L., Gaucín-Delgado, J. M., Ramírez-Rodríguez, S. C., Sariñana-Aldaco, M. de los Á., Zapata Sifuentes, G., & Zuñiga-Valenzuela, E. (2020). Conductividad eléctrica de la solución nutritiva efecto en el rendimiento y la calidad nutracéutica de pimiento morrón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *11*(7), 1669–1675. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2409>
- Pinheiro, C., & Chaves, M. M. (2011). Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? *Journal of Experimental Botany*, *62*(3), 869–882. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>.
- Puerta, C. E., Russián, T., Ruiz, C. A., Intercomunal, R. B., Vela, C.-L., Hatillo, E., & Falcón, E. (2012). Seedling production of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) in organic substrates based in coconut fiber mixtures. *Revista Científica UDO Agrícola*, *12*(2), 298–306.
- Quesada, G. (2015). Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía Costarricense*, *39*(1), 25–36. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19542>.
- Quinta, W., Pérez, A., Latournerie, L., May, C., Ruiz, E., & Martínez, A. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento de chile habanero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *35*(2), 155–160.
- Rodríguez, R., Rázuri, L., Swarowsky, A. & Rosales, J. (2014). Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Interciencia*, *39*(Agosto), 591–596.
- Salazar, R., Rojano, A. & Lorenzo, I. (2014). Water tETcnology and sciences. *Water TETcnology and Sciences*, *V*(2), 177–183.
- Sánchez, C., Jaraba, D., Medina, J., Martínez, J., & Martínez, A. (2003). Requerimientos hídricos del ají dulce (*Capsicum annuum* L.) bajo riego por goteo en el valle del sinu medio. *Temas Agrarios*, *8*(1), 11–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.21897/rta.v8i1.611>

- Sánchez, F., González, L., Moreno, E. del C., Pineda, J., & Reyes, C. E. (2014). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 261–269. <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.3.261>
- Sánchez, L., & Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. In Economic Commission for Latin America and the Caribbean. [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39781/S1501265\\_es.pdf?sequence=1](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39781/S1501265_es.pdf?sequence=1)
- Silva, C. J., Frizzone, J. A., Silva, L. F. M., Santos, Y. A. de O., Golynski, A., & Pontes, N. de C. (2021). Flower abortion and yield of processing tomato according to irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(6), 415–421. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p415-421>
- Soto-Bravo, F., Araya, E. A., & ETCandi, C. (2020). Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘Dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 43–64. [www.mag.go.cr/revagr/index.html](http://www.mag.go.cr/revagr/index.html)
- Soto, F. (2013). *Evaluación de la productividad y la dinámica del agua y el nitrógeno en cultivos hortícolas bajo invernadero, con el modelo EU-Rotate\_N*. [tesis doctoral, Universidad de Almería.] Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica. <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=Th9bUu2yFZA%3D>
- Soto, F. (2018). Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 42(2), 59–73. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33779>.
- Soto, F. (2019). Coeficientes de cultivo según densidad de siembra y volumen de sustrato en chile dulce bajo invernadero. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 12(1), 7–21. <https://doi.org/10.5935/paet.v12.n1.01>

- Soto, F. (2019). *Fertirrigación y eficiencia de uso del agua en agricultura*.  
<https://hdl.handle.net/10669/86300>
- Stanghellini, C. (2010). El agua de riego su uso eficiencia y economía. En *Mejoría de la eficiencia del agua en cultivos protegidos* (1st ed., pp. 25–33). Junta de Andalucía.
- Sussmilch, F. C., Brodribb, T. J., & McAdam, S. A. M. (2017). Up-regulation of NCED3 and ABA biosynthesis occur within minutes of a decrease in leaf turgor but AHK1 is not required. *Journal of Experimental Botany*, 68(11), 2913–2918.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erx124>
- Tornés, N., Gómez, Y., Myor, E., & Brown, O. (2020). Determining of Hydric and Energetic Efficiency of Localized Irrigation under Greenhouse Conditions. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(1), 46–55. <http://opn.to/a/DyC9g>
- Ullah, I., Mao, H., Rasool, G., Gao, H., Javed, Q., Sarwar, A., & Khan, M. I. (2021). Effect of deficit irrigation and reduced n fertilization on plant growth, root morphology and water use efficiency of tomato grown in soilless culture. *Agronomy*, 11(228).  
<https://doi.org/10.3390/agronomy11020228>.
- United Nations World Water Assessment Programme. (2016). *The united nations world water development report 2016: Water and jobs*. UNESCO.
- Valverde, J. (2011). Uso de fibra de coco en agricultura protegida. *Boletín Del Progama Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos*, 6(31), 1–11.  
[www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP6\(31\).pd](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP6(31).pd)
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & López-Serrano, M. J. (2018). Advances in water use efficiency in agriculture: A bibliometric analysis. *Water (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040377>
- Viets, F. G. (1962). Fertilizers And The Efficient Use Of Water. *Advances in Agronomy*, 14(C), 223–264. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60439-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60439-3)
- Widuri, L. I., Lakitan, B., Hasmeda, M., Sodikin, E., Wijaya, A., Meihana, M., Kartika, K., & Siaga, E. (2017). Relative leaf expansion rate and other leaf-related indicators for detection of drought stress in chili pepper (*Capsicum annum* L.). *Australian*

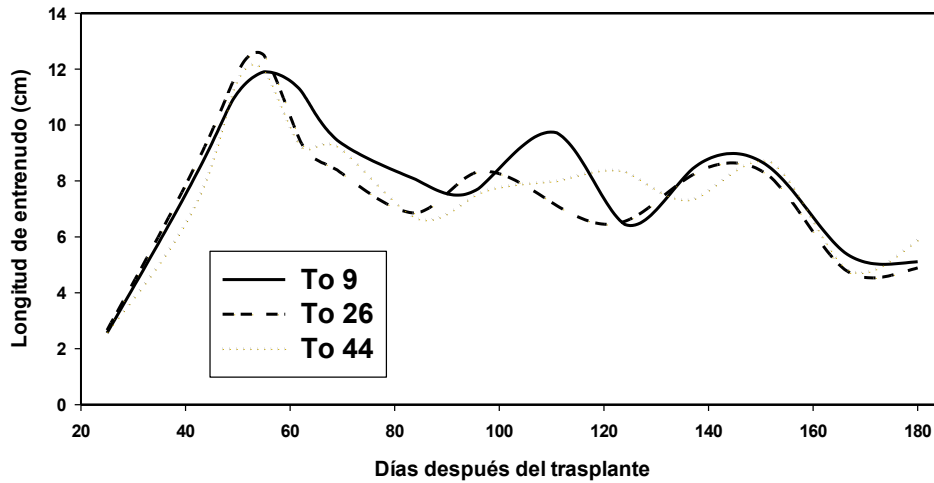
*Journal of Crop Science*, 11(12), 1617–1625.  
<https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.12.pne800>

WiChombe, J. R., Hollington, P. A., Howarth, C. J., Reader, S. & Steele, K. A. (2008). Breeding for abiotic stresses for sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 703–716.  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2179>.

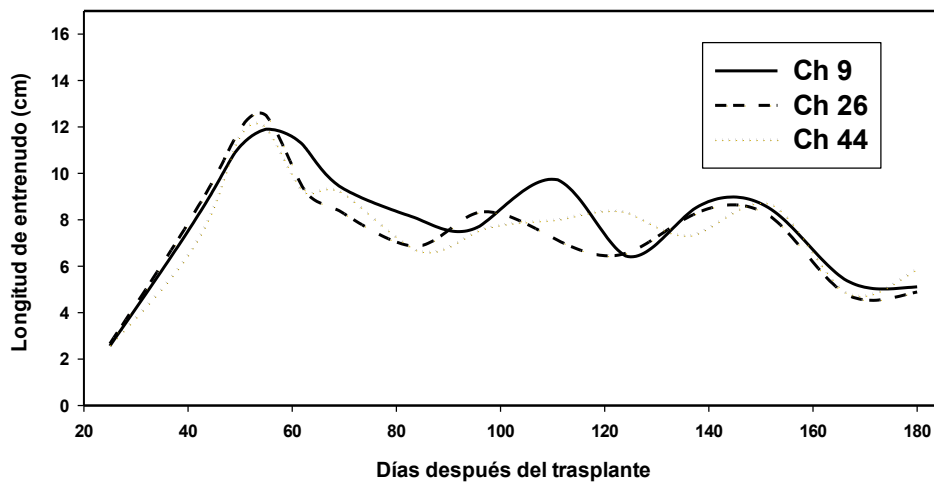
Zheng, F., Yang, P., Ren, S., Jiang, G., & He, X. (2016). Effect of regulated deficit irrigation on the plant growth, yield and quality of processing tomato under border irrigation in Hetao Irrigation District. *J China Agric Univ*, 21, 83–90.  
<https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2015.12.005>

Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X., & Huang, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.022>

## 9. Anexos.



**Anexo 1.** Evolución de valores promedio quincenales de la longitud de entrenudo, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (TO<sub>9</sub>), 26% (TO<sub>26</sub>) y 44% (TO<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).



**Anexo 2.** Evolución de valores promedio quincenales de la longitud de entrenudo, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (CH<sub>9</sub>), 26% (CH<sub>26</sub>) y 44% (CH<sub>44</sub>) de la humedad volumétrica en el sustrato (n = 9/muestreo).



Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Nº hojas	9	0,76	0,51	2,50

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,0375

Error: 0,8856 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	38,86	3	0,54 A
Bajo	37,69	3	0,54 A
Alto	36,28	3	0,54 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 3.** Análisis de varianza del número de hojas (NH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Long hoja	9	0,82	0,64	2,56

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,8331

Error: 0,7169 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	33,87	3	0,49 A
Medio	33,49	3	0,49 A
Alto	31,98	3	0,49 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 4.** Análisis de varianza de la longitud de hoja (LH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Ancho hoja	9	0,63	0,27	4,95

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,3178

Error: 1,1461 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	22,25	3	0,62 A
Medio	22,01	3	0,62 A
Alto	20,58	3	0,62 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 5.** Análisis de varianza del ancho de hoja (AH), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento

hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Long tallo	9	0,74	0,48	5,02

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=35,7898  
 Error: 273,2602 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	343,48	3	9,54 A
Bajo	339,48	3	9,54 A
Alto	305,80	3	9,54 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 6.** Análisis de varianza de la longitud de tallo (LT), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Nº nudos	9	0,73	0,47	2,78

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,8596  
 Error: 1,7445 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	49,21	3	0,76 A
Bajo	47,64	3	0,76 A
Alto	45,75	3	0,76 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 7.** Análisis de varianza del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Diámetro tallo	9	0,78	0,56	5,19

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,1545  
 Error: 0,2843 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	10,78	3	0,31 A
Bajo	10,64	3	0,31 A
Alto	9,40	3	0,31 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 8.** Análisis de varianza del diámetro de tallo (DT), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Área Foliar	9	0,80	0,61	9,77

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2984,6052  
 Error: 1900345,1797 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	16039,96	3	795,89 A
Bajo	14563,42	3	795,89 A
Alto	11714,45	3	795,89 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 9.** Análisis de varianza del área foliar (AF), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
lra	9	0,74	0,49	21,93
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=473,4812</b>				
Error: 47826,0195 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Bajo	1134,76	3	126,26	A
Medio	1070,79	3	126,26	A
Alto	786,78	3	126,26	A

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
2da	9	0,75	0,49	19,64
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=3657,3612</b>				
Error: 2853608,7395 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Medio	9903,91	3	975,30	A
Bajo	9815,54	3	975,30	A
Alto	6084,94	3	975,30	B

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
3ra	9	0,52	0,04	16,03
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=831,7761</b>				
Error: 147594,9971 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Medio	2437,24	3	221,81	A
Alto	2414,14	3	221,81	A
Bajo	2337,16	3	221,81	A

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
desecho	9	0,90	0,79	11,08
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=123,8473</b>				
Error: 3272,1401 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Medio	583,47	3	33,03	A
Alto	518,33	3	33,03	A
Bajo	446,84	3	33,03	A

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Comercial	9	0,80	0,61	12,76
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=3314,7787</b>				
Error: 2344054,9808 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Medio	13411,94	3	883,94	A
Bajo	13287,46	3	883,94	A
Alto	9285,85	3	883,94	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 10.** Análisis de varianza de la calidad de fruta según categoría, durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Etc	9	0,72	0,43	16,40
<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=7,8410</b>				
Error: 13,1161 gl: 4				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Medio	25,67	3	2,09	A
Bajo	23,77	3	2,09	A
Alto	16,80	3	2,09	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 11.** Análisis de varianza de la evapotranspiración del cultivo (ETc), durante el ciclo de cultivo en tomate hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes

de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Nº hojas	9	0,86	0,72	6,18

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=55,2341  
 Error: 650,8388 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	470,81	3	14,73 A
Medio	393,85	3	14,73 B
Alto	373,04	3	14,73 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 12.** Análisis de varianza del número de hojas (NH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Long hoja	9	0,99	0,98	0,84

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,3006  
 Error: 0,0193 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	17,06	3	0,08 A
Medio	16,30	3	0,08 B
Alto	16,11	3	0,08 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 13.** Análisis de varianza de la longitud de hoja (LH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Ancho hoja	9	0,88	0,77	2,20

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,3179  
 Error: 0,0216 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	6,83	3	0,08 A
Medio	6,63	3	0,08 A
Alto	6,59	3	0,08 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 14.** Análisis de varianza del ancho de hoja (AH), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Long tallo	9	0,89	0,78	4,32

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=12,8157

Error: 35,0385 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Bajo	148,63	3	3,42	A
Medio	131,57	3	3,42	B
Alto	130,64	3	3,42	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 15.** Análisis de varianza de la longitud de tallo (LT), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
N° nudos	9	0,91	0,83	3,03

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,9340

Error: 0,1861 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Bajo	15,17	3	0,25	A
Medio	13,95	3	0,25	B
Alto	13,53	3	0,25	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 16.** Análisis de varianza del número de nudos, durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Diámetro tallo	9	0,93	0,87	2,23

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,6726

Error: 0,0965 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Bajo	14,35	3	0,18	A
Alto	13,75	3	0,18	A
Medio	13,74	3	0,18	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 17.** Análisis de varianza del diámetro de tallo (DT), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Área Foliar	9	0,81	0,63	10,07

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2573,4287

Error: 1412807,5624 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	13763,01	3	686,25 A
Alto	10850,48	3	686,25 B
Medio	10801,86	3	686,25 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 18.** Análisis de varianza del área foliar (AF), durante el ciclo de cultivo en chile dulce bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
lra	9	0,93	0,86	16,52

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=653,4881

Error: 91103,3025 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	2630,06	3	174,26 A
Medio	1471,96	3	174,26 B
Alto	1379,88	3	174,26 B

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
2da	9	0,85	0,70	13,09

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=884,2400

Error: 166801,1463 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	3737,67	3	235,80 A
Medio	2847,27	3	235,80 B
Alto	2774,08	3	235,80 B

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
3ra	9	0,52	0,04	17,30

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=807,3618

Error: 139057,7214 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	2325,58	3	215,30 A
Alto	2209,29	3	215,30 A
Bajo	1931,38	3	215,30 A

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
desecho	9	0,42	0,00	19,92

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=225,6131

Error: 10858,9392 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Medio	573,38	3	60,16 A
Bajo	513,25	3	60,16 A
Alto	482,58	3	60,16 A

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Comercial	9	0,93	0,87	6,41

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=985,4332

Error: 207163,4151 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.
Bajo	8299,10	3	262,78 A
Medio	6644,81	3	262,78 B
Alto	6363,25	3	262,78 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

**Anexo 19.** Análisis de varianza de la calidad de fruta según categoría, durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Etc	9	0,83	0,65	6,54

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,5403

Error: 1,3767 gl: 4

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Bajo	20,20	3	0,68	A
Medio	17,23	3	0,68	B
Alto	16,37	3	0,68	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 20.** Análisis de varianza de la evapotranspiración del cultivo (ETc), durante el ciclo de cultivo en chile dulce hidropónico bajo invernadero, sometido a tres distintos porcentajes de agotamiento hídrico de 9% (Bajo), 26% (Medio) y 44% (Alto) de la humedad volumétrica en el sustrato.