

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE SUBIRRIGACIÓN PARA CULTIVOS  
HORTÍCOLAS PARA OPTIMIZAR EL USO DE AGUA Y FERTILIZANTES

**Tesis**

Que presenta ARIEL MÉNDEZ CIFUENTES  
como requisito parcial para obtener el Grado de

DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA.

Saltillo, Coahuila

Octubre 2020

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE SUBIRRIGACIÓN PARA CULTIVOS  
HORTÍCOLAS PARA OPTIMIZAR EL USO DE AGUA Y FERTILIZANTES

Tesis

Elaborada por ARIEL MÉNDEZ CIFUENTES como requisito parcial para obtener el  
Grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Protegida con la supervisión y aprobación  
del Comité de Asesoría



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar  
Asesor Principal



Dr. Martín Cadena Zapata  
Asesor



Dr. José Antonio González Fuentes  
Asesor



Dr. Armando Hernández Pérez  
Asesor



Dr. José Alfredo Hernández Maruri  
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente  
Subdirector de Postgrado UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS, por haberme dado la vida, esa fuerza superior quien me regala cada día, por proveerme de todo lo necesario para salir adelante, por todo lo que me ha dado y por sobre todo quien me regala el entendimiento para realizar cada reto de mi vida.

A la UAAAN por haberme abierto sus puertas y dado la oportunidad de superarme para poder terminar una carrera profesional y seguir preparándome profesionalmente, así como brindarme todas las herramientas necesarias para enfrentarme a la vida. Gracias Alma Máter.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) agradezco por la beca otorgada durante los años de estudio del doctorado.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, por su gran y valioso apoyo que me ha brindado, por su enseñanza, por el tiempo dedicado en el desarrollo de este proyecto, por su excelente dirección y asesoría técnica en este trabajo de tesis.

Al Dr. Martín Cadena Zapata, por su valiosa enseñanza, por la confianza de trabajar con él, por compartir sus conocimientos y por la buena disposición de llevarme por este camino.

A los distinguidos doctores del Programa de Agricultura Protegida, en especial al Dr. José Antonio González Fuentes, Dr. Armando Hernández Pérez y Dr. José Alfredo Hernández Maruri por su apoyo durante el desarrollo de la investigación, agradezco mucho su valioso apoyo y tiempo.

## DEDICATORIA

Este trabajo fue producto del esfuerzo y sacrificios de muchas personas por tal motivo es para ustedes.

A mis padres:

Sr. Jesús Romeo Méndez Rivera

Sra. Lucila A. Cifuentes Pérez

A mi Madre que es el ser más maravilloso de todo el mundo. Gracias por tu apoyo incondicional, tus consejos, tu cariño y comprensión que desde niño me has brindado, por guiar mi camino y estar junto a mí en los momentos más difíciles, quien siempre está pendiente de encomendarme en sus oraciones y de pedir por mí, para que cada día sea mejor, no solo en lo que hago, sino de ser mejor como persona.

A mi Padre porque desde pequeño ha sido para mí un gran hombre maravilloso al que siempre he admirado, porque nos enseñó que la vida no es fácil y desde entonces a su modo nos guió por este camino. Muchas gracias, este sueño también es de ustedes.

A mis hermanos:

Limber, Reynaldo, Aracely, Antonio Bladimir, Verónica Marvith, Rusbi

Gudiel y Darwin Josman

A todos ustedes gracias por brindarme todo su cariño y apoyo en todo momento, y que este logro también es de ustedes, me siento muy orgulloso de tenerlos como hermanos, gracias por creer en mí.

# CARTA DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS



an Open Access Journal by MDPI



## CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:

Water and Fertilizer Use Efficiency in Subirrigated Containerized Tomato

Authored by:

Ariel Méndez-Cifuentes; Luis Alonso Valdez-Aguilar; Martín Cadena-Zapata; José Antonio González-Fuentes; José Alfredo Hernández-Maruri; Daniela Alvarado-Camarillo

Published in:

*Water*2020, Volume 12, Issue 5, 1313



Basel, September 2020

Cuernavaca, Mor., 25 de septiembre del 2020.

A quien corresponda:

El que suscribe, Dr. Víctor López Martínez, editor en jefe de **Acta Agrícola y Pecuaria**, HACE CONSTAR que la plataforma Open Journal System de Acta Agrícola y Pecuaria ha registrado el manuscrito **"Relación entre la concentración de la solución nutritiva y la conductividad eléctrica del sustrato en tomate subirrigado"**, con los autores **Ariel Méndez-Cifuentes, Luis A. Valdez-Aguilar, Martín Cadena-Zapata, José A. González-Fuentes, José A. Hernández-Maruri, y Daniela Alvarado-Camarillo**; para el proceso de revisión editorial por el esquema doble par ciego para su posible publicación como **Artículo Científico** por **Acta Agrícola y Pecuaria** en la modalidad de **Artículo Científico**.

Acta Agrícola y Pecuaria es una revista científica incluida en el **Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, catálogo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (**LATINDEX**), así como en los directorios **Directory of Open Access Journal (DOAJ)**, Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (**REDIB**), Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (**LATINDEX**), Actualidad Iberoamericana, **Dialnet**, y en las bases de datos **PKP Index**, International Institute of Organized Research (**I2OR**) e Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (**Periódica**).

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende la presente constancia en Cuernavaca, Morelos, México.

ATENTAMENTE

*Por una humanidad culta  
Una universidad de excelencia*



Dr. Víctor López Martínez  
Editor en Jefe  
Acta Agrícola y Pecuaria

## INDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>CARTA DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS</b> .....	v
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	vii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Objetivo general:</b> .....	2
<b>Hipótesis:</b> .....	2
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
<b>Hidroponía</b> .....	3
<b>Subirrigación</b> .....	4
<b>Ventajas y desventajas del sistema de subirrigación</b> .....	4
<b>Lámina y tiempo de riego en subirrigación</b> .....	6
<b>Control adecuado de la frecuencia de riego</b> .....	7
<b>Importancia del tomate</b> .....	7
<b>ARTÍCULO 1</b> .....	9
<b>Water and Fertilizer Use Efficiency in Subirrigated Containerized Tomato</b> .....	9
<b>ARTÍCULO 2</b> .....	19
<b>RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUSTRATO EN TOMATE SUBIRRIGADO</b> 19	
<b>CONCLUSIÓN GENERAL</b> .....	33

## INTRODUCCIÓN

La población mundial está creciendo alrededor de 80 millones de personas por año (USCB, 2012) y se prevé que para el 2050 existan 9.1 billones de personas en el mundo (U.S. Census Bureau, 2019). Para el 2030, se proyecta que la población mundial enfrentara un 40 % de déficit de agua (2030 WRG, 2009). El agua subterránea proporciona agua potable al menos al 50% de la población mundial y representa el 43% de la utilizada para el riego (FAO, 2010). Los sistemas de producción de cultivos agrícolas son uno de los mayores consumidores de agua (Bouchaaba *et al.*, 2015, Jacobosen *et al.*, 2012, Frijia *et al.*, 2009). La producción de hortalizas en invernaderos ha logrado incrementar los rendimientos por unidad de superficie; sin embargo, para incrementar la producción, se aplican altas cantidades de agua y fertilizantes (Klock-Moore y Broschat, 2001). La industria de los invernaderos aplica más fertilizantes por unidad de superficie que cualquier otro sistema agrícola; en Europa se encontraron concentraciones altas de NO<sub>3</sub>-N, hasta de 2000 kg N / ha. y en EE. UU más de 2300 kg/ha (Chen and Wei 2018). Minimizar los requerimientos de fertilizantes en la producción de invernaderos es muy importante para los productores porque cada vez más se elevan los costos de fertilizantes y la única opción para mejorar la eficiencia y mantener la contaminación bajo control, es adoptar sistemas de cultivo que recolecten y reutilicen el agua de riego, es decir, utilizar sistemas cerrados con cultivos sin suelo (Massa *et al.*, 2010, Montesano *et al.*, 2010, Roupael *et al.*, 2004). Sin embargo, las prácticas comunes para la producción en invernaderos incluyen sistemas de riego convencionales o superficiales (sistema abierto), que no son amigables con el medio ambiente (Ferrarezi *et al.*, 2011; Richards y Reed, 2004). La pérdida de agua y nutrientes en estos sistemas de riego es provocada por la baja eficiencia en el suministro de agua y las altas tasas de lixiviación cuando el agua suministrada es mayor que la capacidad de retención de agua del medio de cultivo (Richards y Reed, 2004; Santamaria y Serio, 2001). Al utilizar fertilizantes a altas concentraciones junto con un sistema de riego inadecuado originan una elevada lixiviación de los mismos, provocando la contaminación de aguas subterráneas (Whitcher *et al.*, 2005). Existen alternativas para minimizar la aplicación y lixiviación de agua y nutrientes, el cual consiste en adoptar sistemas que recolecten y reutilicen el agua de riego



y que sean amigables con el medio ambiente, es decir, utilizar sistemas cerrados con cultivos sin suelo, como lo es el sistema de subirrigación (Massa *et al.*, 2010; Putra and Yuliando, 2015; Savvas *et al.*, 2013; Burrage, S.W., 2014). Los sistemas de riego cerrado es un método interesante y prometedor para maximizar el uso eficiente de agua y fertilizantes comparado con un sistema convencional de ciclo abierto (Bouchaaba *et al.*, 2015; Putra and Yuliando, 2015, Massa *et al.*, 2010) obteniendo mayores rendimientos (Rouphael *et al.*, 2006). Y se ha demostrado que en plantas ornamentales han aumentado el crecimiento y la disminución de agua y nutrientes (Gent y McAvoy, 2011; Haley and Reed, 2004; Zheng *et al.*, 2004). El sistema de subirrigación consiste en aplicar soluciones nutritivas (agua y fertilizante) directamente a la zona radicular de la planta, penetrando por la parte inferior del contenedor, en donde la solución se mueve hacia arriba en el recipiente por acción capilar, por lo que la solución no absorbida se drena, captura y reutiliza, repitiéndose el ciclo cuando se requiera (Reed, 1996; James y van Iersel, 2001). Se ha reportado que el sistema de subirrigación aporta diversos beneficios en comparación con los sistemas tradicionales de riego, tales como; reducción de mano de obra, ahorro de agua y fertilizante hasta en un 50%, aplicación uniforme de agua y fertilizante, reducción de enfermedades foliares, obtención de cultivos uniformes y una mejor productividad, principalmente en ornamentales (Landis y Wilkinson, 2004; Ahmed *et al.*, 2000; Van Iersel, & Kang, 2002). No obstante, esta práctica no ha sido adaptado extensamente, esto es debido a que existe poca información disponible en el uso de este sistema de riego (Haley *et al.*, 2004; James y van Iersel, 2001), sobre todo, se ha puesto menos atención en la aplicación de este sistema en la producción de hortalizas, (Serio *et al.*, 2004; Santamaria *et al.*, 2003), como lo es en el cultivo tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Por lo anterior, es necesario poner atención en los sistemas de producción que maximicen el uso eficiente de agua y fertilizantes, así también el rendimiento y calidad que se requiere para abastecer de alimentos a la creciente población mundial.

**Objetivo general:**

Definir la utilidad de los sistemas de subirrigación en la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes en el cultivo de tomate.

**Hipótesis:** El sistema hidropónico de subirrigación permite aumentar la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes.

## REVISIÓN DE LITERATURA

La creciente población mundial, ha provocado una creciente demanda en la producción de hortalizas de calidad, por tanto, los productores se han visto en la necesidad de implementar nuevas tecnologías como son los invernaderos. Los invernaderos son estructuras que están diseñadas para proporcionar a la planta un ambiente controlado, ya que permite modificar y controlar de forma eficiente los principales factores ambientales que intervienen en el proceso de crecimiento y desarrollo de las diferentes hortalizas, ya que se generan microclimas artificiales que permiten aumentar los rendimientos (Al-Adwan y Al-D, 2012). El invernadero representa un sistema de producción que incrementa la eficiencia del uso del agua, ya que se disminuye las pérdidas por evapotranspiración, esto sucede gracias a que se crea un microclima para mejorar la fotosíntesis de la planta. En general, la producción bajo invernaderos incrementa la eficiencia en el uso del agua por tres razones: 1. Se reduce la evapotranspiración (menor radiación, mayor humedad). 2. Incremento de los rendimientos debido a un mejor control de plagas y enfermedades. 3. Técnicas avanzadas de riego (riego por goteo y reúso del agua) (Salazar *et al.*, 2014). Los invernaderos y el uso de cultivos hidropónicos han permitido incrementos en rendimientos y calidad de los frutos, ya que los cultivos hortícolas se desarrollan en ambientes pocos restringidos y controlables (Preciado *et al.*, 2011).

### Hidroponía

La producción en ambiente controlado e hidroponía parece ser la respuesta a muchas de las dificultades asociadas con la producción de cultivos especiales al aire libre como consecuencia de la degradación continua del suelo, la pérdida de fertilidad, el uso indiscriminado de insumos químicos y, sobre todo, el continuo agotamiento de los recursos hídricos (Sheikh, 2006).

La hidroponía denominada por W. F. Gericke “*hydro*” (agua) “*ponos*” (lugar o trabajo) en su etimología literalmente es “trabajo en agua”, se define como la ciencia del crecimiento de las plantas sin utilizar el suelo (Resh, 2001). Es una técnica donde las plantas se desarrollan con soluciones nutritivas con o sin el uso de un medio o sustrato (orgánico e inorgánico) (Beltrano y Giménez, 2015). La hidroponía es una tecnología que

ha resultado en mayor calidad y rendimientos de los cultivos, así como en el uso eficiente del agua, fertilizantes, químicos y pesticidas. En especial los sistemas de hidroponía con recirculación donde se hace ahorro de agua y energía (Salazar *et al.*, 2014).

### **Subirrigación**

El sistema de subirrigación con recirculación de solución nutritiva, también referido como subirrigación de cero escurrimientos (Uva *et al.*, 2001; Santamaria *et al.*, 2003; Roupheal *et al.*, 2006), funciona al permitir que el agua se mueva desde un depósito en donde se almacena la SN a una bandeja de aplicación dentro de la cual se encuentran los contenedores, manteniendo la SN por un tiempo determinado para permitir que esta se mueva a través del medio de cultivo por acción capilar (Bouchaaba *et al.*, 2015). Después que el riego se completa, la cantidad de SN no absorbida por el medio de cultivo, se regresa de nuevo al tanque de almacenamiento para su reutilización en riegos posteriores (Van Os, 1999; Incrocci *et al.*, 2006; Pinto *et al.*, 2008), para lo cual se necesita realizar ajustes periódicos al volumen de agua, pH y la concentración de nutrientes, valorándose estos últimos generalmente por la medición de la CE (Cox, 2001; Incrocci *et al.*, 2006). En Europa, la subirrigación se ha utilizado durante muchos años para ayudar a resolver problemas con los métodos tradicionales de riego (Molitor, 1990). Sin embargo, el resto de los países no han adoptado este sistema tan extensamente. Un factor que contribuye es que hay poca información disponible para la aplicación del sistema de subirrigación en hortalizas, ya que son pocos los estudios publicados que reporten las prácticas culturales óptimas para el uso de este sistema para la producción de cultivares en condiciones controladas (Haley *et al.*, 2004; James y van Iersel, 2000).

### **Ventajas y desventajas del sistema de subirrigación**

El sistema de subirrigación ofrece muchas ventajas, entre las que se encuentran el ahorro de nutrientes y agua, proporciona sales de una manera uniforme, evita la humedad en la parte aérea de la planta, uniformidad de riego, menor compactación del sustrato, mejor productividad y cultivos más uniformes; Además, reduce la descarga de nutrientes a los ecosistemas circundantes y reduce los costos de producción (Cox, 2001; Santamaria *et al.*,

2003; Roupael y Colla, 2005; Roupael *et al.*, 2008; Montesano *et al.*, 2010). Estos beneficios generan ahorros en mano de obra, insumos materiales primas y pérdidas de producto (Purvis *et al.*, 2000; Santamaria *et al.*, 2003). Además, el sistema de subirrigación facilita el manejo de la SN ya que mantiene estables los parámetros de la misma, puesto que los elementos que no son absorbidos por la planta se acumulan en la parte superior del sustrato, en lugar de la acumulación en la SN como lo haría en un sistema de riego superficial (Reed, 1996; Kent y Reed, 1996; Morvant *et al.*, 1997; Santamaria *et al.*, 2003; Roupael y Colla, 2005; Roupael *et al.*, 2006; Montesano *et al.*, 2010).

Una de las desventajas del sistema de subirrigación es que al usar SN demasiada concentradas provoca la acumulación excesiva de sales en el medio de crecimiento, esto se debe a que este sistema no lixivia agua y sales fuera de los contenedores y, a menudo se acumulan cerca de la parte superior del medio de cultivo cuando se produce la evaporación (James, 2001). Debido a que la mayor parte del crecimiento de las raíces en las plantas con subirrigación ocurre en el fondo de la maceta, la acumulación de sal en la parte superior del medio de cultivo, normalmente no es perjudicial para las plantas. Sin embargo, las sales también pueden acumularse en las capas medias y de fondo del medio de cultivo si la concentración de fertilizante es alta. Idealmente, la concentración de nutrientes de las capas media e inferior del medio de cultivo debe ser lo suficientemente alta para proporcionar la planta los nutrientes necesarios, pero no tan alta que causa daños por estrés salino en las plantas (James, 2001). Además, el sistema de subirrigación es más costoso que un sistema de goteo convencional y requiere del uso de medios de crecimiento de alta calidad física y uniformidad (Reed, 1996).

La recirculación permite reducir el uso total de fertilizantes debido a que no se pierden nutrientes del sistema. Sin embargo, la subirrigación requiere un manejo cuidadoso de las concentraciones de las soluciones de fertilizantes para producir de alta calidad (Roupael y Colla, 2005; Zheng *et al.*, 2004). Las tasas óptimas de fertilización para los sistemas de riego superficial son bien conocidas, pero hay menos información disponible sobre las concentraciones ideales de solución de fertilizante para subirrigación (Kang y van Iersel, 2000). En general, las concentraciones de fertilizantes deben ser más bajas con la subirrigación que con el riego por goteo (Kent y Reed, 1996; van Iersel, 1999). Las sales

de nutrientes no son lixiviadas del sustrato y pueden acumularse dentro de los recipientes, exponiendo potencialmente a las plantas al estrés osmótico (Morvant *et al.*, 1997). La acumulación de sales en la capa de sustrato superior se ve exacerbada por altas tasas de fertilización (van Iersel, 2000). El manejo eficaz de nutrientes para subirrigación requiere minimizar el riesgo de estrés osmótico, al tiempo que proporciona a las plantas una nutrición adecuada (Zheng *et al.*, 2004). Las concentraciones óptimas de solución de fertilizante varían entre las especies y pueden depender tanto de las necesidades nutricionales como de la tolerancia a la sal de un cultivo en particular (Kang y van Iersel, 2002). En algunos estudios realizados, principalmente con ornamentales, demuestran que la concentración de fertilizantes en subirrigación pueden reducirse hasta en un 50% de la tasa recomendada para riegos superficiales, sin afectar el crecimiento y calidad de la planta (Ruophael *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2004); aunque, la respuesta de algunas hortalizas a la subirrigación ha sido variada; por ejemplo, Roupheal y Colla (2009) han reportado que al reducir en un 50% la nutrición recomendada para riego superficial, resultó perjudicial sobre el crecimiento, rendimiento y absorción de macronutrientes en plantas de calabaza (*Cucurbita pepo* L., cv. Afrodite) subirrigadas; mientras que, Martinetti *et al.* (2008), obtuvieron una reducción del crecimiento y rendimiento en berenjena (*Solanum melongena* L.) al subirrigar con una SN completa recomendada para riego superficial.

### **Lámina y tiempo de riego en subirrigación**

Según Reed (1996), para llevar a cabo el riego con sistema de subirrigación, como regla general se debe inundar alrededor del 20 a 25 % de la altura del contenedor, y el tiempo de riego debe ser de 10 a 15 minutos para evitar daños por anegamiento; sin embargo, tanto la lámina como el tiempo de inmersión ideal para subirrigación dependerá de la especie con el que se trabaje, necesidades hídricas, composición y volumen del sustrato, y de las dimensiones del contenedor (García *et al.*, 2015). Relacionado a lo anterior, García *et al.* (2015) mencionan que para el adecuado crecimiento y rendimiento de chile pimiento, se debe usar una lámina de riego de 15 cm y un tiempo de riego de 20 min al emplear un sustrato compuesto por una mezcla de turba ácida y perlita (80:20 v/v), mientras al producir pimiento emplear un sustrato compuesto por una mezcla de turba

ácida: fibra de coco: perlita (40:40:20 v/v) es adecuado emplear una lámina de riego de 15 cm y un tiempo de inundación de 30 min (García *et al.*, 2017).

### **Control adecuado de la frecuencia de riego**

El momento de riego en un sistema de subirrigación es similar a otros sistemas de riego. Las plantas deben regarse después de que la mayor parte de agua disponible se ha agotado, pero antes de cualquier estrés hídrico empiece. En el sistema de subirrigación se debe evitar dejar inundado por mucho tiempo el sistema radicular para evitar problemas de anegamiento; pero, además, no se debe dejar que el medio de crecimiento se seque por completo, ya que sería difícil rehidratar el sustrato por subirrigación (Reed, 1996). Por lo anterior, es adecuado el uso de microtensiómetros para el control adecuado de la frecuencia de riego en este sistema. El sistema de subirrigación ha mostrado eficiencia en el uso de agua (Klock-Moore y Broschat, 2000), sin embargo, esta eficiencia puede aumentar con el uso de sensores de humedad para monitorear la humedad del sustrato y con ello poder controlar el riego (Ferrarezi y van Iersel, 2011).

Para optimizar el uso del agua en la producción de cultivos hortícolas, estudios recientes han sugerido el uso de riego automatizado en tiempo real basado en el potencial matricial del sustrato (Caron *et al.*, 2016). Por ello utilizar tensiómetros de forma adecuada seleccionando valores correctos del potencial del agua con una programación se obtendrán resultados satisfactorios que permitirán mejor eficiencia en el uso y manejo del agua (Buttaro *et al.*, 2015; Ecoglan *et al.*, 2006).

### **Importancia del tomate**

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), por la demanda que tiene en el mercado local, nacional e internacional, es una de las hortalizas más rentables. México se ha consolidado como uno de los principales exportadores de tomate, ya que la producción de esta hortaliza en el país asciende a 3,098,329.41 toneladas, con un valor de producción de \$ 20, 639,987.73 en una superficie de 50, 595.56 hectáreas (SIAP, 2015). Existen 20,000 hectáreas bajo agricultura protegida (SAGARPA, 2014) de las cuales aproximadamente

12,000 son de invernaderos y las otras 8,000 corresponden a malla sombra y macro túneles entre otras estructuras.

Entre 2005 y 2015, las exportaciones mundiales de tomate crecieron a una tasa promedio anual de 3.8 por ciento. En este rubro destacan México y Holanda, que participaron en 2015 con 20.9 y 15.1% del volumen mundial exportado, respectivamente (SAGARPA 2014). Las exportaciones de estos países crecieron a tasa promedio anuales de 5.6 y 3.5% durante la década citada.

El 56.3 % de la producción nacional de tomate en el 2016 se concentró en cinco entidades: Sinaloa (27.6%), San Luis Potosí (9.2%), Michoacán (7%), Baja California (6.7%), y Zacatecas (5.7 por ciento). También destacan Jalisco (4.7%), Baja California Sur (4%) y Sonora (3.8 por ciento) (Carreón, 2017).



Article

## ARTÍCULO 1



# Water and Fertilizer Use Efficiency in Subirrigated Containerized Tomato

Ariel Méndez-Cifuentes <sup>1</sup>, Luis Alonso Valdez-Aguilar <sup>1,\*</sup>, Martín Cadena-Zapata <sup>2</sup>,  
 José Antonio González-Fuentes <sup>1</sup>, José Alfredo Hernández-Maruri <sup>1</sup>  
 and Daniela Alvarado-Camarillo <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo 25315, Coahuila, Mexico; mendezc.ariel@gmail.com (A.M.-C.); jagf@uaaan.edu.mx (J.A.G.-F.); alfredo.hernandezm@uaaan.edu.mx (J.A.H.-M.)

<sup>2</sup> Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo 25315, Coahuila, Mexico; martin.cadena@uaaan.edu.mx

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias del Suelo, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo 25315, Coahuila, Mexico; daniela.alvaradoc@uaaan.edu.mx

\* Correspondence: luisalonso.valdez@uaaan.edu.mx

Received: 19 March 2020; Accepted: 3 May 2020; Published: 7 May 2020



**Abstract:** Greenhouse cultivation is highly efficient in the use of water and fertilizers. However, due to intensive production, the greenhouse industry applies ample amounts of water and fertilizers. An alternative to minimize water and nutrient loss is zero-leaching systems, such as closed-loop subirrigation. The objective of the present study was to compare the water and fertilizer use efficiency in containerized tomato plants grown in a subirrigation system and a drip irrigation system. Subirrigated plants exhibited lower biomass than drip-irrigated plants. However, the amount of nutrient solution required to restore evapotranspired water was lower in subirrigation. The yield was marginally decreased in subirrigated plants compared to drip-irrigated plants. The amount of nutrient solution required to produce 1 kg of fresh tomatoes was 22 L in subirrigation, whereas in drip irrigation, plants demanded 41 L. The total nitrogen applied through the nutrient solution was 75% lower in subirrigation than in drip irrigation, while the phosphorus, potassium, calcium and magnesium applied was 66%, 59%, 70% and 74% lower, respectively. We concluded that the subirrigation system proved to be more water- and nutrient-efficient than the drip irrigation system due to the zero leaching of the nutrient solution, the lower number of irrigation events required and the lower nutrient demand of plants.

**Keywords:** zero-leaching watering systems; drip irrigation; greenhouse vegetable crops; water scarcity

## 1. Introduction

Water is one of the most important resources. It is used for household and industrial consumption, as well as for agricultural production [1]. Agricultural production systems are the largest consumers of water [2–4]; the irrigation of agricultural crops has allowed for the raising of yields and the stabilizing of food production and prices, which in turn has permitted the achievement of food security in many countries [5]. Groundwater is by far the main source of potable water (at least 50%) and water for agricultural irrigation (43%) [6]. Nonetheless, excessive use of water because of inadequate irrigation practices has caused overexploitation of aquifers, reduced water quality due to pollution and decreased groundwater tables [7,8].

Greenhouse cultivation provides food products of high quality all year round and, in terms of yield and gross income, it is highly efficient in the use of water and fertilizers due to the decrease in



potential evaporation and the application of advanced irrigation technologies, such as drip irrigation and hydroponics [9]. However, in spite of its high efficiency, due to its intensive use and high yields, the greenhouse industry applies more water and fertilizers on a surface area basis compared to any other agricultural system, greatly contributing to the depletion and pollution of water reservoirs. Reducing the water and fertilizer amounts used for greenhouse production is thus important due to availability and pollution concerns. In fact, greenhouse growers fear the scarcity of water of good quality much more than its cost [9]. A strategy to further increase water and fertilizer use efficiency in greenhouse production is to adopt cultivation systems that collect and reuse irrigation water by using closed-loop irrigation systems [10–12]. Soil pollution in greenhouses is also an issue of utmost importance. In Europe, for example, concentrations of  $\text{NO}_3^-$ -nitrogen (N) up to 2000  $\text{kg ha}^{-1}$  were recorded in a 100 cm soil depth underlying commercial greenhouses [13], while in the United States, reports indicated concentrations higher than 2300  $\text{kg ha}^{-1}$  in the soil under decades-old greenhouses [14].

Vegetable production under controlled environment systems has allowed yield and quality increases due to the higher fertilizer rates and water inputs [15]; for example, N rates for some containerized nursery plants range from 1067 to 2354  $\text{kg ha}^{-1}$  per year, which is 10–15 times higher than that recommended for field crops [16].

Common practices for greenhouse production include surface irrigation systems with no recirculation of the nutrient/fertigation solution, which is not environmentally friendly [17,18]. The loss of water and nutrients in such irrigation systems is caused by high leaching rates as the water supplied surpasses the water retention capacity of the growing medium [18,19]. Unfortunately, high leaching rates are required to avoid salt buildup in the growing media. Combining high fertilizer rates with an inadequate irrigation system results in increased leaching, and thus, in increased groundwater pollution [20]. Thus, the efficient use of water is one of the fundamental factors to guarantee food production [21].

Establishing innovative irrigation water management may contribute to the mitigation of negative issues related to climate change [22]. An alternative to minimize water and nutrient loss to the environment for soilless cultivation of vegetable species is zero-leaching systems, such as subirrigation [23–25]. Closed irrigation systems are an interesting and promising method to maximize water and fertilizer use efficiency compared to conventional open irrigation systems [2,10,23], as the nutrient solution that is not retained by the growing medium is recirculated for reuse in the next irrigation event [15,17,26–28].

Subirrigation systems have been assessed for containerized greenhouse ornamental plants, which have demonstrated increased water and nutrient efficiency [15,29,30] and increased growth [12]. Nevertheless, little attention has been paid to the use of subirrigation for containerized vegetable species [31–33] such as greenhouse tomato. The objective of the present study was to define water and fertilizer use efficiency in containerized tomato grown in a subirrigation system.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Cultural Conditions and Plant Material

The experiment was conducted in a greenhouse at Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, in Northeast Mexico ( $25^{\circ}23'42''$  N Lat.,  $100^{\circ}59'57''$  W Long., 1743 m above sea level). Weather data were collected from a weather station located in the greenhouse. Mean maximum, mean minimum and mean temperature for the study duration were 25.7 °C, 14.4 °C and 20.1 °C, respectively, while maximum, minimum and mean relative humidity were 92%, 43% and 68%, respectively. Mean seasonal photosynthetically active radiation was 389  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

*Solanum lycopersicum* L. cv. Climstar 20 cm tall transplants with two fully expanded leaves were planted on 26 August 2017, into 13 L black polyethylene containers (one plant per container) filled with a mixture of sphagnum moss, coconut fiber and perlite (40%, 40%, 20% v/v) to a height of 27 cm. Initial medium pH and electrical conductivity (EC) were 5.7 and 0.8  $\text{dS m}^{-1}$ , respectively.

## 2.2. Irrigation Systems

In this experiment, a subirrigation system was designed in order to compare the water and fertilizer use efficiency against drip irrigation. The subirrigation system consisted of rigid plastic trays/troughs (69 × 39 × 16 cm; length, width and height) with two 1-plant containers each. Containers were placed 30 cm apart within the row, and rows were kept 120 cm apart. Each tray/trough had a system of polyvinyl chloride pipes and valves for irrigation and drainage of the corresponding nutrient solution, which was pumped with a <sup>1</sup> HP pump.

Subirrigation started when the growing medium registered a moisture tension of 10 KPa measured with a tensiometer (Irrometer Model MLT, Riverside, CA, USA), with a flooding depth and duration of 15 cm and 30 min, on which the containers remained standing in the nutrient solution. The unabsorbed solution was drained back into a 200 L storage tank for reuse in the following irrigation event and renewed every 15 days. The pH of the nutrient solution was adjusted to  $6.0 \pm 0.1$  prior to irrigation with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.1 N). The evapotranspired nutrient solution was replenished with fresh nutrient solution to complete the initial volume of the storage tank. The drip surface irrigation system consisted of two emitters dispensing a total of 2 L·h<sup>-1</sup> of nutrient solution per container, and irrigation was conducted when the substrate moisture tension reached 10 KPa, with enough solution to achieve a 30% leaching fraction. The experimental unit for the subirrigation treatment consisted of two containers (i.e., two plants) placed on a single tray/trough. The drip irrigation treatment also had two one-plant containers per replication.

## 2.3. Nutrient Solutions

Basic nutrient solution contained (meq L<sup>-1</sup>): 14 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 2 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 8 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 11 Ca<sup>2+</sup>, 9 K<sup>+</sup> and 4 Mg<sup>2+</sup> (EC = 2.4 dS m<sup>-1</sup>). During the vegetative phase, the basic nutrient solution was applied at 120% concentration. However, from the blooming of the first to the third truss, the concentration of the basic nutrient solution was decreased to 70% (EC = 1.7 dS m<sup>-1</sup>), and from the third to the fifth truss it was at 50% (EC = 1.2 dS m<sup>-1</sup>). The fertilizer-grade salts used for preparation of the nutrient solutions included: 5[Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O] 1NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, KNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl, HNO<sub>3</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Micronutrients were provided as Fe-EDTA, Zn-EDTA, Cu-EDTA, Mn-EDTA, B and Mo at (in mg L<sup>-1</sup>): 3.0, 0.2, 0.1, 1.4, 0.3 and 0.1, respectively.

## 2.4. Plant Growth, Yield and Mineral Composition

The harvest of fruits started 120 days after transplanting and was completed when the study was concluded (160 days after transplanting). The fruit was considered ready for harvest when 80% of the pericarp was red; the fresh fruit yield was calculated on a total yield basis. At experiment termination, whole plants were harvested and the roots were washed with tap water to remove excess substrate; the substrate was divided in three layers: bottom, medium and top layers (0 to 8, 8 to 16 and 16 to 25 cm of the root ball, respectively). The shoot was separated into stems, leaves and all the fruits harvested, which were then, along with the roots, dried in an oven at 70 °C for 72 h prior to measuring dry weight.

## 2.5. Tissue Mineral Analysis and Substrate pH and EC

Dry plant tissues (root, shoot and fruit) were ground to pass a 20-mesh sieve (Thomas-Wiley Mill Co., Philadelphia, PA). Dry ground tissues were analyzed for total N concentration utilizing Kjeldhal's procedure [34], while phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) concentrations were determined in previously digested ground tissues (2:1 mixture of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:HClO<sub>4</sub> and 2 mL of 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) with an Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (ICP-AES, model Liberty, VARIAN, Santa Clara, CA) [35]. Macronutrients accumulated in the entire plant were calculated considering their concentration in the roots, shoot and fruits and the dry weight of each plant part.

Substrate pH and EC were measured in an air-dried sample from the three medium layers using the 1:2 dilution method [36]. The 1:2 mixture was allowed to sit for 60 minutes and then it was filtered. The pH and EC were measured using a portable ionometer (Horiba LAQUA Twin).

## 2.6. Water and Nutrient Use Efficiency

Water consumed by plants was measured indirectly in both irrigation systems. In subirrigation, the volume of water retained by the growing medium was calculated by measuring the nutrient solution depleted from the tray/trough at flooding termination, while in drip-irrigated plants, it was calculated by measuring the solution dispensed through the emitters when the leaching fraction was achieved. Water consumed throughout the study was used to calculate the water use efficiency in terms of total fresh fruit production (liters of water per kilogram of fresh fruit produced) and total evapotranspired water (liters of water evapotranspired per plant throughout study duration).

## 2.7. Statistical Design and Analysis of Irrigation Method Effect

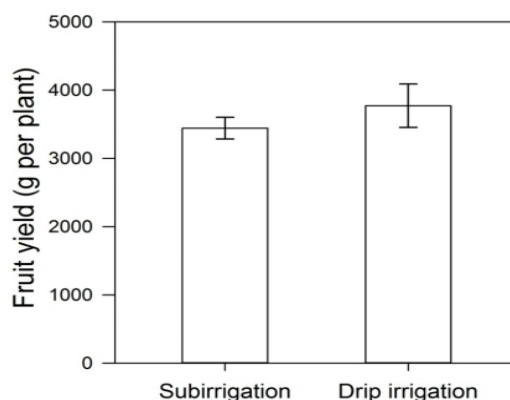
The experiment was set in a randomized complete blocks design with two treatments: Subirrigation and Drip irrigation systems, with six two-plant replications per treatment. Data were analyzed with ANOVA, and Tukey's multiple mean comparison test ( $p < 0.05$ ) when appropriate, using R Studio (v. 3.4.2.) [37,38].

## 3. Results

Subirrigation caused lower plant biomass production than in drip-irrigated plants, which was due to a decrease in root and leaf growth as suggested by their lower dry weight (Table 1). Stem and fruits dry weights were similar for plants in both irrigation systems (Table 1). Fruit yield was slightly but significantly decreased (9.5%) in subirrigated plants (Figure 1).

**Table 1.** Dry weight of plant parts of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) grown in two irrigation systems.

Irrigation System	Dry Weight g Per Plant				
	Root	Stem	Leaves	Fruits	Total
Subirrigation	32.6	65.6	252.7	69.3	420.2
Drip irrigation	42.4	71.4	313.2	76.1	503.0
ANOVA	$p \leq 0.001$	$p = 0.189$	$p \leq 0.041$	$p \leq 0.640$	$p \leq 0.027$



**Figure 1.** Fresh fruit yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants grown in two irrigation systems. Means were significantly different according to ANOVA ( $p \leq 0.018$ ).

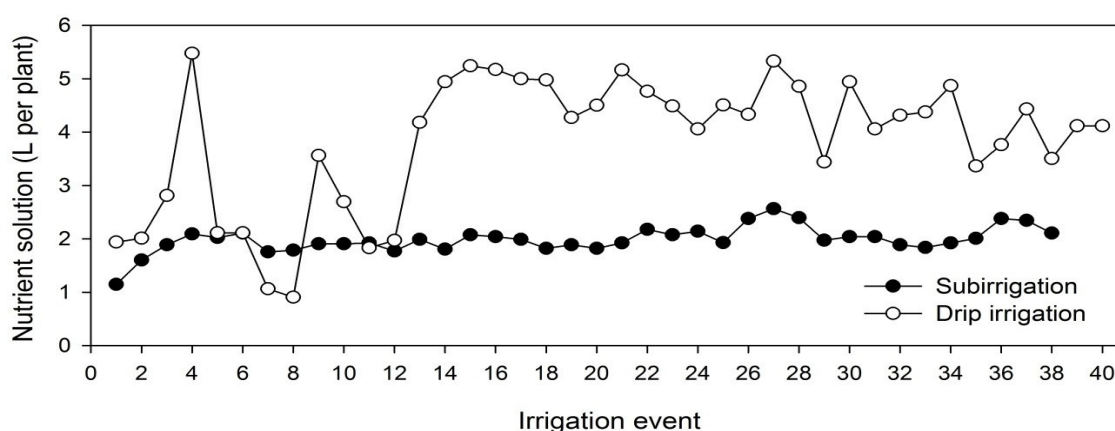
Substrate pH was lower while the EC was higher when subirrigation was applied (Table2). Nonetheless, when averaged across both irrigation systems, the pH was higher in the middle and bottom layers of the growing medium, while the EC was higher in the top layer (Table2).

The amount of nutrient solution required to restore evapotranspired water was predominantly lower in subirrigation in most of the irrigations conducted throughout the experiment, while in drip irrigation, plants demanded twice as much solution (Figure2). Throughout the study, plants in subirrigation required 38 irrigations whereas in drip irrigation there were 40 irrigation events (Figure2).

**Table 2.** Growing medium pH and electrical conductivity (EC) at experiment termination as affected by two irrigation systems and the root ball substrate layer of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants.

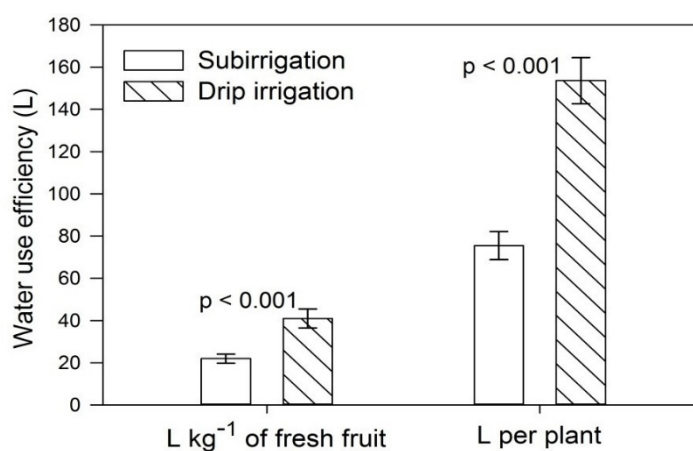
Irrigation Systems	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )
Subirrigation	6.65b	2.33a
Drip irrigation	6.77a	0.64b
Growth medium layer		
Top	6.18b	2.53a
Middle	6.98a	0.84c
Bottom	6.95a	1.07b
ANOVA Irrigation systems	$p = 0.014$	$p \leq 0.001$
Medium layer	$p = 0.031$	$p \leq 0.001$

Means followed by different letters indicate significant effects according to Tukey's multiple comparison test ( $p \leq 0.05$ ).



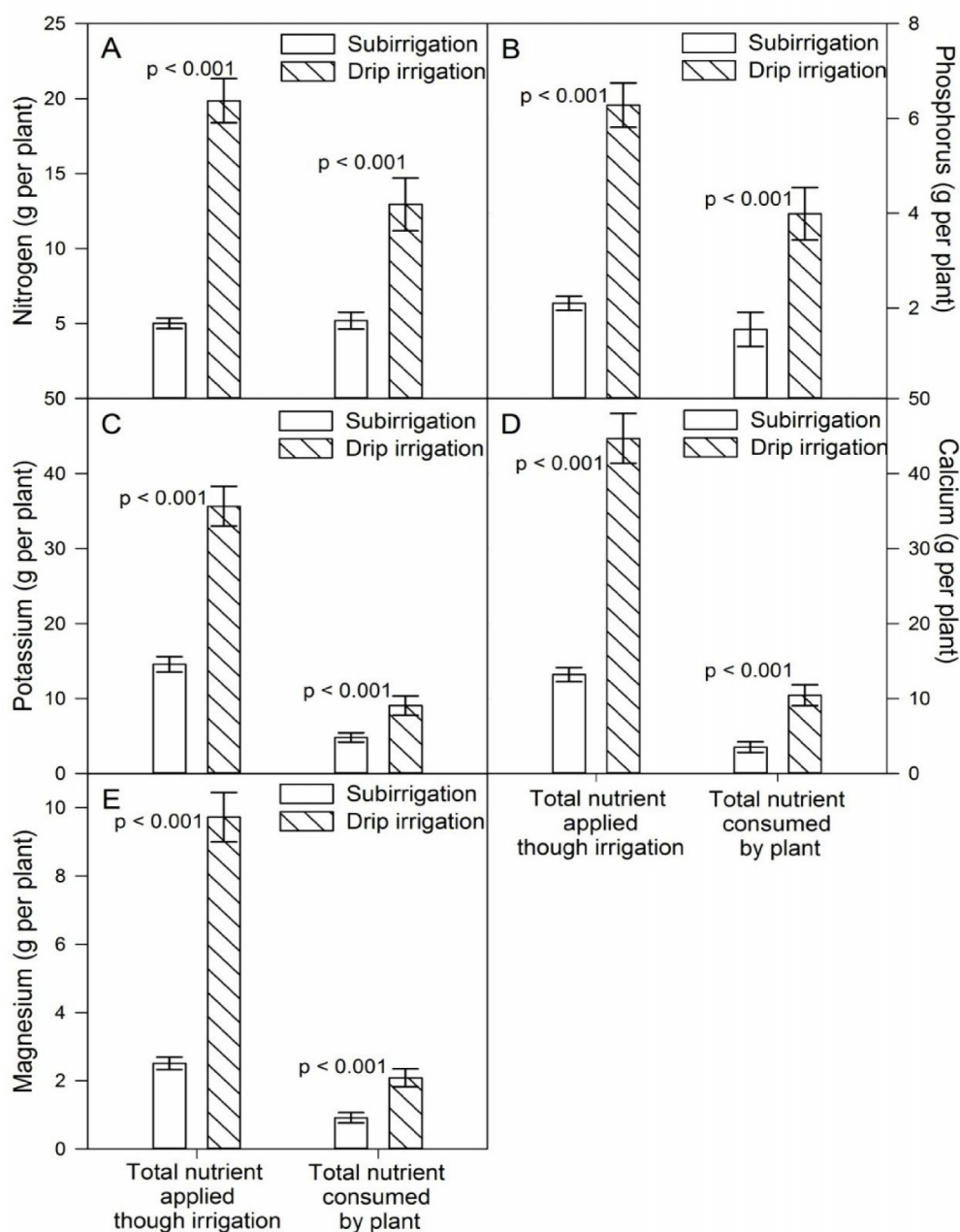
**Figure 2.** Volume of nutrient solution required at every irrigation event to bring the growing medium to container capacity in containerized tomato (*Solanum lycopersicon* L.) plants.

Water use efficiency was higher with subirrigation as plants demanded 22 L of water to produce 1 kg of fresh tomato fruit (Figure 3). In contrast, with drip irrigation, plants required 41 L per kg (Figure 3). In terms of total water consumed, water use efficiency was also higher with Subirrigation as plants demanded 76 L per plant, while with drip irrigation, plants demanded 154 L per plant 1 kg of fresh tomato fruit (Figure3).



**Figure 3.** Water use efficiency in terms of fresh fruit production and total evapotranspirated water in containerized tomato (*Solanum lycopersicon* L.) plants grown in two irrigation systems. Means were significantly different according to ANOVA.

The amounts of N, P, K, Ca and Mg applied through the nutrient solution during the whole experiment were markedly decreased in the subirrigation system (Figure 4). Total N applied was 75% lower in subirrigation than in drip irrigation (Figure 4a), while the P, K, Ca and Mg applied decreased by 66%, 59%, 70% and 74%, respectively (Figure 4b–e). Nonetheless, N accumulated in plant tissues at experiment termination was 60% lower in subirrigated plants (Figure 4a), while P, K, Ca and Mg accumulation was 61%, 47%, 66% and 56% lower, respectively (Figure 4b–e).



**Figure 4.** Nitrogen (A), phosphorus (B), potassium (C), calcium (D) and magnesium (E) use efficiency in terms of total nutrients applied through irrigation and nutrients consumed by containerized tomato (*Solanum lycopersicon* L.) plants grown in two irrigation systems. Means were significantly different according to ANOVA.

#### 4. Discussion

In the present study, subirrigation resulted in a 9.5% reduction in fresh fruit yield compared to drip irrigation. In addition, there was also a 16% reduction in total dry weight, with roots (–23.1%) and

leaves (−19.3%) being more sensitive to dry weight reduction than stems (−8.1%) and fruits (−8.9%). Substrate pH and EC were affected by the irrigation system; in general, pH was lower while EC was higher in subirrigated substrates. Nonetheless, our measurements were much lower than those reported in other studies. For example, in subirrigated containerized tomato, the substrate pH and EC reported by García-Santiago et al. [39] were, on average, 4.37 and 15.5 dS m<sup>−1</sup>, respectively, while we are reporting an average pH of 6.65 and EC of 2.33 dS m<sup>−1</sup>. The lower measurements we obtained must be because we used a progressive reduction in the concentration of the nutrient solution, as we started with solutions whose EC was 2.4 dS m<sup>−1</sup> at the beginning of the study, whereas at experiment termination it was decreased to 1.2 dS m<sup>−1</sup>.

The increased substrate EC in subirrigation has been ascribed to the zero-leaching system, the unidirectional flow of the nutrient solution by capillary force, the evapotranspiratory environmental demand and the nutrient solution concentration [31,40,41]. In order to avoid dangerous EC levels, García-Santiago et al. [39] suggested that the concentration of the nutrient solution has to be decreased to a point in which plant nutrient demands are met but salt buildup, and thus substrate EC, is kept to a minimum. The more acidic pH observed in the substrate in subirrigation is consistent with reports by Martinetti et al. [42] in eggplant (*Solanum melongena* L.), which has been ascribed to the accumulation of H<sup>+</sup> in the substrate due to the zero leaching in subirrigation systems [43].

Previous research has shown contradictory results as to the effect of subirrigation on the yield of vegetable species. Santamaria et al. [33] reported that cherry tomato (*Solanum lycopersicon* var. *Cerasiforme* Alef., 'Naomi') fruit production decreased by 20% in subirrigation compared to drip irrigation, while, according to Bouchaaba et al. [2], in green bean (*Phaseolus vulgaris* L. 'Saporro') plants the decrease in subirrigation was 33%. The reduced growth and yield in subirrigation has been attributed to the higher EC recorded in the top layer of the root ball due to salt buildup throughout the growing season, as corroborated in the present study, and to a poor distribution of moisture at each layer [2,28,40,42]. Nonetheless, according to other researchers, this does not necessarily affect plant growth since root development occurs mainly on the bottom layer [44], so roots are not exposed to the high EC [44]. In contrast, other reports have shown increased yield by subirrigation of vegetables when compared to that obtained with surface irrigation; for example, García-Santiago et al. [39] reported a 12% increase in fruit yield in subirrigated tomato plants.

In the present study, tomato fruit production was decreased in subirrigated plants; however, the effect was only marginal as drip-irrigated plants had a yield only 9.5% higher. This suggests that the benefits of subirrigation can be valuable, because with such an irrigation system there was a higher water and fertilizer use efficiency with minimal impact on fruit yield. Our results showed that water use efficiency was 22 L of nutrient solution required to produce 1 kg of fresh tomato fruit in subirrigated plants. In contrast, drip-irrigated plants demanded 86% more water. In terms of total water consumed by plants, water use efficiency in subirrigation was 76 L per plant, while drip-irrigated plants demanded 103% more water. The lower water use efficiency in drip irrigation may be associated with the nutrient solution that leaches at every irrigation event, the more frequent irrigation events required and the higher amounts of nutrient solution required at every irrigation event to saturate the substrate. Garcia-Santiago et al. [39] reported that in subirrigated tomatoes, the substrate had higher total water, easily available water and non-easily available water than in the substrate of drip-irrigated plants at the end of the growing season, resulting in a higher water retention capacity and thus less irrigation events being required than in drip irrigation.

Our data are consistent with those reported by Nederhoff and Stanghellini [21] as tomato plants irrigated with an open system demanded 53 L to obtain 1 kg of fresh fruits, while in a recirculation subirrigation system, plants needed 22 L to produce 1 kg of fresh fruits. Similarly, testing on eggplants, Martinetti et al. [42] reported a 32% reduction in the nutrient solution supply, although water use efficiency was similar in both subirrigation and drip irrigation systems as plants required 46.6 and 45.5 L of nutrient solution to produce 1 kg of fresh eggplant fruits, respectively.

In addition to the substantial improvement in water use efficiency, subirrigation allowed significant increases in fertilizer use efficiency. In the present study, there was a higher efficiency in N, P, K, Ca and Mg in subirrigated plants compared to drip-irrigated plants. This was because, considering the sum of all the nutrients applied in all the irrigations performed during the experiment, in subirrigation 5.00 g of N was applied per plant, while for P, K, Ca and Mg it was 2.10, 14.55, 13.19 and 2.51 g per plant, respectively. In contrast, in drip irrigation 19.85 g of N was applied per plant, while for P, K, Ca and Mg it was 6.28, 35.65, 44.68 and 9.72 g per plant, respectively. The higher nutrient efficiency of the subirrigation system was due to the zero nutrient solution leaching and the less frequent irrigation events required. Parra et al. [45] mentioned that, in tomato, water and nutrient savings were remarkable (32% to 45%) when the nutrient solution was recirculated, although yield was decreased. In contrast, Oztekin et al. [46] reported that there were no differences in tomato fruit yield between closed and open irrigation systems, although there was a significant fertilizer saving with recirculation. Our data are consistent with those reported by Martinetti et al. [42] in subirrigated eggplant as they reported 91% fertilizer use efficiency when plants were grown in a subirrigation system, while in drip irrigation it was an efficiency of 79%.

The higher nutrient efficiency in subirrigation may also be due to the fact that plants grown under such a system are 16.5% lower in total dry weight compared to drip-irrigated plants; thus, such plants met their demands with lower nutrient contents, as they accumulated 60%, 61%, 47%, 66% and 56% lower N, P, K, Ca and Mg in plant tissues, respectively. Nonetheless, this reduced growth of subirrigated plants did not markedly impact fruit yield, which is in agreement with reports by Massa et al. [10], concluding that any fertigation strategy, such as recirculation of the nutrient solution, is capable of reducing fertilizer use without reducing yield, and therefore has a very promising effect on crop profitability. Blessington-Haley and Reed [30] also showed that subirrigation of several ornamental plants resulted in a K efficiency twice as high of that of surface-irrigated plants.

## 5. Conclusions

Subirrigation proved to be more water- and nutrient-efficient compared to the drip irrigation system for soilless greenhouse tomato production. The higher efficiency is due to the zero leaching of the nutrient solution, the lower number of irrigation events required and the lower nutrient demand of plants, with marginal impact on fruit yield.

**Author Contributions:** Data curation, L.A.V.-A.; Formal analysis, M.C.-Z.; Funding acquisition, L.A.V.-A.; Investigation, A.M.-C., L.A.V.-A. and M.C.-Z.; Methodology, A.M.-C. and D.A.-C.; Project administration, L.A.V.-A.; Resources, J.A.H.-M.; Software, J.A.G.-F.; Supervision, L.A.V.-A., J.A.H.-M. and D.A.-C.; Visualization, M.C.-Z. and D.A.-C.; Writing—original draft, A.M.-C.; Writing—review and editing, M.C.-Z. and J.A.G.-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** The authors thank the National Council of Science and Technology of Mexico (CONACYT) for supporting Ariel Méndez Cifuentes' Ph.D. Scholarship and the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro for supporting this research.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Oki, T.; Quiocho, R.E. Economically challenged and water scarce: Identification of global populations most vulnerable to water crises. *Int. J. Water Resour. Dev.* **2020**, *36*, 416–428. [\[CrossRef\]](#)
2. Bouchaaba, Z.; Santamaria, P.; Choukr-Allah, R.; Lamaddalena, N.; Montesano, F.F. Open-cycle drip vs closed-cycle subirrigation: Effects on growth and yield of greenhouse soilless green bean. *Sci. Hort.* **2015**, *182*, 77–85. [\[CrossRef\]](#)
3. Jacobsen, S.E.; Jensen, C.R.; Liu, F. Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crop. Res.* **2012**, *128*, 34–47. [\[CrossRef\]](#)

4. Frija, A.; Cebil, A.; Speelman, S.; Buysse, J.; Huylenbroeck, G.V. Water use and technical efficiencies in horticultural greenhouses in Tunisia. *Agric. Water Manag.* **2009**, *96*, 1509–1516. [[CrossRef](#)]
5. Rosegrant, M.; Cai, X.; Cline, S. Water and Food to 2025; IFPRI and IWMI Report. 2020 Vision Document; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 2002.
6. FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)—Managing Systems at Risk; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan: London, UK, 2011; Available online: <http://www.fao.org/water/es/>. <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>; (accessed on 14 March 2020).
7. Rosegrant, M.W.; Ximing, C.; Cline, S.A. Water and Food to 2025; Policy Responses to the Threat of Scarcity; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 2002; Available online: <http://www.ifpri.org/pubs/ib/ib13.pdf> (accessed on 1 April 2020).
8. Arreguín Cortés, F.I.; López Pérez, M.; Marengo Mogollón, H. Mexico's Water Challenges for the 21st Century. In *Water Resources in Mexico: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace*; Oswald Spring, Ú., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 21–38. [[CrossRef](#)]
9. Pardossi, A.; Tognoni, F.; Incrocci, L. Mediterranean greenhouse technology. *Chron. Hortic.* **2004**, *44*, 28–34.
10. Massa, D.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Carmassi, G.; Campiotti, C.A.; Pardossi, A. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agric. Water Manag.* **2010**, *97*, 971–980. [[CrossRef](#)]
11. Montesano, F.; Parente, A.; Santamaria, P. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions. *Sci. Hortic.* **2010**, *124*, 338–344. [[CrossRef](#)]
12. Rouphael, Y.; Colla, G.; Battistelli, A.; Moscatello, S.; Proietti, S.; Rea, E. Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2004**, *79*, 423–430. [[CrossRef](#)]
13. Molitor, H.D. The European perspective with emphasis on subirrigation and recalculation of water and nutrients. *Acta Hortic.* **1990**, *272*, 165–173. [[CrossRef](#)]
14. McAvoy, R.; Brand, M.; Corbett, E.; Bartok, J., Jr.; Botacchi, A. Effect of leachate fraction on nitrate loading to the soil profile underlying a greenhouse crop. *J. Environ. Hortic.* **1992**, *10*, 167–171.
15. Zheng, Y.; Graham, T.H.; Richard, S.; Dixon, M. Potted gerbera production in a subirrigation system using low-concentration nutrient solutions. *HortScience* **2004**, *39*, 1283–1286. [[CrossRef](#)]
16. Chen, J.; Huang, Y.; Caldwell, R.D. Best management practices for minimizing nitrate leaching from container-grown nurseries. *Sci. World J.* **2001**, *1*, 96–102. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Ferrarezi, R.S.; Van Iersel, M.W. Monitoring and controlling subirrigation with soil moisture sensors: A case study with hibiscus. In *Proceedings of the SNA Research Conference, Oak Grove, VA, USA, 11 August 2011; Volume 56*, pp. 187–191.
18. Richards, D.L.; Reed, D.W. New Guinea impatiens growth response and nutrient release from controlled-release fertilizer in a recirculating subirrigation and top-watering system. *HortScience* **2004**, *39*, 280–286. [[CrossRef](#)]
19. Santamaria, P.; Serio, F. Coltivazione a ciclo chiuso: La subirrigazione in canaletta. *Inf. Agrar.* **2001**, *41*, 45–49.
20. Whitcher, C.L.; Kent, M.W.; Reed, D.W. Phosphorus concentration affects New Guinea impatiens and vinca in recirculating subirrigation. *HortScience* **2005**, *40*, 2047–2051. [[CrossRef](#)]
21. Nederhoff, E.; Stanghellini, C. Water Use Efficiency of Tomatoes. *Pract. Hydroponics Greenh.* **2010**, *115*, 52–59.
22. Deligios, P.A.; Chergia, A.P.; Sanna, G.; Solinas, S.; Todde, G.; Narvarte, L.; Ledda, L. Climate change adaptation and water saving by innovative irrigation management applied on open field globe artichoke. *Sci. Total Environ.* **2019**, *649*, 461–472. [[CrossRef](#)]
23. Putra, P.A.; Yuliando, H. Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: A review. *Agric. Agric. Sci. Procedia* **2015**, *3*, 283–288. [[CrossRef](#)]
24. Savvas, D.; Gianquinto, G.; Tuzel, Y.; Gruda, N. Soilless Culture. *FAO Plant Production and Protection; Paper No. 217. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops*; FAO: Rome, Italy, 2013; pp. 303–354.
25. Burrage, S.W. Soilless culture and water use efficiency for greenhouses in arid, hot climates. In *International Workshop on Protected Agriculture in the Arabian Peninsula, Doha, Qatar*; Moustafa, A.T., Al-Mohammadi, A., Abou-Hadid, A., Peacock, J.M., Eds.; ICARDA: Aleppo, Syria, 1998; pp. 64–70.



26. Bumgarner, M.L.; Salifu, K.F.; Jacobs, D.F. Subirrigation of *Quercus rubra* seedlings: Nursery stock quality, media chemistry, and early field performance. *HortScience* **2008**, *43*, 2179–2185. [[CrossRef](#)]
27. Majsztrik, J.C.; Ristvey, A.G.; Lea-Cox, J.D. Water and nutrient management in the production of container-grown ornamentals. *Hortic. Rev.* **2011**, *38*, 253–297.
28. Roupshael, Y.; Colla, G. Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Sci. Hortic.* **2005**, *105*, 177–195. [[CrossRef](#)]
29. Gent, M.P.; McAvoy, R.J. Water and nutrient uptake and use efficiency with partial saturation ebb and flow watering. *HortScience* **2011**, *46*, 791–798. [[CrossRef](#)]
30. Blessington-Haley, T.; Reed, D.W. Optimum potassium concentrations in recirculating subirrigation for selected greenhouse crops. *HortScience* **2004**, *39*, 1441–1444. [[CrossRef](#)]
31. Incrocci, L.; Malorgio, F.; Della, B.A.; Pardossi, A. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water Italy. *Sci. Hortic.* **2006**, *107*, 365–372. [[CrossRef](#)]
32. Serio, F.; Elia, A.; Signore, A.; Santamaria, P. Influence of nitrogen form on yield and nitrate content of subirrigated early potato. *J. Sci. Food Agric.* **2004**, *84*, 1428–1432. [[CrossRef](#)]
33. Santamaria, P.; Campanile, G.; Parente, A.; Elia, A. Subirrigation vs. drip-irrigation: Effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato. Italy. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2003**, *78*, 290–296. [[CrossRef](#)]
34. Bremner, J.M. Nitrogen-total. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*; Sparks, D.L., Ed.; Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1996; Volume 5, pp. 1085–1121.
35. Soltanpour, P.N.; Johnson, G.W.; Workman, S.M.; Jones, J.B.; Miller, R.O. Inductively coupled plasma emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*; Sparks, D.L., Ed.; Soil Science Society of North America: Madison, WI, USA, 1996; pp. 91–139.
36. Warncke, D.D.; Krauskopf, D.M. *Greenhouse Growth Media: Testing and Nutrition Guidelines*. Ext. Bul. E; Mich. State Univ. Coop. Ext. Ser.: Lansing, MI, USA, 1983; Volume 176.
37. R. Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. Version 2.3.4. 2009. Available online: <https://www.r-project.org/>, <https://rstudio.com/> (accessed on 22 August 2017).
38. Mendiburo, F.D. *Agricolae: Statistical Provedores for Agricultural Research*. R Package Agriculture Package Version 1.2.8. 2017. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html> (accessed on 22 August 2017).
39. García-Santiago, J.C.; Valdez-Aguilar, L.A.; Cartmill, A.D.; Cartmill, D.L.; Juárez-López, P.; Díaz-Pérez, J.C. Subirrigation of Container-Grown Tomato I: Decreased concentration of the nutrient solution sustains growth and yield. *Water* **2019**, *11*, 2064. [[CrossRef](#)]
40. Cox, D.A. Growth, nutrient content, and growth medium electrical conductivity of poinsettia irrigated by subirrigation or from overhead. *USA J. Plant Nutr.* **2001**, *24*, 523–533. [[CrossRef](#)]
41. Roupshael, Y.; Cardarelli, M.; Rea, E.; Colla, G. The influence of irrigation system and nutrient solution concentration on potted geranium production under various conditions of radiation and temperature. *Sci. Hortic.* **2008**, *118*, 328–337. [[CrossRef](#)]
42. Martinetti, L.; Ferrante, A.; Quattrini, E. Effect of drip or subirrigation on growth and yield of *Solanum melongena* L. in closed systems with salty water. *Res. J. Biol. Sci.* **2008**, *3*, 467–474.
43. Kent, M.W.; Reed, D.W. Nitrogen nutrition of New Guinea impatiens ‘Barbados’ and spathiphyllum ‘Petite’ in a subirrigation system. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **1996**, *121*, 816–819. [[CrossRef](#)]
44. Morvant, J.K.; Dole, J.M.; Allen, E. Irrigation systems alter distribution of roots, soluble salts, nitrogen, and pH in the root medium. *HortTechnology* **1997**, *7*, 156–160. [[CrossRef](#)]
45. Parra, M.; Raya, V.; Cid, M.C.; Haroun, J. Alternative to tomato soilless culture in open system in the Canary Islands: Preliminary results. *Acta Hortic.* **2008**, *807*, 509–514. [[CrossRef](#)]
46. Oztekin, G.B.; Tüzel, Y.; Tüzel, I.H.; Meric, K.M. Effects of EC levels of nutrient solution on tomato crop in open and closed systems. *Acta Hortic.* **2007**, *801*, 1243–1250. [[CrossRef](#)]



## ARTÍCULO 2

### RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUSTRATO EN TOMATE SUBIRRIGADO

Titulo abreviado: conductividad eléctrica y subirrigación aplicación en tomate

Ariel Méndez-Cifuentes <sup>1</sup>, Luis A. Valdez-Aguilar <sup>1\*</sup>, Martin Cadena-Zapata<sup>2</sup>, José A. González-Fuentes<sup>1</sup>, José A. Hernández-Maruri <sup>1</sup>, Daniela Alvarado-Camarillo<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México 25315.

[ariel\\_mendezc@outlook.com](mailto:ariel_mendezc@outlook.com), [luisalonso.valdez@uaaan.edu.mx](mailto:luisalonso.valdez@uaaan.edu.mx),  
[jagf252001@gmail.com](mailto:jagf252001@gmail.com), [joalfher@hotmail.com](mailto:joalfher@hotmail.com)

<sup>2</sup> Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México 25315.

[martin.cadena@uaaan.edu.mx](mailto:martin.cadena@uaaan.edu.mx)

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias del Suelo, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México 25315.

[daniela.alvaradoc@uaaan.edu.mx](mailto:daniela.alvaradoc@uaaan.edu.mx)

\*correspondencia: [luisalonso.valdez@uaaan.edu.mx](mailto:luisalonso.valdez@uaaan.edu.mx)

## Resumen

La subirrigación permite aumentar la eficiencia en el uso del agua y nutrientes, sin embargo, las sales no absorbidas por la planta se acumulan en el sustrato, elevando la conductividad eléctrica (CE). Para reducir el impacto de la CE, se sugiere reducir la concentración de la solución nutritiva (SN). El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la concentración de la SN en tomate subirrigado con SN a una concentración de 120%, 100% y 70%. El rendimiento total de fruto fue más alto en plantas subirrigadas con la SN al 100%. Sin embargo, considerando el rendimiento por racimo, este fue mayor en plantas subirrigadas con SN al 100% cuando se cosechó el segundo y cuarto racimo, siendo 75% y 48% más alto que el rendimiento en tales racimos en plantas subirrigadas con la SN al 120%, respectivamente; en contraste, al finalizar el estudio, el rendimiento en plantas subirrigadas con la SN al 100% fue el más bajo, siendo la SN al 70% en la cual se obtuvo la mayor producción en los racimos séptimo y octavo, superando en 30% y 37% el rendimiento de las plantas subirrigadas con la SN al 100%, respectivamente. Se concluye que el mayor rendimiento se atribuye a una CE del sustrato de  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  independientemente de la concentración de la SN y del racimo cosechado, recomendándose el iniciar el ciclo de cultivo empleando la SN al 100% y posteriormente reducirla al 70% para mantener tal CE.

**Palabras clave:** Cultivos sin suelo, hortalizas de invernadero, hidroponía, inundación y flujo.

## Abstract

Sub-irrigation allows increasing use efficiency of water and nutrients, however, the salts not absorbed by plants accumulate in the substrate, raising the electrical conductivity (EC). In order to reduce the impact of EC, it is suggested to decrease the concentration of the nutrient solution (NS). The objective of the present study was to determine the effect of the SN concentration in tomato subirrigated with NS at concentrations of 120%, 100% and 70%. Total fruit yield was higher in subirrigated plants with the NS at 100%. However, considering the yield per truss, this was higher in plants subirrigated with NS at 100% when the second and fourth trusses were harvested, being 75% and 48% higher than the yield in such trusses in plants subirrigated with NS at the 120%, respectively. In contrast, at the end of the study, the yield obtained by subirrigated plants with the NS at 100% was the lowest, it was the NS at 70% in which the highest yield was obtained in the seventh and eighth trusses, being 30% and 37% higher than the yield of the sub-irrigated plants with the NS at 100%, respectively. In conclusion, the highest yield was attributed to a substrate EC of  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  regardless of the concentration of the NS and the harvested

truss, so that it is recommended starting the cultivation cycle using the NS at 100% and subsequently reducing it to 70% to maintain such EC.

**Key words:** Soilless cultivation, greenhouse vegetables, hydroponics, ebb and flow.

## **Introducción**

La escasez de agua se está convirtiendo en una amenaza real para la sostenibilidad de la agricultura de riego (Mojid et al., 2012). Los sistemas de cultivos sin suelo y en contenedores irrigados mediante subirrigación ofrecen perspectivas para restringir la pérdida de agua y nutrientes, permitiendo una producción más eficiente y amigable con el medio ambiente (Rouphael y Colla, 2005). Sin embargo, existe escasez de información con respecto a cultivo de hortalizas con esta técnica de subirrigación y con ciclo cerrado (Montesano et al., 2010).

A pesar de la alta tasa de lixiviación que causa un sistema de riego abierto, estos sistemas no permiten la acumulación en el sustrato de las sales fertilizantes no absorbidas por las plantas, pero a costa de una mayor contaminación ambiental (Incrocci et al., 2006; Silberbush y Ben-Asher, 2001). Sin embargo, en los sistemas cerrados con subirrigación de cultivos hortícolas en contenedor, las sales no absorbidas se acumulan principalmente en la parte superior del sustrato, en donde se encuentran pocas raíces (Rouphael et al., 2006; Uva et al., 2001). Dado que no se produce lixiviación en los sistemas de subirrigación, la aplicación excesiva de fertilizantes y las sales no absorbidas aumentan la conductividad eléctrica (CE) del sustrato, como lo reportan Elia et al. (2003), Montesano et al., (2010), Santamaria et al. (2003) y van Iersel (2000).

Para reducir el impacto de la subirrigación sobre la CE del sustrato se sugiere que la solución nutritiva (SN) tenga una menor concentración que aquellas que se emplean en los sistemas tradicionales de riego por goteo (Cox, 2001; Mak y Yeh, 2001; Yeh et al., 2004). Giuffrida y Leonardi (2012) mencionan que el uso de una SN de concentración reducida en un sistema cerrado sin suelo para un cultivo de pimiento no influye en el rendimiento total y mejora la eficiencia del uso del agua y los minerales. Sin embargo, una reducción hasta un 50% de la concentración de SN es excesivo, ya que tiene efectos negativos sobre el crecimiento y el rendimiento de las plantas hasta en un 15% (El Youssfi et al., 2010).

Sin embargo, los sistemas de subirrigación en cultivos sin suelo y en contenedor tienen grandes ventajas ya que se ha demostrado que se puede obtener un kilogramo de frutos frescos de tomate con 22 L de agua, mientras que en riego por goteo se requieren 41 L (Méndez-Cifuentes et al., 2020). Asimismo, el nitrógeno total aplicado durante el ciclo de cultivo es 75% menor en plantas subirrigadas en comparación con aquellas irrigadas con un sistema de goteo, mientras que el fósforo, potasio, calcio y magnesio fue un 66%, 59%, 70% y 74% menor, respectivamente (Méndez-Cifuentes et al., 2020).

Esta sustancial mejora en la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes en los sistemas de subirrigación con recirculación de la SN hace necesario realizar investigaciones para probar SN con diferente concentración para minimizar la cantidad de sales que se acumulan en el sustrato sin que se presenten problemas de deficiencias nutrimentales. El objetivo del presente estudio fue el determinar el efecto de la concentración de SN en plantas de tomate desarrolladas en contenedor con un sustrato sin suelo e irrigada mediante un sistema de subirrigación.

## **Materiales y métodos**

### **Condiciones del cultivo**

El estudio se realizó en un invernadero de mediana tecnología ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México (25°23'42'' latitud Norte, 100°59'57'' longitud Oeste y a una altitud de 1743 msnm). Las condiciones ambientales durante el experimento incluyeron una temperatura promedio de 20.1 °C (promedio mínimo de 14.4 °C y promedio máximo de 25.7 °C), y una humedad relativa promedio de 68% (promedio mínimo de 43% y promedio máximo de 92%). La radiación fotosintéticamente activa promedio fue de 389  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Se utilizaron semillas de tomate híbrido (*Solanum lycopersicon* L.) cv Climstar. El trasplante se realizó el 7 de agosto del 2018, cuando las plántulas tenían una altura de 20 cm, las cuales fueron trasplantadas en contenedores de polietileno negro con un volumen de 10 L (una planta por contenedor) utilizando una mezcla de turba ácida (40% v/v), fibra de coco (40% v/v) y perlita (20% v/v).

### **Sistema de subirrigación**

Se diseñó un sistema de subirrigación consistente en una bandeja de plástico rígido con medidas de 69 cm de largo, 39 cm de ancho y una altura de 16 cm, dentro de las cuales se colocaron dos contenedores de polietileno con una planta cada uno. La distancia entre contenedores fue de 30 cm y la distancia entre filas de 120 cm. Cada bandeja tenía un sistema de llenado y drenado de la SN correspondiente a cada tratamiento, el cual consistió de tuberías y válvulas de PVC. El sistema tenía un tanque de 200 L para el almacén de cada una de las SN, las cuales se distribuían a las bandejas de subirrigación con una bomba de 1 HP. Las bandejas de subirrigación se llenaban con una lámina de 8 cm de la SN, la cual se mantenía por 50 minutos para que la SN subiera hasta la superficie del sustrato por capilaridad; después de transcurrido este tiempo, la SN no absorbida se drenaba y se retornaba a los tanques de almacén para ser utilizada en los riegos posteriores. Antes de aplicar cada riego se ajustaba el pH de la SN a  $6.0 \pm 1$  con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . La SN evapotranspirada

se ajustó con SN nueva para completar el volumen de 200 L de cada tanque. El riego se realizó cuando la tensión de humedad en el sustrato fue de 10 kPa.

### **Soluciones nutritivas**

La SN al 100% de concentración tenía la siguiente composición (meq L<sup>-1</sup>): 14 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 2 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 8 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 11 Ca<sup>2+</sup>, 9 K<sup>+</sup> y 4 Mg<sup>++</sup>. El estudio consistió en tres SN, una de ellas con la composición anterior mientras que otras dos contenían el mismo balance iónico, pero con una concentración del 70% y 120%. El pH de las SN osciló entre 5.8 y 5.9 mientras que la CE fue de 2.4, 3.3 y 3.9 dS m<sup>-1</sup> para las soluciones al 70%, 100% y 120%, respectivamente. Para preparar cada SN se utilizaron diferentes sales y ácidos concentrados, los cuales fueron: Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, KNO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl, HNO<sub>3</sub> y H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

### **Rendimiento y variables agronómicas**

El experimento finalizó a los 150 días después del trasplante, iniciando la cosecha de frutos a los 70 días cuando estos presentaban 80% de la coloración característica de la variedad; se llevó un registro del rendimiento de fruto por cada racimo cosechado. Al final del estudio se contabilizó el rendimiento total por planta. Los órganos de las plantas: tallo, hoja y fruto, se introdujeron en un horno de secado a 70 °C durante 72 horas y consecutivamente se registró el peso de la materia seca utilizando una balanza analítica (VELABVE-1000).

Al finalizar el estudio también se determinó el pH y CE del sustrato en el estrato medio del cepellón utilizando el método de dilución (1:2), la cual se dejó en reposo por 30 min para después registrar las propiedades antes mencionada con la ayuda de un ionómetro portátil (Horiba LAQUA Twin). La CE del sustrato también se midió diariamente con sensores conectados a un registrador de datos de la serie Em50 parte de un sistema de ECH<sub>2</sub>O; la comunicación con este modelo es a través de un cable USB a una PC o dispositivo portátil. El software utilizado para visualizar, analizar y configurar los datos fue ECH<sub>2</sub>O Utility.

### **Diseño y análisis estadístico**

La unidad experimental para los tratamientos de subirrigación consistió en dos plantas por cada bandeja. El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar con 3 tratamientos y seis repeticiones por tratamiento. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias fue de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) utilizando el paquete estadístico RStudio versión 3.4.2. (Mendiburo, 2017).

## Resultados y discusión

El rendimiento total de fruto fue más alto en plantas subirrigadas con SN al 100 % de concentración (Figura 1). Estos resultados coinciden con los reportados por García-Santiago et al. (2019) en los que se señala que el rendimiento es más alto en plantas de tomate subirrigadas con la solución de Steiner al 100%, mientras que al ir disminuyendo la concentración se presenta una reducción en la producción de fruto. En el presente experimento, a diferencia del reportado por García-Santiago et al., (2019), se aplicó una concentración mayor al 100%, pero esto no resultó favorable ya que se detectó una disminución del 18% en el rendimiento total cuando la SN aplicada fue del 120% (Figura 1).

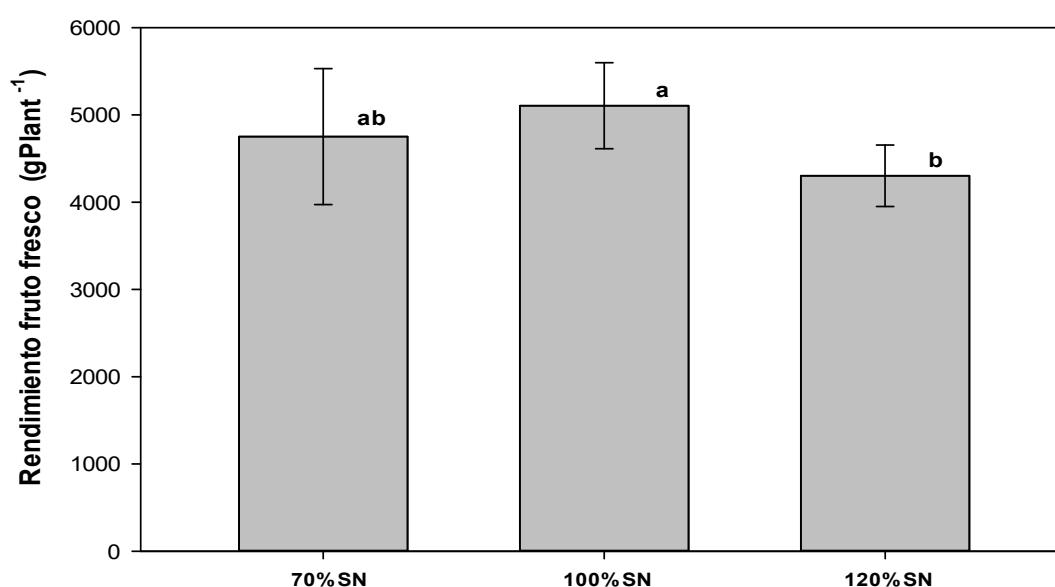


Figura 1. Rendimiento total de fruto de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) subirrigadas con tres diferentes concentraciones de solución nutritiva (SN). Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey con  $p < 0.05$ .

En contraste con nuestros resultados, se han reportado resultados desfavorables en cuanto al efecto de la subirrigación en el rendimiento de plantas hortícolas de invernadero, como es el caso de Santamaria et al. (2003), quienes señalaron que en tomate cherry (*Solanum lycopersicon* var. Cerasiforme Alef., 'Naomi') se presenta una disminución del 20% en el rendimiento en comparación con el riego por goteo.

Considerando el rendimiento por racimo, este fue mayor en plantas subirrigadas con SN al 100% cuando se cosechó el segundo y cuarto racimo, siendo 75% y 48% más alto que el rendimiento en tales racimos en plantas subirrigadas con la SN al 120%,

respectivamente (Figura 2). En contraste, al finalizar el estudio, el rendimiento obtenido por las plantas subirrigadas con la SN al 100% fue el más bajo, siendo la SN al 70% en la cual se obtuvo el mayor rendimiento en los racimos séptimo y octavo, siendo 30% y 37% mayor que el rendimiento de las plantas subirrigadas con la SN al 100%, respectivamente (Figura 2). En los restantes racimos no hubo diferencias entre las SN empleadas. García-Santiago et al. (2019) reportan tendencias similares pues durante el primer mes de cosecha los rendimientos más altos se obtuvieron en plantas de tomate subirrigadas con SN al 80% y 100% de concentración, mientras que a partir de cuarto al sexto mes estos se presentaron en las plantas subirrigadas con la SN al 60%.

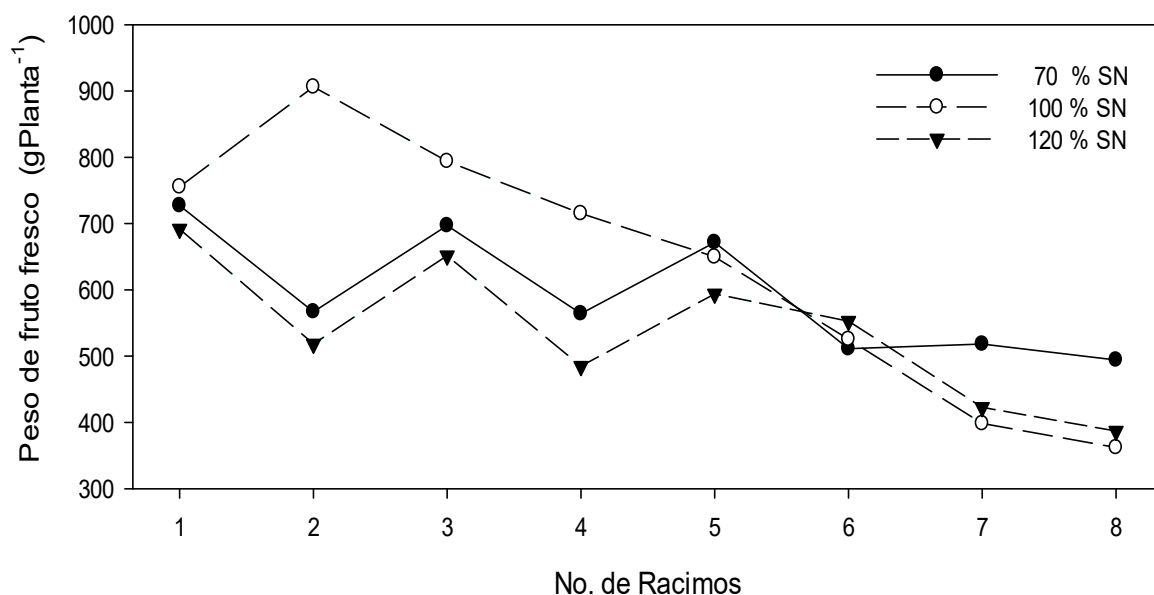


Figura 2. Rendimiento de fruto en ocho racimos en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) subirrigadas con tres diferentes concentraciones de solución nutritiva (SN).

Las plantas subirrigadas con la SN al 100% exhibieron mayor producción de biomasa ya que resultaron con mayor peso seco de tallo respecto a plantas subirrigadas con SN al 70% (Cuadro 1). El peso seco de hojas, fruto y total fueron similares en todas las concentraciones para el sistema de subirrigación (Cuadro 1). Estos resultados contrastan con otros reportes que señalan que al aumentar la concentración de la SN la producción de biomasa aérea y de la raíz se incrementa linealmente (García-Santiago et al., 2019); lo anterior puede deberse a las concentraciones evaluadas ya que en el estudio de García-Santiago et al. (2019) se probaron SN desde un 60% hasta un 100% de concentración, mientras que en el presente trabajo se evaluaron desde 70% hasta 120%. Rouphael y Colla



(2009) reportan resultados similares ya que el peso seco de plantas de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) bajo subirrigación disminuyó cuando la concentración de la SN se reduce a un 50%, lo que los autores atribuyen a que la demanda de nutrientes por parte de las plantas no se cumplió debido a la baja concentración de la SN. En concordancia con este argumento, los resultados del presente estudio pueden interpretarse en el sentido de que la producción de biomasa fue similar debido a que las concentraciones de las SN fueron suficientes para abastecer la demanda nutrimental de las plantas de tomate. Las respuestas contrastantes a la subirrigación pueden deberse a la tolerancia de cada especie a la CE alta en los sistemas de subirrigación y las demandas específicas de nutrientes (Kang y van Iersel, 2002).

Cuadro 1. Peso seco de órganos de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) subirrigadas con solución nutritiva de diferente concentración.

<b>Concentración de la Solución Nutritiva</b>	<b>Tallo</b>	<b>Hoja</b>	<b>Fruto</b>	<b>Total</b>
70%	52.55 b*	54.4 a	134.3 a	241.5 a
100%	60.06 a	50.7 a	189.3 a	300.0 a
120%	58.90 ab	51.3 a	174.5 a	284.3 a

\* Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey con  $p < 0.05$ .

Al finalizar el estudio, la CE del sustrato fue más alta cuando las plantas se subirrigaron con la SN al 120% respecto a las concentraciones de 100% y 70% (Cuadro 2). Sin embargo, la CE fue incrementado paulatinamente conforme se aplicaban los riegos (Figura 3). Al finalizar el estudio, el sustrato de plantas subirrigadas con SN al 100% mostró un ligero incremento. En el caso del sustrato de plantas subirrigadas con SN al 120%, este mostró un incremento durante todo el estudio. La reducción en los rendimientos se ha atribuido a la mayor CE registrada en la capa superior del sustrato debido a la acumulación de sales durante el ciclo de cultivo (Bouchaaba et al., 2015; Cox, 2001; Roupael y Colla, 2005); sin embargo, esto no necesariamente afecta el crecimiento de las plantas pues el desarrollo de las raíces se produce principalmente en la capa inferior, por lo que no están expuestas a la alta CE (Morvant et al., 1997).

Cuadro 2. Efecto del la concnetración de la solucion nutritiva en el pH y conductividad eléctrica del sustrato determinados por el método de 2:1 al finalizar el estudio en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) subirrigadas con solución nutritiva de diferente concentración.

<b>Concentración de la Solución Nutritiva</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad eléctrica dS m<sup>-1</sup></b>
70 %	6.55 a	1.20 c
100 %	6.25 bc	1.59 b
120 %	6.05 c*	1.94 a

\* Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey con  $p < 0.05$ .

En la Figura 3 se muestra la CE del sustrato durante todo el experimento, en el día en el que se realizó el riego se observa como un pico debido a que se alcanza la máxima CE en el sustrato. En la Figura 4 se muestran solo las CE más altas detectadas en el sustrato y los racimos cosechados en los riegos respectivos. En el rendimiento de fruto del primer racimo no hubo efectos de la concentración de la SN (Figura 2), sin embargo, en el segundo, tercer y cuarto racimos, el mayor rendimiento se obtuvo por plantas subirrigadas con la SN al 100% (Figura 2), lo cual estuvo asociado a una CE cercana a los  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 4); una CE de  $0.1$  o  $1.75 \text{ dS m}^{-1}$ , como la observada cuando la SN tenía un 70% o 120% de concentración (Figura 4), respectivamente, resultaron en bajos rendimientos en estos racimos (Figura 2). En los racimos quinto y sexto no se detectó un efecto marcado de la concentración de la SN (Figura 2); lo cual se debió a que a partir de tales racimos la CE del sustrato comienza a elevarse por encima de  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$ , llegando a ser hasta de  $1.2 \text{ dS m}^{-1}$  en el riego 32 (Figura 4). En los riegos efectuados durante la cosecha del séptimo y octavo racimos, la CE del sustrato en plantas irrigadas con la SN al 100% llegó a ser de hasta  $1.4 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 4) lo cual se reflejó en bajos rendimientos (Figura 2); sin embargo, el sustrato en las plantas subirrigadas con la solución al 70% la CE subió hasta  $0.55 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 4) lo cual se asoció con los rendimientos más altos obtenidos en tales racimos (Figura 2). En plantas subirrigadas con la SN al 120% nunca se obtuvieron los racimos con mayor rendimiento debido a que la CE del sustrato alcanzó hasta  $2.83 \text{ dS m}^{-1}$  (Figuras 2, 4). Estos resultados permiten concluir que los máximos rendimientos de tomate se obtienen cuando el riego se aplica por subirrigación y la CE del sustrato es de  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  aproximadamente, y para ello hay que aplicar SN con la composición señalada en este estudio al 100% de la concentración en las fases iniciales de la cosecha, mientras que en las fases finales la SN debe ser aplicada al 70% para mantener esa CE.

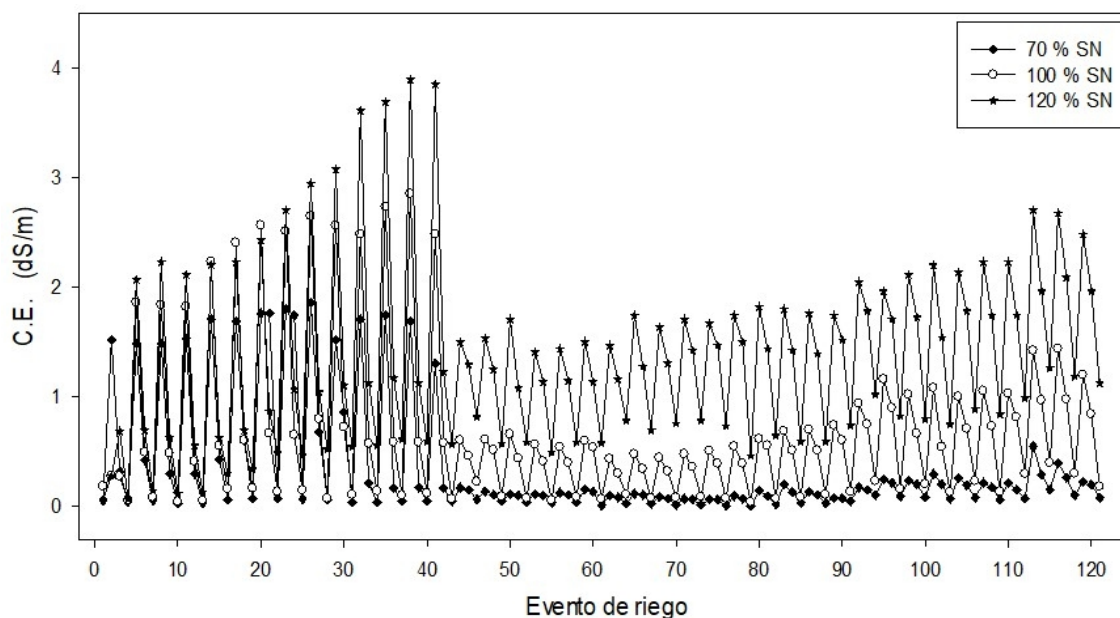


Figura 3.- Efecto de la concentración de la solución nutritiva sobre la conductividad eléctrica (CE) del sustrato medida diariamente con sensores conectados a un Datalogger de la serie Em50 parte de un sistema de ECH<sub>2</sub>O (Software: ECH<sub>2</sub>O Utility) durante el estudio en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en el sistema de subirrigación.

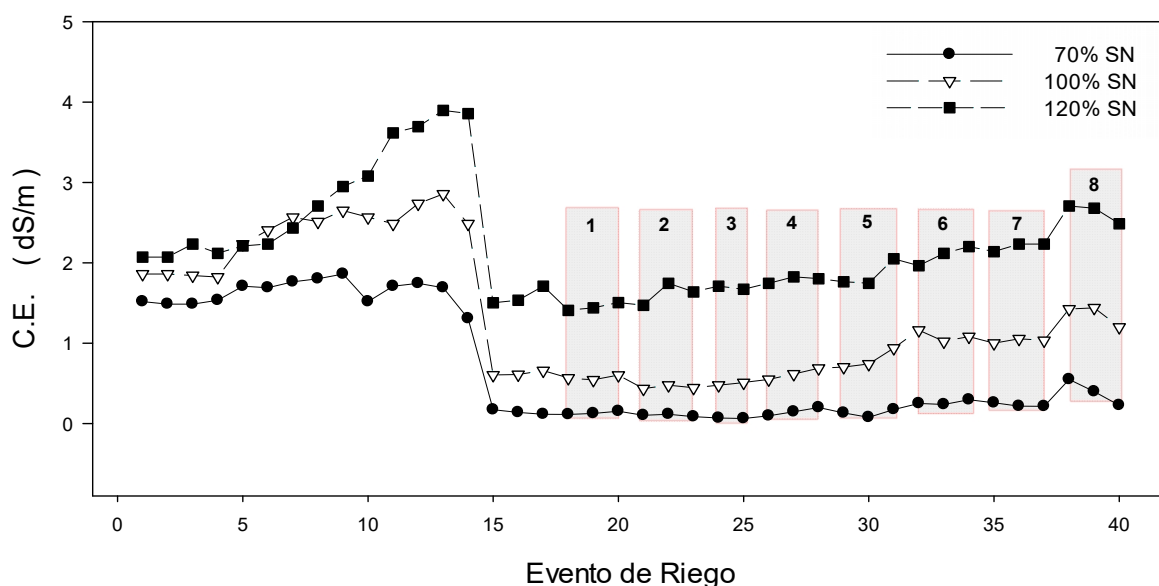


Figura 4.- Efecto de la concentración de la solución nutritiva sobre la conductividad eléctrica del sustrato (alcance máximo de C.E. en sustrato) medida con sensores conectados a un Datalogger de la serie Em50, en cada riego en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) En el sistema de subirrigación. Los recuadros indican la CE cuando se cosecharon los racimos uno al ocho.

La reducción del rendimiento de fruto con soluciones de alta concentración puede deberse a la acumulación de sales en el medio de cultivo, principalmente en la capa superior (Cox, 2001; Nemali y van Iersel, 2004; Roupael et al., 2006; van Iersel, 2000). Se ha reportado que la parte más alta del sustrato puede alcanzar una CE de hasta  $19.5 \text{ dS m}^{-1}$  cuando las plantas se subirrigaron con una SN de alta concentración (García-Santiago et al., 2019), sin embargo, también se ha señalado que la mayor concentración de sales en la capa superior del sustrato no afecta el crecimiento de las plantas ya que las raíces tienden a desarrollarse en la capa inferior del cepellón (Cox, 2001; Montesano et al., 2010; Nemali y van Iersel, 2004; Santamaria et al., 2003).

En la Figura 5 se muestra la relación entre la CE del sustrato y el rendimiento por racimos en función de la concentración de la SN. En general, el mayor rendimiento de fruto se obtuvo con las CE más bajas en cada una de las tres SN, sin embargo, para las SN al 70% y 120% esos altos rendimientos ocurrieron solo durante el primer racimo; en contraste, para la SN al 100%, es evidente que los mayores rendimientos se obtienen cuando la CE del sustrato es cercana a  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 5).

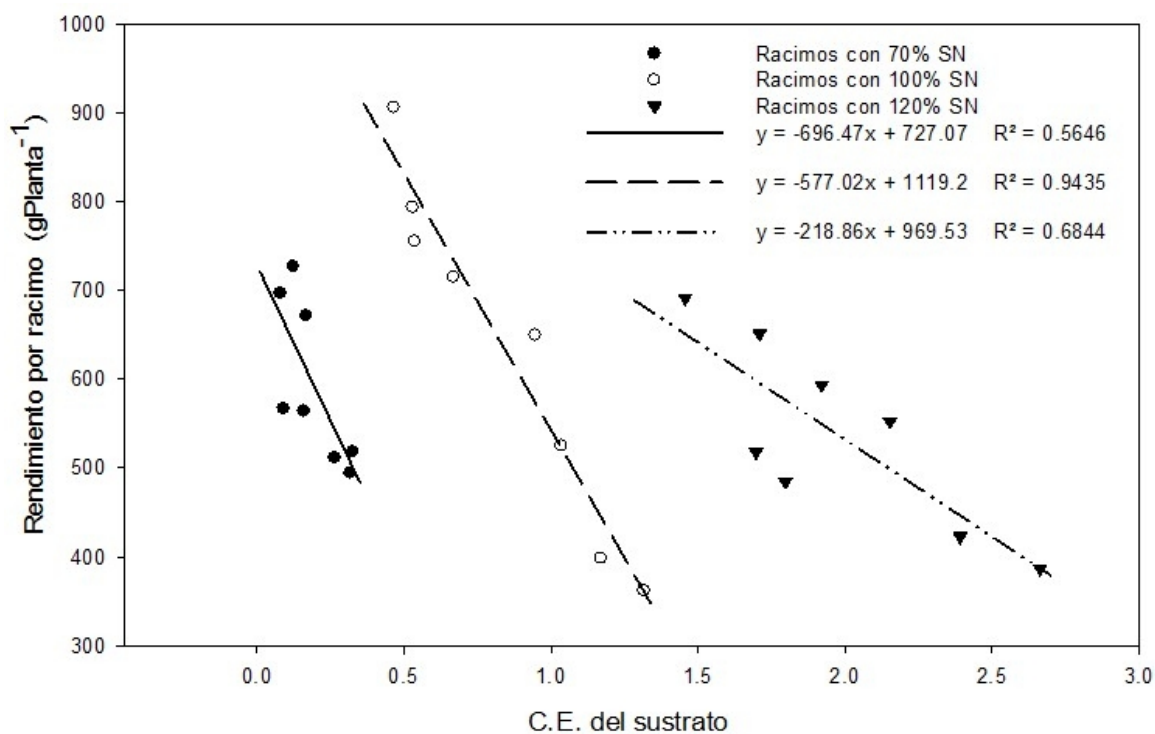


Figura 5.- Relación entre la conductividad eléctrica (CE) del sustrato y el rendimiento por racimo en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) subirrigadas con soluciones nutritivas de tres concentraciones. La conductividad eléctrica se calculó como el promedio obtenido durante los riegos efectuados durante el tiempo en que se realizó la cosecha del racimo respectivo señalados en la Figura 4.

## Conclusiones

La subirrigación con soluciones nutritivas al 100% demostró ser el mejor tratamiento ya que mantiene un alto rendimiento a inicios del ciclo de cultivo en el segundo, tercer y cuarto racimos, sin embargo, en los racimos sétimo y octavo la concentración de la solución nutritiva debe disminuirse a un 70% para mantener los altos rendimientos de fruto. Lo anterior estuvo asociado con un incremento paulatino en la conductividad eléctrica del sustrato, misma que debe mantenerse el 0.5 dS m<sup>-1</sup> para lograr la mayor producción de fruto.

## Literatura citada

- Bouchaaba Z, Santamaria P, Choukr-Allah R, Lamaddalena N, Montesano FF. 2015. Open-cycle drip vs closed-cycle subirrigation: Effects on growth and yield of greenhouse soilless green bean. *Scientia Horticulturae* 182: 77–85. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.11.007
- Cox DA. 2001. Growth, nutrient content, and growth medium electrical conductivity of poinsettia irrigated by subirrigation or from overhead. USA. *Journal of Plant Nutrition* 24: 523–533. DOI: 10.1081/PLN-100104977.
- El Youssfi L, Choukr-Allah R, Santamaria P, Montesano FF. 2010. Soilless closed cycle production of green bean (*Phaseolus vulgaris*) using subirrigation: Effects on yield, fruit quality, substrate and nutrient solution parameters. *Acta Horticulturae* 938: 383-390.
- Elia A, Santamaria P, Parente A, Serio, F. 2002. Some aspects of the trough bench system and its performance in cherry tomato production. In VI International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climate: Product and Process Innovation 614: 161-166.
- García-Santiago JC, Valdez-Aguilar LA, Cartmill DL, Cartmill AD, Juárez-López P, Alvarado-Camarillo D. 2019. Subirrigation of container grown tomato II: Physical and chemical properties of the growing medium. *Water* 11: 1-13. DOI: 10.3390/w11112211.
- Giuffrida F, Leonardi C. 2012. Concentración de solución nutritiva en pimiento cultivado en un sistema cerrado sin suelo: rendimiento, calidad del fruto, eficiencia hídrica y nutritiva. *Acta Agriculturae Scandinavica, Sección B-Ciencia del suelo y las plantas* 62: 1-6.
- Incrocci L, Malorgio F, Della BA, Pardossi A. 2006. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water. Italy. *Scientia Horticulturae* 107: 365-372.
- Kang JG, van Iersel MW. 2002. Nutrient solution concentration affects growth on subirrigated bedding plant. *Journal of Plant Nutrition* 25: 387–403.

- Mak AT, Yeh DM. 2001. Nitrogen nutrition of *Spathiphyllum* 'Sensation' grown in sphagnum peat-and coir-based media with two irrigation methods. *HortScience* 36: 645-649.
- Méndez-Cifuentes A, Valdez-Aguilar LA, Cadena-Zapata M, González-Fuentes JA, Hernández-Maruri JA, Alvarado-Camarillo D. 2020. Water and Fertilizer Use Efficiency in Subirrigated Containerized Tomato. *Water* 12: 1313. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12051313>.
- Mendiburo FD. 2017. *Agricolae*: Statistical providers for Agricultural Research. R Package Agriculture Package version 1.2.8. Available on line: <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html> Access: August 2017.
- Mojid MA, Biswas SK, Wyseure GCL. 2012. Interaction effects of irrigation by municipal wastewater and inorganic fertilisers on wheat cultivation in Bangladesh. *Field Crops Research* 134: 200-207.
- Montesano F, Parente A, Santamaria P. 2010. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions. *Scientia Horticulturae* 124: 338–344.
- Morvant JK, Dole JM, Allen E. 1997. Irrigation systems alter distribution of roots, soluble salts, nitrogen, and pH in the root medium. *HortTechnology* 7: 156–160. DOI: 10.21273/HORTTECH.7.2.156.
- Nemali KS, van Iersel MW. 2004. Light intensity and fertilizer concentration. II. Optimal fertilizer solution concentration for species differing in light requirement and growth rate. *HortScience* 39: 1293–1297.
- Rouphael Y, Cardarelli M, Rea E, Battistelli A, Colla G. 2006. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and nonsaline nutrient solutions. *Agricultural Water Management* 82: 99-117.
- Rouphael Y, Colla G. 2005. Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Scientia Horticulturae* 105: 177–195. DOI: 10.1016/j.scienta.2005.01.025
- Rouphael Y, Colla G. 2009. The influence of drip irrigation or subirrigation on zucchini squash grown in closed-loop substrate culture with high and low nutrient solution concentrations. *HortScience* 44: 306–311.
- Santamaria P, Campanile G, Parente A, Elia A. 2003. Subirrigation vs. drip-irrigation: effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78: 290–296. DOI: 10.1080/14620316.2003.11511620.
- Silberbush M, Ben-Asher J. 2001. Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless cultures as affected by salinity buildup and transpiration. *Plant and Soil* 233: 59-69.
- Uva, W, Weiler T, Milligan R. 2001. Economic analysis of adopting zero runoff subirrigation systems in greenhouse operations in the northeast and north central United States. *HortScience* 36: 167–173.

van Iersel MW. 2000. Post-production leaching affects the growing medium and respiration of subirrigated poinsettias. *HortScience* 35: 250–253.

Yeh DM, Hsu PH, Atherton JG. 2004. Growth and flowering response of *Canna × generalis* to nitrogen supplied to the growing medium via top- or sub- irrigation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79: 511-514.

## CONCLUSIÓN GENERAL

El agua es uno de los recursos más importantes. Se utiliza para el consumo doméstico e industrial, así como para la producción agrícola. Sin embargo, debido a la producción intensiva, la industria de los invernaderos aplica más agua y fertilizantes por superficie en comparación con cualquier otro sistema agrícola, contribuyendo en gran medida al agotamiento y contaminación de los mantos acuíferos. Por lo tanto, es importante reducir las cantidades de agua y fertilizantes utilizadas para la producción de cultivos en invernadero debido a la disponibilidad y la contaminación. La estrategia que se recomienda para minimizar la pérdida y maximizar el uso eficiente de agua y nutrientes para el cultivo sin suelo de especies vegetales es adoptar los sistemas de cero lixiviación, que reutilicen el agua de riego mediante sistemas de circuito cerrado, cómo lo es la Subirrigación, ya que ofrece evidencias prometedoras para reducir la pérdida de agua y nutrientes, permitiendo una producción más eficiente y amigable con el medio ambiente.