

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



RESPUESTA FISIOLÓGICA, PRODUCTIVA Y CALIDAD DEL CULTIVO DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO INVERNADERO EN UN SISTEMA
HIDROPÓNICO TIPO CARRETE

Tesis

Que presenta CARMEN ALICIA AYALA CONTRERAS

como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2022

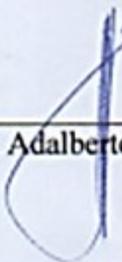
RESPUESTA FISIOLÓGICA, PRODUCTIVA Y CALIDAD DEL CULTIVO DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO INVERNADERO EN UN SISTEMA
HIDROPÓNICO TIPO CARRETE

Tesis

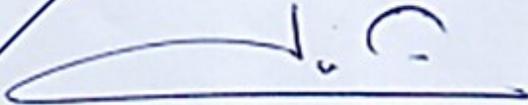
Elaborada por CARMEN ALICIA AYALA CONTRERAS como requisito parcial para
obtener el Grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Protegida con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



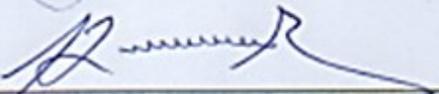
Dr. José Antonio González Fuentes
Asesor Principal



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor



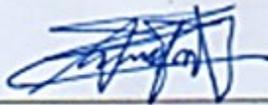
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Asesor



Dr. Alejandro Zermeño-González
Asesor



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2022

Agradecimientos

A Dios, por darme la oportunidad de realizar este posgrado, a mi familia y en especial a mi esposo, por creer en mí y apoyarme siempre.

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada que permitió realizar los estudios de doctorado, su apoyo es fundamental para los estudiantes de posgrado. A este bello país que me ha permitido vivir y formar una familia, gracias por hacerme sentir como una mexicana más.

A mi asesor principal, Dr. José Antonio Gonzales Fuentes por permitirme ser parte de esta investigación, que es el principio de la generación de una nueva tecnología. A los asesores que conforman mi comité, integrado por: el Dr. Alejandro Zermeño Gonzales, a quien agradezco su apoyo en el análisis e interpretación de la información obtenida; Dr. Adalberto Benavides Mendoza, por su apoyo para poder llevar a cabo los análisis de laboratorio requeridos en este estudio; Dr. Antonio Juárez Maldonado y Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por sus recomendación y contribuciones.

A los profesores del posgrado en agricultura protegida que fueron parte fundamental en mi aprendizaje durante esta etapa. A las T.A María Leticia de León Venegas y Mariela Villela Orejón, al igual que el Dr. Oscar Sariñana Aldaco por su apoyo al presente proyecto.

Carta de aceptación de los Artículos

Artículo publicado:



Carmen Alicia Ayala <cayala710@gmail.com>

Fwd: Aceptado manuscrito 3361

3 messages

Jose Antonio Gonzalez Fuentes <jagf252001@gmail.com>
To: Carmen Alicia Ayala <cayala710@gmail.com>

Mon, Aug 8, 2022 at 6:00 PM

----- Forwarded message -----

From: **EFRAIN DE LA CRUZ LAZARO** <efrain.delacruz@ujat.mx>
Date: Mon, Aug 8, 2022 at 6:45 PM
Subject: Aceptado manuscrito 3361
To: jagf252001@gmail.com <jagf252001@gmail.com>

Dr. Jose Antonio Gonzalez Fuentes

Le comunico que su manuscrito fue aceptado para publicarse en el número en curso 9(2) de la revista. Para que se envíe al proceso de diagramado es necesario que se atiendan las correcciones editoriales y de estilo que se incluyen en el manuscrito adjunto. Además es necesario que proporcione los identificadores ORCID de todos los autores.

En espera de la versión final a la brevedad, me despido con saludos.

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro
Profesor Investigador
División Académica de Ciencias Agropecuarias
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

—
JAGF

 **3361 Revisiõin editorial.docx**
1701K

Artículo enviado:



Carmen Alicia Ayala <cayala710@gmail.com>

Fwd: [terra] Acuse de recibo de envío

2 messages

Jose Antonio Gonzalez Fuentes <jagf252001@gmail.com>
To: Carmen Alicia Ayala <cayala710@gmail.com>

Fri, Nov 4, 2022 at 2:52 PM

----- Forwarded message -----

From: <revista@terralatinoamericana.org.mx>
Date: Thu, Nov 3, 2022 at 5:48 PM
Subject: [terra] Acuse de recibo de envío
To: Jose Antonio Gonzalez <jagf252001@gmail.com>

Jose Antonio Gonzalez:

Gracias por enviar el manuscrito "Efecto de un sistema hidropónico tipo carrete en calidad y productividad de tomate" a REVISTA TERRA LATINOAMERICANA. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/authorDashboard/submission/1669>
Nombre de usuario/a: jagf

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dr. Bernardo Murillo Amador

JOURNAL TERRA LATINOAMERICANA <http://www.terralatinoamericana.org.mx/>

--
JAGF

INTRODUCCIÓN

La producción de tomate representa un rubro de mucha importancia en México y el mundo, es la principal hortaliza producida en sistemas protegidos y continuamente se realizan mejoras en el manejo y uso de tecnologías. La búsqueda y desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas enfocados en la producción es de vital importancia para enfrentar la necesidad que supone la agricultura actual. En ambientes protegidos, el invernadero es utilizado por sus múltiples ventajas y es en estos sistemas donde mayormente se emplean variedades de crecimiento indeterminado, con tallos mayores a 8 m, en etapas avanzadas del cultivo, lo que complica el manejo y reduce la productividad. Para la producción en invernadero, también se emplean sistemas hidropónico, los cuales tiene muchas variantes; el sistema NFT (Nutrient Film Technique) es uno de ellos, el cual es totalmente en agua y permite el suministro de fertilizantes de forma uniforme, haciendo un uso más eficiente del agua, así como de los nutrientes suministrados.

En este experimento se plantea una innovación al sistema NFT ya existente, utilizando un carrete (cilindro) de plástico como sostén para la planta y permitiendo la circulación de la solución por toda el área central, así mismo, la forma cilíndrica del carrete permitirá enrollar los tallos y cortarlos conforme avance el ciclo del cultivo, con la finalidad de mantener tallos con raíces adventicias para la absorción de nutrientes y tallos aéreos productivos con frutos de tomate.

El objetivo en este trabajo de investigación consistió en evaluar la respuesta del cultivo de tomate establecido en un sistema NFT modificado tipo carrete sobre la fisiología, la productividad de las plantas y la calidad de los frutos. La hipótesis planteada fue que con tallos productivos cortos (< 2 m) y plantas con sistema radicular adventicio se mantendrá un potencial hídrico alto, lo que incrementará el tiempo de ciclo productivo y permitirá un aumento en la producción total.

CONTENIDO

REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1. La agricultura protegida y su importancia global.....	4
2. La producción en invernadero.	5
2.1. Cultivo sin suelo: sustrato líquido.....	5
2.2. Cultivo sin suelo: sustrato líquido.....	5
2.2.1. Nutrient Film Technique (NFT)	6
2.2.2. New Growing System (NGS)	7
2.3. Aspectos importantes en la producción sin suelo	8
3. Producción de tomate en invernadero	9
4. Crecimiento de tomate.....	10
4.1. Sistema radicular	11
4.2. La fotosíntesis y su importancia en el desarrollo de la planta.....	12
4.2.1. Relación entre transpiración y fotosíntesis	12
5. El agua y nutrientes en la planta	14
5.1. Absorción por la raíz	14
5.2. Transporte a través del tallo	15
5.2.1. La transpiración en las hojas	15
5.2.2. Uso de agua: eficiencia intrínseca y cuántica.....	17
ARTICULOS.....	18
I. Respuesta fisiológica y productiva de tomate en un sistema NTF modificado tipo carrete.....	19

II.	Efecto de un sistema hidropónico tipo carrete en calidad y productividad de tomate.....	35
	CONCLUSIONES GENERALES.....	53
	REFERENCIAS.....	54

REVISIÓN DE LITERATURA

1. La agricultura protegida y su importancia global.

La cantidad de habitantes en el mundo crece cada vez más, se estima que para el año 2050 abra más de 9700 millones de personas en el planeta, dos millones más en poco más de 30 años lo que conlleva a múltiples desafíos, entre ellos la generación de sistemas innovadores de producción de alimentos (Chen *et al.*, 2016). La agricultura moderna debe enfrentar este reto, enfocándose en el aumento del rendimiento de los cultivos procurando minimizar los efectos negativos en la sostenibilidad ambiental y en la calidad para consumo; la producción mundial de alimentos puede mejorarse utilizando técnicas avanzadas de manejo de cultivos como la agricultura protegida (Cocetta *et al.*, 2017)

La agricultura protegida puede definirse como un conjunto de técnicas para la producción, el cual permite mantener controlado de forma parcial o total el microclima cercano a la planta, dependiendo lo que el cultivo necesita; concierne a todas las tecnologías empleadas para la protección del cultivo de condiciones climáticas o biológicas adversas, permitiendo mejorar la productividad (Pratt *et al.*, 2019). Puntualmente puede indicarse que en la agricultura protegida se emplea estructuras con cubiertas (transparentes o semitransparentes), que permiten controlar las condiciones de microclima dentro de la estructura (Santos *et al.*, 2010).

Dada su importancia, los principales cultivos que se producen en estos sistemas son las hortalizas, frutillas y ornamentales, China es el principal país utilizando estructuras protegidas para la producción de hortalizas, seguido por España, Japón e Italia, México ocupara el catorceavo lugar a nivel mundial (García-Sánchez *et al.*, 2018).

El uso de este tipo de tecnología implica inversiones grandes y difiere según el tipo de estructura, es empleada por productores u organizaciones empresariales orientados a la exportación; por lo tanto, la principal ventaja de uso de estos sistemas es el retorno económico para el productor, con un uso eficiente del espacio, tiempo (Boulard *et al.*, 2011).

Dentro de la agricultura protegida se encuentra los invernaderos, en México, estos generalmente se dividen según su nivel de tecnificación pudiendo ser alta, mediana, baja

y casas sombra; estas son utilizadas en la producción de cultivos de valor comercial alto (Pratt *et al.*, 2019), la producción se concentra en el cultivo de tomate con el 70%, de pimientos con un 16%, pepinos en 10% y de bayas con menos del 2%; estos sistemas de producción se encuentran en nueve de los 31 estados del país, los principales estados productores son Sinaloa, Jalisco y ambos estados de Baja California; existen 44,856 has bajo agricultura protegida, de las cuales 11, 787 has son de invernadero, 20,447 has de casa sombra y 12,622 has de macrotúnel (AMHPAC, 2020).

2. La producción en invernadero.

La implementación de cultivos bajo condiciones protegidas a incremento la productividad, su rentabilidad y calidad general de los productos (Rodríguez *et al.*, 2018). Actualmente se cultiva en múltiples ambientes modificados, entre ellos están los invernaderos donde puede cultivarse en sistemas hidropónicos, sustratos o suelo, estos pueden tener o no ambiente controlado; los invernaderos de alta tecnología en México, son adaptados de tecnología europea, la diferencia primordial se da en consumo energético, ya que en nuestro país no es necesario emplear calefacción y en las zonas donde es necesario el uso de calefacción, el periodo de tiempo de uso es inferior comparado con otras zonas del mundo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014)

Las características deseables del invernadero deben incluir aspectos relacionados con una adecuada ventilación, altura y capacidad de carga (densidad de plantas), tipo de cobertura, orientación geográfica, necesidades climáticas del cultivo (temperatura, luz, humedad relativa), todas estas características se deben considerar al momento de establecer un cultivo en un sistema en invernadero, para asegurar el adecuado rendimiento y calidad del producto (Moreno *et al.*, 2011)

La producción sin suelo en invernadero ha incrementado debido a que la irrigación y nutrición puede ser controlada más eficientemente; el cultivo sin suelo es un sistema donde las raíces de la planta se desarrollan en un medio diferente al suelo, en esta técnica y otras, el sistema radicular se coloca en un espacio delimitado y aislado, lo cual facilita y mejora la asimilación de los nutrientes y agua permitiendo mejorar el desempeño del cultivo en cuanto a su productividad y calidad (Zarza *et al.*, 2018).

En los sistemas de cultivo sin suelo, el riego debe ser suficiente para mantener altas tasas de evapotranspiración y un suministro adecuado de nutrientes, al tiempo que garantizar niveles adecuados de oxígeno en el sistema de raíces (Rodríguez-Ortega *et al.*, 2019). Dependiendo del lugar donde se desarrollen las raíces de las plantas es como se puede clasificar la producción sin suelo, pudiendo ser en sustrato sólido o medio líquido (Castillo *et al.*, 2014).

2.1. Cultivo sin suelo: sustrato sólido.

El sustrato puede ser cualquier material distinto al suelo, el cual debe ser texturizado para que funciones como soporte de la planta a nivel radicular (Ortega *et al.*, 2016). La diferencia entre los medios sólidos y líquidos es la mayor capacidad de aeración que tienen los sustratos aunque tienen la desventaja de poca retención de agua, por lo que la aplicación de riego debe realizarse de manera correcta y muy eficiente para mantener una adecuada relación aire-agua (Flores *et al.*, 2016).

Los sustratos inorgánicos son los que se usan mayormente para la producción, dentro de los cuales podemos encontrar arena, perlita, vermiculita, lana de roca entre otros productos de origen mineral, así mismo podemos encontrar sustratos orgánicos como fibra de coco, peat moss, aserrín, cascarilla de arroz y otros muchos más considerados inertes; también se usan sustratos sintéticos como espuma de poliestireno y espuma de poliuretano (Martínez *et al.*, 2017); el peat moss o turba es ampliamente utilizado en la producción hortícola (Pardossi *et al.*, 2011).

Las ventajas que provee el uso de sustratos es que se encuentran totalmente desinfectados, facilitan el manejo del cultivo, se usa en cultivos de mediana y gran escala, ofrece un buen drenaje, ahorra fertilizantes y es fácil de esterilizar para su reuso, el sistema de riego se puede automatizar con facilidad; dentro de sus desventajas está el costo que implica su adquisición, puede sufrir cambio de temperatura, las plantas son más sensibles a cambios en pH, nutrientes y temperatura de la SN (Albuja *et al.*, 2021).

2.2. Cultivo sin suelo: sustrato líquido.

Dentro de los sustratos líquidos se comprenden todas las técnicas de producción donde se utiliza únicamente agua como medio de desarrollo de las raíces, en estos sistemas, para

nutrir la planta, se emplea una solución que contiene todos los elementos para su desarrollo (solución nutritiva (SN)) (Rosa *et al.*, 2016); estos se conocen comúnmente como sistemas 100% hidropónicos, en invernadero son ideales ya que efficientizan el agua empleada en el sistema disminuyendo la filtración y evaporación; así mismo, el sistema radicular se ve reducido, ya que el espacio donde se desarrolla es menor y los nutrientes de fácil acceso (López *et al.*, 2011).

En hidroponía los sistemas pueden ser abiertos, en el cual el excedente de SN que circula por las raíces del cultivo, es drenada y desechada; por el contrario en sistemas cerrados la SN es captada y reusada una y otra vez; los sistemas en medio líquido que se conocen actualmente son: sistemas flotantes que incorporan láminas perforadas de poliestireno, Nutrient Film Technique y New Growing System (Rodríguez *et al.*, 2018).

2.2.1. Nutrient Film Technique (NFT).

Una alternativa para la producción en sistemas hidropónicos 100% en agua, sin la intervención de ningún sustrato, es la técnica de lámina fina o NFT (Figura 1), esta técnica consiste en el movimiento de una lámina fina de agua y nutrientes de forma continua por los canales que funcionan como contenedor de las raíces (Resh, 2013). La ventaja que este sistema ofrece es la uniformidad del desarrollo del sistema radicular en los contenedores, (Puerta *et al.* 2007), así mismo se aprovecha de mejor manera el agua y nutrientes, lo cual se refleja en mejores rendimientos, calidad sanitaria y nutricional (Gruda, 2009).

Una de las consideraciones importantes en estos sistemas es el costo de inversión inicial, además de que debe existir un manejo muy bien controlado de la SN para mantener la concentración de nutrientes necesarios para la planta, así mismo se debe contar con personal capacitado para el manejo de estos sistemas (Hayat *et al.*, 2008).

Este sistema se usa con frecuencia en cultivos como la fresa o la lechuga, pero recientemente este sistema ha optimizado su gestión para producir tomates con un ahorro de agua, obteniendo una tecnología moderna y competitiva (Rodríguez-Ortega *et al.*, 2019).

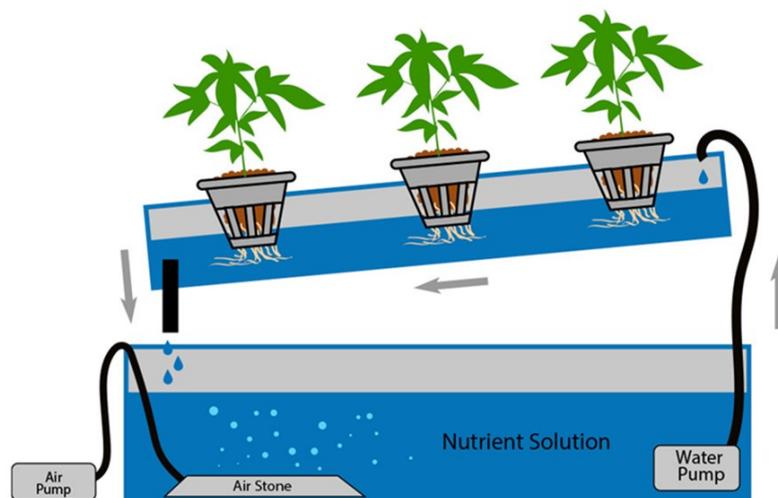


Figura 1. Diagrama de funcionamiento del sistema NFT. Modificado de (Castillo-Castellanos et al., 2016)

2.2.2. New Growing System (NGS).

New Growing System (NGS) es un sistema de recirculación que se diseñó para el cultivo a campo abierto, inicialmente como un sistema fijo para cultivos de lechuga en zonas áridas y semiáridas, con el objetivo de racionalizar el uso del agua, posteriormente, el sistema se desarrolló para su uso bajo techo en un sistema automatizado con una alta densidad de plantas, permitiendo el control de insumo, agua, fertilizantes, productos químicos, mano de obra, así como la reutilización de drenajes y la reducción de desperdicios, donde los cultivos se desarrollan en un ambiente óptimo, con el agua, el oxígeno y los nutrientes necesarios (Nicola *et al.*, 2021).

En el NGS, las raíces crecen homogéneamente en un sistema multinivel, compuesto por una película multicanal para favorecer el flujo de SN, así como el crecimiento y extensión radicular, en el cultivo de tomate (Figura 2b) consta de tres canales interconectadas, los canales internos tienen cortes laterales diseñados para conducir la SN a la capa inferior, cuando la masa de raíces está obstruyendo el canal crean pequeñas cascadas favoreciendo la oxigenación y evitando así un efecto tapón en la SN. (Varanda, 2018).

La SN desemboca en el canal en líneas de goteo llegando hasta el final de la línea por presión y gravedad de la canaleta multicanal interior, con una pendiente uniforme del 2%; la estructura de los canales internos mejora la oxigenación incluso cuando los canales son

largos, después de regar y alimentar el sistema de enraizamiento, toda la SN drenada se recolecta en un tanque o cisterna de drenaje; este método logra varios ciclos de cultivo por año, permitiendo obtener productos de calidad y limpios, listos para el consumo en fresco (Urrestarazu *et al.*, 2005).

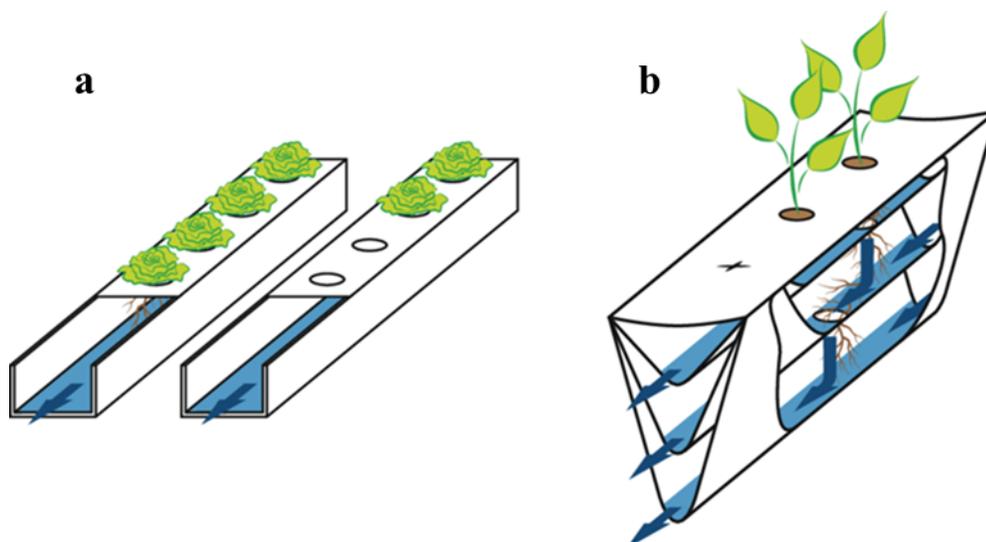


Figura 2. Diagrama comparativo entre la técnica NFT y NGS.

2.3. Aspectos importantes en la producción sin suelo.

El nivel de alcalinidad y acidez se mide por el pH de las sustancias, el rango adecuado en la SN se encuentra entre 5.8 y 7, dentro del cual la mayoría de elementos se encuentran disponibles y se realiza la absorción de los nutrientes sin mayor dificultad; en tomate los niveles de pH van desde 5.5 a 6.5; por otro lado se debe considerar que en la SN el pH puede variar ya que depende de factores ambientales como el CO₂ en contacto con la SN (Juárez *et al.*, 2006). Por lo tanto es indispensable en el control del pH para evitar los nutrientes se precipiten formando sales insolubles que pueden obstruir el sistema de riego por goteo (Luna-Fletes *et al.*, 2018).

La medida de conductividad eléctrica (CE) indica la cantidad total contenidas de nutrientes solubles en agua, se mide la totalidad de sales mas no de cada elemento, los niveles de CE en las plantas de tomate varía según la etapa fenológica: 0,5 dS m⁻¹ para la fase inicial-trasplante, 1,0 - 1,5 dS m⁻¹ para la vegetativa, 1,5 - 2,0 dS m⁻¹ para la floración, 2,0 - 2,5 dS m⁻¹ para la reproductiva-fructificación, el promedio adecuado para el tomate es de valores menores a 2.5 dS m⁻¹; para ello es recomendable realizar un análisis

de agua que será destinado para la preparación de la SN, ya que una salinidad alta puede provocar toxicidad al cultivo (Urbina-Sánchez *et al.*, 2020; Olvera-Rodríguez, 2016).

La temperatura (° C) adecuada para el desarrollo radicular debe ser a temperatura ambiente (entre 20° y 25° C), es en este rango donde se absorben óptimamente los nutrientes; que haya oxígeno (O₂) en la solución es vital, principalmente en los sistemas hidropónicos 100% y en las etapas iniciales de la plántulas, ya que las raíces están completamente sumergidas en agua (Juárez *et al.*, 2006).

3. Producción de tomate en invernadero.

En México se tiene un registro de 7,314 hectáreas cultivadas con tomate en invernadero, y la producción total se estima en 1,350,018 ton, los principales estados productores son: Jalisco con 134,349 ton en una superficie de 1,097 has obteniendo un rendimiento de 12.57 kg m⁻², Querétaro con 131,041 ton en 254 has con rendimientos de 49.79 kg m⁻², y Puebla con 130,534 ton en 832 has y rendimientos de 15.68 kg m⁻² (AMHPAC, 2020).

El invernadero es una estructura sólida, construida con diversos materiales, de preferencia transparentes, con alturas mayores a dos metros y seis metros de ancho y el largo puede variar según lo establece el productor. El invernadero puede estar cubierto con diferentes materiales (láminas de policarbonato, plástico, vidrio, fibra) pueden contar con aberturas laterales para ventilación y mallas anti-insectos. Al conjunto de varios invernaderos (naves) se obtienen grandes superficies de producción, permitiendo que todas las labores y actividades puedan ser llevadas a cabo dentro (Santos *et al.*, 2010; Juárez *et al.*, 2011).

En la producción de tomate se requiere de medios y condiciones para llevarse a cabo, existen invernaderos que incorporan climatización automatizada para lograr mayor control del clima externo, programación automáticos de riego, inyección de CO₂ y la implementación de sistemas hidropónicos, y los invernaderos pasivos que son semiclimatizados, que utilizan tecnología simple, programando riego en suelo o sustrato; aun así, los factores principales que determinan el éxito del invernadero son las características y necesidades climáticas del cultivo (Ortega *et al.*, 2010).

4. Crecimiento de tomate.

El desarrollo una planta de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) está dado por el incremento en materia seca, tamaño, masa, forma o número de estructuras, todo esto relacionado con la interacción de genotipo-ambiente; procesos como fotosíntesis, síntesis de compuestos, respiración, transpiración y sobre todo división celular intervienen en el crecimiento de las partes de plantas (Ardila *et al.*, 2011).

La planta se desarrolla a un solo tallo, después de la emergencia y produce muchas hojas (5-10), los tallos siguen creciendo y las yemas axilares pueden producir ramas que se convierten en tallos, así mismo estas yemas siguen creciendo después de que se forma la inflorescencia terminal, dando lugar a las variedades de crecimiento indeterminado, este ciclo de crecimiento se repite una y otra vez (Juárez *et al.*, 2015). Los tallos de tomate de crecimiento indeterminado pueden llegar a medir más de 7 metros en ciclos de producción entre 8 y 12 meses (Barraza *et al.*, 2004).

Las hojas son bifaciales, significa que tiene dos superficies y es la epidermis que cubre el mesófilo, la epidermis superior se llama haz y está constituida por pelos glandulares, la epidermis inferior es el envés y contienen abundantes estomas que facilitan el intercambio gaseoso; la hoja se encuentra dispuesta en posición alterna sobre el tallo (Alemán *et al.*, 2019). La inflorescencia puede ser simple, bifurcada o ramificada, el número de las flores es variable y en el mismo racimo, las flores abren secuencialmente; la floración es compleja y se ve afectada por factores como temperatura, iluminación, competencia en la misma planta, nutrición entre otros (Fornaris, 2007).

El fruto de tomate es una baya clásica de dos o más lóculos, presenta colores que van de tonos amarillos hasta rojo gracias su contenido de pigmentos como carotoninas y licopina y carotina (en diferentes concentraciones), dependiendo de la variedad y tipo, puede tener forma de pera, redonda o achatada, su superficie lisa, siendo su tamaño muy variable, puede alcanzar pesos hasta 500 g dependiendo de la variedad; el fruto está formado por el pericarpio, mesocarpio, endocarpio carnoso, placenta y semillas, para su cosecha deben transcurrir hasta 2 meses y medios desde la antesis, el 95% del fruto es agua y resto 5% representan un conjunto de compuestos orgánicos (Barraza *et al.*, 2004).

4.2. Sistema radicular.

El sistema radicular de las plantas de tomate, está compuesto por células diferenciadas que favorecen al dinamismo en sus procesos; en la raíz el arreglo de las células permite la formación de las estructuras como la epidermis, córtex, endodermis, periciclo, procambium, xilema y floema (estos últimos haces vasculares) (Ron *et al.*, 2013). La raíz principal se forma en la embriogénesis y durante la germinación crece por gravitropismo, en el meristemo apical se da la elongación por la división celular (Azorín, 2017), el meristemo apical es el encargado del crecimiento (por células quiescentes), con estas células son las que permanecen indiferenciadas promoviendo continuamente la división celular y creciendo en el área del meristemo (Verstraeten *et al.*, 2014).

Dentro de las estructuras de la raíz principal, en el área de periciclo (polo xilemar) es donde se da la emergencia de las raíces adventicias (RA) (Casimiro *et al.*, 2003). Son las células de esa área de la raíz las que realizan la división celular donde aparece el primordio que dará lugar a la raíz lateral, en este proceso se dan múltiples divisiones hasta finalizar la formación del primordio (Benková y Bielach, 2010). Estas raíces postembrionarias pueden formarse en diversos órganos, incluidas las hojas, el cuello de la planta, los tallos en contacto con la superficie del suelo y en la base de los esquejes del tallo, también pueden formarse en respuesta a tensiones abióticas como el anegamiento o cuando las raíces embrionarias son disfuncionales (Birnbaum, 2016).

La formación de RA generalmente se divide en tres cambios de desarrollo: inducción, iniciación y extensión; durante la fase de inducción, las células iniciales del primordio se establecen a través de la diferenciación de las células del periciclo o células del cámbium (esto depende de la especie y la edad del corte del tallo) seguidas de la división celular; en la fase de iniciación, las células meristemáticas de los primordios se dividen y diferencian en capas de células radiculares: epidermis, corteza, endodermis, sistema vascular, meristemo y cofia de la raíz, finalmente, durante la fase de extensión, los primordios RA crecen a través de las capas de células del tallo y emergen de la epidermis (Guan *et al.*, 2019).

Hay dos vías de formación de AR: (1) organogénesis directa a partir de tipos de células establecidas, como el cambium primario e interfascicular adyacente a los tejidos vasculares en plantas intactas, y (2) desarrollo a partir de tejido callo recién formado

después de un daño mecánico, como se observa en algunos esquejes durante la propagación; en plantas herbáceas como *Arabidopsis*, el primordio de RA se inicia en el cámbium de hipocótilos, parecido a lo que sucede en la raíz principal con el periciclo, sin embargo, las RA también pueden surgir de hojas maduras o raíces viejas (Guan *et al.*, 2015).

Para alargarse, las raíces requieren un crecimiento espacialmente coordinado de los tipos de células y tejidos constituyentes para mantener la integridad del órgano y garantizar que conserve un tamaño y forma adecuados, de lo contrario, los tejidos radiculares individuales que crecen a diferentes velocidades tendrían que comenzar a deslizarse uno sobre el otro, esto se previene por la presencia de paredes que unen las células dentro y entre los tejidos radiculares; las seis fitohormonas que han demostrado estar envueltas en procesos de elongación son el etileno, auxina, giberelinas (GA), ácido abscísico (ABA), brasinoesteroides (BR) y citoquinina (CK) (Ubeda-Tomás *et al.*, 2012).

4.3. La fotosíntesis y su importancia en el desarrollo de la planta

El paso inicial para la obtención de productos procedentes de las plantas es la fotosíntesis, el cual se lleva a cabo en las hojas de las plantas, fijando CO₂ de la atmósfera, la energía del sol y el agua del suelo; la fotosíntesis es muy importante en el metabolismo primario debido a su aporte de energía química necesaria para todos los demás procesos a partir de energía lumínica del sol, la cual es finalmente usada en crecimiento y desarrollo; por lo tanto, una disminución en la intensidad de la luz afecta estos procesos, especialmente la inducción de flores, diferenciación, formación, tamaño, color y calidad de los frutos en crecimiento (Contreras, 2014).

La fotosíntesis es el proceso que mayor impacto tiene en formación de biomasa en las plantas, para lo cual importa mucho mejorar procesos para reducir el gasto de energía, la tasa de respiración y a su vez aumentar el uso efectivo de nutrientes, también se puede cambiar morfológicamente la planta en su arquitectura; el rendimiento y la calidad del tomate dependen de la fotosíntesis, ya que los carbohidratos, producto de la fijación del CO₂, queda disponible para su crecimiento vegetativo y para su producción, la fotosíntesis depende de factores ambientales, tales como la temperatura, la luz y el agua disponible (Ligarreto, 2013). En la fotosíntesis se sintetizan carbohidratos a partir de sustancias

inorgánicas en plantas (pigmentos) gracias al proceso de absorción de fotones e intercambio de electrones, en la cual se pueden distinguir dos fases: en primer lugar, la absorción y conversión de energía, y en segundo lugar, la adquisición y asimilación de las partículas orgánicas. A la primera fase se le denomina fase luminosa, fase fotoquímica o reacción de Hill y tiene lugar en el tilacoide produciendo NADPH₂ y ATP; y a la segunda se le denomina fase oscura o ciclo de Calvin, tiene lugar en el estroma y produce carbohidratos (Song, 2012).

4.3.1. Relación entre transpiración y fotosíntesis.

El crecimiento en las plantas depende en mayor proporción del intercambio de gases, que implica la pérdida de agua (transpiración) y el ingreso de dióxido de carbono al interior de la hoja (fotosíntesis); el mecanismo que proveen los estomas representan un mecanismo fundamental en el intercambio activo entre la zona aérea de la planta y el medio ambiente, el papel más importante de los estomas es la regulación entre la transpiración y asimilación de carbono fotosintético (Taiz & Zeiger, 2006).

El dióxido de carbono ingresa al cloroplasto desde el aire y para por diferentes partes en la hoja (capa límite, estomas, espacios de aire dentro de la hoja y fase líquida dentro de la hoja.), esto quiere decir que la concentración de CO₂ disminuye en todos estos huecos porque actúan como resistencia; debido a que la molécula de CO₂ pesa más que la del agua, el CO₂ se mueve lento, por lo que la resistencia al paso del CO₂ es mayor unas 1,6 veces al paso del agua; la medida de conductividad (gc) del CO₂ (inversa a la resistencia) es 1,6 veces menor que la conductividad del vapor de agua (gw). El agua, a su vez, sale por el estoma por simple difusión; la transpiración es directamente proporcional a la conductancia estomática (gs) (Tomás *et al.*, 2015)

Para que en las primeras 3 partes de la hoja se difunda el CO₂, los estomas deben abrirse exponiendo la superficie interna de la hoja a medio ambiente, provocando la pérdida de humedad (se pierden unas 200 moléculas de agua por cada molécula de CO₂ asimilada); estas dos moléculas comparten la misma ruta de transporte y esto crea un conflicto funcional en la planta; cuando en el aire hay alta humedad relativa, el gradiente de difusión que controla la pérdida de agua es aproximadamente 50 veces mayor que el gradiente que controla la absorción de dióxido de carbono; si el aire es mayormente seco, la disminución

de la resistencia estomática por apertura estomática favorece la entrada de más dióxido de carbono, pero significa una pérdida de agua significativamente mayor. (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

5. El agua y nutrientes en la planta.

El constituyente más abundante de la planta es el agua, este compuesto es fundamental para el transporte de nutrientes e indispensable en múltiples reacciones dentro de la planta, pero tiene la característica de no estar siempre presente o disponible ya que se mueve desde el suelo hasta llegar a las hojas y salir de la planta en forma de vapor; en las plantas, el flujo entre el suelo y la atmósfera a través de la planta es posible si existe diferencias en el potencial hídrico, las raíces tienen mayor potencial hídrico, disminuye a lo largo del tallo y tiene valores bajos en las hojas, el agua fluye desde áreas con potenciales altos (más negativo) a lugares con potenciales más bajo (menos negativo), es así que se explica, el movimiento de agua de una célula a otra, en la raíz y a través del tallo hasta las hojas más altas (Hernández-Fuentes *et al.*, 2015).

5.1. Absorción por la raíz.

Para la absorción es necesario el contacto de las raíces con los nutrientes y el agua, ya sea por difusión que es cuando hay un gradiente diferente de concentración entre el suelo y la raíz, la cantidad de solución movilizada tiene relación con el gradiente de concentración y el coeficiente de difusión; el flujo de masa es el movimiento disueltos en la parte líquida que llega a las raíces por evaporación, la cantidad de nutrientes que llegan con este movimiento está relacionada con la concentración y volumen de agua absorbida por la planta. (Lee, 2009).

El agua y los nutrientes se mueven e ingresan a la raíz por vía apoplástica atravesando las capas de la epidermis y corteza hasta poder llegar a la endodermis, llegando a la endodermis el flujo puede seguir por esta vía, las bandas de Caspary obligan a realizar el movimiento penetrando las células (de la endodermis) por medio del citoplasma y seguir por la vía simplasto y así pasa al xilema de la raíz; por otro lado, el movimiento vía simplástica e ingresar de forma directa, desde la solución, al simplasto por los pelos

radiculares y continúan por esta vía hasta llegar al xilema de la raíz (Ramírez y Martínez, 2016; Sory, 2010)

5.2. Transporte a través del tallo.

Cuando los nutrientes y agua llega al xilema, se inicia el movimiento hacia las partes aéreas de la planta, en la corriente de transpiración; existen dos modelos que explican este movimiento; la presión radical y la cohesión, la presión radical explica el movimiento del agua en plantas que miden menos de 10 m, donde las células del periciclo y parénquima bombean activamente (gasto de energía) iones al xilema, para que el potencial osmótico disminuya y genere una presión osmótica necesaria para que el agua entre al xilema y ascienda, por el contrario, la cohesión se basa en tres elementos fundamentales: en la fuerza motriz, fuerza de adhesión y fuerza de cohesión, y explica que cuando una molécula de agua se evapora de la hoja, la fuerza de tensión se transmite a lo largo de toda la planta hasta el suelo y el agua asciende, generando el gradiente de potencial hídrico, aunque en la hoja o en los puntos de crecimiento es suficiente para producir este gradiente (Beltrano, 2015; Ali *et al.*, 2008).

El movimiento del agua en el xilema tiene menor resistencia que lo que sucede en la raíz, las células conductoras del xilema tienen anatomía diferenciada que permite transportar cantidades grandes de agua, esta resistencia en el flujo aumenta cuando el diámetro de los conductos es menor y cuando el recorrido en el tallo es mayor (longitud); por esta razón es que las características de los elementos xilemáticos pueden influir en el potencial de movimiento del agua (Faustino *et al.*, 2011).

Las estructuras conductoras del xilema están formadas por vaso o tráqueas y por traqueidas, los cuales se forman por células (tienen paredes secundarias a base de lignina) que cuando llegan a un estado adulto pierden el protoplasto, debido a sus paredes secundarias a base de lignina, estas células otorgan resistencia a la compresión, eludiendo así un posible colapso con la tensión que pueden llegar a tener (Arriaga-Frías *et al.*, 2016).

5.1.3. La transpiración en las hojas.

Una vez que el agua llega a la hojas, pueden pasar dos cosas, que se evapore a través de los estomas a causa de la transpiración o puede ingresar a las células del mesófilo para ser parte del citosol y ser metabolizada en los diferentes procesos de la hoja, por su parte los

nutrientes ingresan en la célula para poder ser metabolizados y posteriormente almacenados en la vacuola, también pueden moverse a través del floema para ser enviados a los órganos donde son necesarios (Bertolino *et al.*, 2019).

La pérdida, en forma de vapor de agua se conoce como transpiración, la cual se realiza por los estomas, casi el 90% de agua que es absorbida por la raíz se pierde en transpiración; el cambio de fase sucede en la pared celular del mesófilo expuesta al aire, la pared celular contiene agua con potencial hídrico cercano a cero, el aire que esta alrededor de la hoja tiene un potencial hídrico más negativos lo que provoca la evaporación desde dentro de la hoja (Franks *et al.*, 2015).

Sin presencia de luz no se realiza la fotosíntesis y es cuando se da la acumulación CO_2 , no hay perdida de agua ya que los estomas están cerrados y se realiza procesos metabólico que usan el CO_2 ; durante el día, conforme la radiación aumenta, también lo hacen los procesos fotosintéticos y la asimilación de CO_2 , durante este tiempo en la cámara subestomática se reduce el contenido de CO_2 , se abren los estomas y se pierde agua por transpiración, la conductancia estomática normaliza la pérdidas de agua e intercambio de CO_2 , así que su función no solamente es minimizar la transpiración, sino que maximizar la fotosíntesis (Assmann and Jegla, 2016).

5.1.4. Uso de agua: eficiencia intrínseca y cuántica.

La eficiencia intrínseca (EF_i) es la relación existente entre el carbono fijado (tasa de asimilación) por unidad de agua evaporada al ambiente (transpiración), se expresa en $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$. El balance en EF_i entre los flujos agua y CO_2 depende en gran medida de los estímulos ambientales a los que se someten los estomas y también a la sincronía de los estomas en el mesófilo para el abastecimiento de CO_2 (Medrano *et al.*, 2007).

La eficiencia cuántica (ΦPSII) indica que proporción, de toda la luz captada, es absorbida por la clorofila de los complejos antena el fotosistema II (PSII) y se refiere a la eficiencia con la cual los electrones son procesados en la fotosíntesis por cantidad de luz absorbida (relación entre el CO_2 fijados por cada de fotón interceptado), por lo cual es un indicador de la fotosíntesis general y se expresa en unidades de $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ (Melendres *et al.*, 2017)

La eficiencia intrínseca del agua indica la capacidad de la planta para adaptarse al déficit hídrico, su valor puede incrementar con el cierre estomático, a mayor estrés hídrico, mayor eficiencia intrínseca. Se ha demostrado que la eficiencia intrínseca es siempre más alta cuando las plantas están bajo estrés hídrico que cuando están bien regadas (Medrano et al., 2007). En el caso de un cultivo de tomate con un estrés hídrico moderado, presentará mayor eficiencia intrínseca ya que una de las principales respuestas al estrés será cerrar sus estomas y así reducir la pérdida del agua por la transpiración, a diferencia de un cultivo que no presenta estrés donde abran valores bajos de eficiencia intrínseca.

ARTÍCULO

Respuesta fisiológica y productiva de tomate en un sistema NTF modificado tipo carrete
Physiological and productive response of tomato in a reel modified NFT system

Tomate en sistema NFT tipo carrete

Respuesta fisiológica y productiva de tomate en un sistema NTF modificado tipo carrete

Physiological and productive response of tomato in a reel modified NFT system

Carmen Alicia Ayala Contreras, José Antonio González Fuentes^{2*}, Alejandro Zermeño González³,
Adalberto Benavides Mendoza⁴, Fidel Maximiano Peña Ramos⁵, José Alfredo Hernández Mauriri⁶.

¹<https://orcid.org/0000-0002-0417-3596>

²<https://orcid.org/0000-0002-8740-3931>

*Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista CP 25315 Saltillo, Coahuila, México. Autor de Correspondencia: jagf252001@gmail.com.

³<https://orcid.org/0000-0003-4137-9638>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-2729-4315>

⁵<https://orcid.org/0000-0002-8043-0128>

⁶<https://orcid.org/0000-0003-1311-0738>

RESUMEN. La producción de tomate en sistemas protegidos emplea variedades de crecimiento indeterminado para lograr una mayor productividad, conllevando a tener tallos largos en etapas avanzadas. Por ello se propone una técnica NFT modificada utilizando un carrete para enrollar el tallo y así generar raíces adventicias y un tallo productivo de 2 m, comparado con un testigo en bolsa de 20 L con sustrato (turba). El objetivo fue evaluar la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de tomate establecido en un sistema NFT modificado tipo carrete, bajo un diseño completamente al azar. Los resultados indican que hubo diferencias significativas entre tratamientos en: variables fisiológicas, eficiencia intrínseca y cuántica,

número de frutos por planta, peso del fruto, diámetro ecuatorial y rendimiento, excepto en largo y diámetro de tallo, largo de hoja, diámetro polar de fruto y crecimiento semanal. El sistema en carrete es una alternativa para la producción de tomate bajo invernadero.

Palabras clave: Hidroponía, rendimiento, fotosíntesis, desarrollo, *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT. Tomato production in protected systems employs low-growing varieties, indeterminate to achieve greater productivity leading to long stems in advanced stages. For this reason, a modified NFT technique is proposed by using a reel to coil the stem that will generate adventitious roots and a productive stem of 2 meters, compared to a control in a 20 L bag of substrate (peat). The objective was to evaluate the physiological and productive response of the tomato crop established in an NFT system modified reel type, under a completely random design. The results indicate that there were significant differences between treatments such as: physiological variables, efficiency intrinsic and quantum, number of fruits per plant, fruit weight, equatorial diameter and yield except for length and diameter of stem, length of leaf, polar diameter of fruit and weekly growth. The reel system is an alternative for the production of greenhouse tomato.

Key words: Hydroponics, yield, photosynthesis, development, *Solanum lycopersicum* L.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L) representa uno de los rubros más dinámicos e importantes, siendo la hortaliza más cultivada en condiciones protegidas (Mundo *et al.* 2019). El cultivo de tomates en un invernadero es una opción conveniente porque brinda protección contra las condiciones climáticas adversas y permite un mejor manejo general del cultivo, mejorando el rendimiento y la calidad de la fruta. (García-Sánchez *et al.* 2018). Los cultivares más utilizados en estos sistemas de producción tienen hábitos de crecimiento variables con densidades de plantas que van de 2 a 6 m⁻² plantas y longitudes de tallo de más de 7 m (Sánchez-del Castillo *et al.* 2014). Las plantas con tallos largos y formación de racimos implican altos

requerimientos de nutrientes y consumo de energía para los nutrientes que fluyen hacia la región apical. (Mendoza-Pérez *et al.* 2018). En la producción comercial de tomate, cuando el tallo es corto (menos de 3 m), el tamaño inicial del fruto cortado es mayor que cuando el tallo es largo (más de 7 m). (Gabriel *et al.* 2016), esto debido a una menor cantidad de agua y nutrientes disponibles para la planta en la parte apical (Arriaga-Frías *et al.* 2016).

La tecnología de película de nutrientes (NFT) es un sistema hidropónico que consiste en mantener una capa delgada de SN cerca de las raíces de las plantas para proporcionar agua y nutrientes, incluido oxígeno, para evitar problemas de asfixia de raíces (Alipio *et al.* 2019, Rodríguez-Ortega *et al.* 2019, Zarza *et al.* 2018). Esta técnica aprovecha mejor el agua en el sistema radicular de la planta, reduce el espacio requerido para la producción y aumenta los rendimientos, pero al producir con variedades indeterminadas en estos sistemas, las condiciones de los tallos largos y su efecto sobre las plantas afectan el transporte de agua y nutrientes (Pire *et al.* 2010, Rodríguez-Ortega *et al.* 2019). Es por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de tomate establecido en un sistema NFT modificado tipo carrete.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el área experimental del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. El invernadero utilizado fue de tipo túnel, con estructuras de metal y cubiertas de fibra de vidrio, sistema de enfriamiento mediante pared húmeda y extractores de ventilación automatizados, así como un calentador de gas LPG tipo bazooka marca VentDepot.

Material vegetal y establecimiento del experimento. Se utilizaron semillas de tomate de crecimiento indeterminado variedad EL CID F1 (Harris Moran). La siembra se realizó el 2 de febrero de 2021 en bandejas de poliestireno de 200 cavidades con turba como sustrato y el trasplante el 15 de marzo de 2021, cuando las plántulas tenían unos 20 cm de altura con 3 hojas. Diseñado dentro de cada tratamiento según un diseño

experimental completamente al azar Las plantas se guiaron a un solo tallo, el tutoreo se realizó con hilo rafia sujeta a la parte superior de la estructura del invernadero, con una densidad de plantación de seis plantas m⁻². Se utilizó solución nutritiva (SN) de Steiner modificada (Tabla 1) según la etapa fenológica del cultivo. Se monitoreó el pH y la conductividad eléctrica (CE) diariamente para mantener valores entre 5.5 a 5.9 y 1.2 a 2.0 dS m⁻¹ en las etapas inicial y reproductiva, respectivamente. Asimismo, se registró la temperatura máxima, mínima y media, así como la humedad relativa y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante el período experimental (marzo-noviembre de 2021). (Tabla 2).

Tabla 1. Concentración de iones en la solución nutritiva de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo de tomate.

	Desarrollo vegetativo	Fructificación	Todo el ciclo	
	Macroelementos (me L ⁻¹)		Microelementos (mg L ⁻¹)	
NO ₃ ⁻	7	12	Fe	2
H ₂ PO ₄ ⁻	1.5	1.5	Mn	0.5
SO ₄ ⁻	3.5	6.5	Cu	0.03
HCO ₃ ⁻	-	-	Zn	0.14
Cl ⁻	-	-	B	0.5
Ca ⁺⁺	6	9	Mo	0.05
K ⁺	3.5	7		
Mg ⁺⁺	2	3.5		
NH ₄ ⁺	0.5	0.5		
Na ⁺	-	-		

Tabla 2. Datos máximos, mínimos y promedios de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante los meses marzo a noviembre de 2021.

Mes	PAR Light (μM m ² s)			Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima
Marzo	425	826	24	47	85	8	24	38	9
Abril	456	888	24	52	87	16	25	38	11
Mayo	484	944	25	52	87	17	28	41	14
Junio	442	856	29	56	88	25	26	37	15
Julio	504	984	24	62	87	37	21	27	15
Agosto	621	1220	22	63	90	37	21	28	15
Septiembre	421	824	18	69	91	47	20	26	14
Octubre	341	663	20	67	92	43	18	24	12
Noviembre	295	574	17	63	91	36	16	23	10

Tratamientos (T): consistió en dos sistemas de producción, T1: sistema de bolsa con sustrato (control) y T2: sistema NFT modificado. Las plantas T1 se colocaron en bolsas de polietileno negro con capacidad de 20 L, y el medio de crecimiento consistió en turba y perlita en una proporción de 1:4 (v/v). En cada bolsa se colocaron dos plantas, fueron tres bolsas m^{-2} y la densidad fue de seis m^{-2} . Se estableció en un diseño completamente al azar con 12 repeticiones, con unidades experimentales compuestas por dos plantas por bolsa. Mediante un sistema de riego por goteo, se brindó riego SN 3 veces al día: 0,5 L desde la siembra hasta la floración y 2-4 L desde la floración hasta la cosecha, manteniendo siempre un promedio de 30% de drenaje. solución perdida.

Para el T2 los carretes se fabricaron manualmente con fibra de vidrio y lámina PVC espumado (vitrocel) para formar la ceja del carrete (Figura 1-a). Los carretes se colocan sobre estructuras metálicas (soportes) para sostenerlas verticalmente, a una distancia de 30 cm entre sí, el trasplanté las plántulas a la parte central más alta del carrete. (Figura 1-b), al momento del trasplante se removió el sustrato del cepellón dejando la raíz expuesta y se utilizó una malla de plástico sobre la base del carrete para su sostén, se colocaron 2 plantas por carrete y se tuvieron tres carretes por m^2 para una densidad de seis plantas m^{-2} . Se establecieron en un diseño completamente al azar con 12 repeticiones, la unidad experimental fue de dos plantas por carrete. La SN se aplicó constante (durante todo el día) en un sistema recirculante, que consistió en una bandeja de plástico de 80 L de capacidad con una bomba eléctrica sumergible de 600 galones por hora, conectada a una manguera para riego de media pulgada de diámetro, con cuatro goteros por carrete con un gasto de $3 L h^{-1}$, para su recolección se utilizó una lámina de fibra de vidrio colocada debajo de los carretes que recirculaba la SN a la bandeja de plástico. El sistema de riego permitió aplicar la SN desde la base de las plantas todo el tiempo por ambos lados del carrete. Los carretes se cubrieron con un plástico negro para evitar la exposición de raíces a los rayos del sol. Una vez que los tallos alcanzaron más de 2 m de longitud y los frutos fueron cosechados, se inició el enrollado de los mismos en el carrete. La parte del tallo enrollado, sin hojas y frutos, generó raíces adventicias (RA) en toda la parte del tallo expuesta a la solución nutritiva (Figura 1-c). Cuando el tallo completó una vuelta en el carrete, se cortó y eliminó la raíz

principal, conforme avanzaba el cultivo los cortes se realizaban en el tallo con RA, esto se realizó continuamente manteniendo siempre un tallo productivo de 2 m.

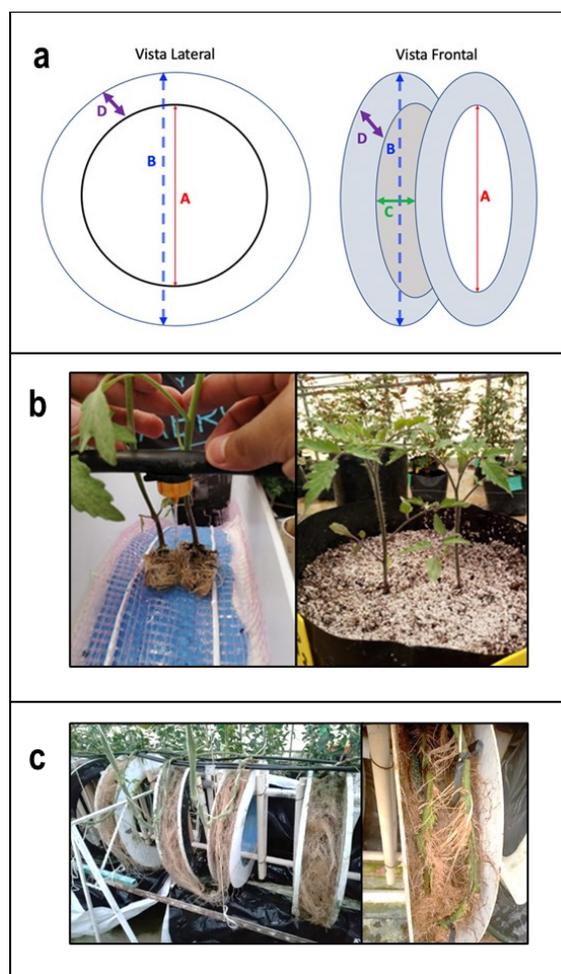


Figura 1. **a.** Representación esquemática del carrete utilizado en el sistema NFT. A: diámetro interno (60cm), B: diámetro externo (86 cm), C: base (15 cm), D: profundidad (13 cm). **b.** Trasplante de plántulas en el sistema NFT modificado-tipo carrete y en bolsa con sustrato. **c.** Tallos enrollados en el carrete y producción de raíces adventicias.

Variables evaluadas. Fisiológicas: A los 245 DDT se midieron parámetros fisiológicos en 10 plantas: intercambio gaseoso determinando la asimilación neta de CO_2 (Fotosíntesis), transpiración foliar (Thoja),

conductancia estomática, temperatura de la hoja, para medir estas variables se utilizó un equipo portátil marca LI-6800 (Li-COR, Lincon, Nebraska) que brinda los valores de forma automática; estos parámetros se midieron en hojas adultas, sanas, totalmente expandidas y expuestas a la radiación solar. La eficiencia intrínseca del agua se calculó mediante la división de la asimilación neta CO_2 entre transpiración foliar y la eficiencia cuántica fue calculada mediante la división de radiación fotosintéticamente activa absorbida (obtenida con el Li-6800) entre asimilación neta de CO_2 . Los frutos se cosecharon cuando estaban rosados y se evaluaron según los siguientes parámetros: medición manual del número de frutos por planta, diámetro polar y ecuatorial con vernier digital marca Sunnimix, peso del fruto (precisión 0,01 g) determinado con balanzas digitales marca Ohaus, rendimiento en kilogramos por planta. Se manejaron 6 frutos por planta y la cosecha de ambos tratamientos inicio el 24 de junio (101 DDT) y finalizó el 30 de noviembre (253 DDT) de 2021. Las variables de crecimiento se evaluaban semanalmente en cada planta, para lo cual se marcaba el punto de crecimiento sobre el hilo rafia del tutoreo. Las longitudes de hoja y tallo se midieron con un medidor de curvatura Truper de 5,5 m, los diámetros de tallo se midieron con un vernier digital Sunnimix, ambas variables se midieron en hojas y tallos cerca de los puntos de crecimiento semanal marcados por las hojas de rafia.. Los datos recopilados en el experimento se analizaron mediante la prueba t de Welch ($p \leq 0.05$) usando el programa estadístico Rstudio versión 1.3.1093.

RESULTADOS Y DISCUSION

Variables fisiológicas y de uso del agua. Las variables fisiológicas presentan diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de producción (Figura 2). La fotosíntesis en el sistema en carretes fue $17.59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$, siendo un 36.4% mayor que en las plantas en sustrato ($p= 0.00023$); la tasa de transpiración foliar, en el sistema en carrete fue de $7.74 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-2}$, 104.7% mayor que en sustrato ($p=0.0000045$), con respecto a la conductancia estomática, esta fue 110.5% mayor que en el sistema en sustrato ($p=0.0001$) (Figura 2). El sistema en carrete favoreció mayor intercambio gaseoso y proceso fotosintético que el sistema en sustrato, lo cual está relacionado con la disponibilidad de agua y nutrientes, durante todo el día en el sistema en carrete, a diferencia del sistema en bolsa donde los riegos con aplicados en momentos

específicos del día. Al respecto, Zegbe *et al.* (2007) indican que existe una fuerte relación entre la disponibilidad de agua y la tasa de fotosíntesis, ya que el intercambio gaseoso es más eficiente en términos de transpiración y conductancia estomática; en el sistema en sustrato, los valores de intercambio gaseoso fueron menores comparados con el sistema en carrete (Figura 2), al respecto Morales *et al* (2013) indican que el cierre estomático y reducción en transpiración está ligado a una depresión en la conductividad hidráulica de las raíces causado por una disminución en la disponibilidad de agua.

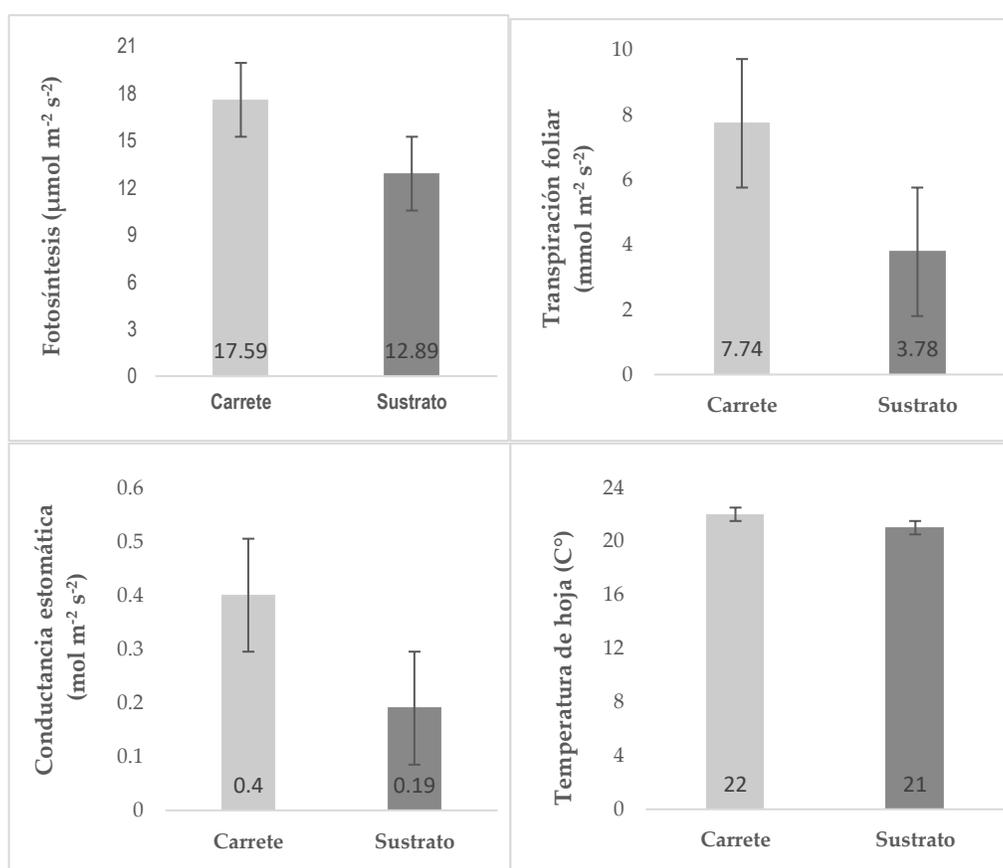


Figura 2. Tasa fotosintética, transpiración foliar, conductancia estomática y temperatura en la hoja en tomate variedad EL CID F1, en el sistema NFT tipo carrete y en bolsa en sustrato. (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$).

El uso eficiente del agua (UEA) o eficiencia intrínseca del agua a escala foliar y a nivel de eficiencia de la transpiración (Figura 3), fue de 2.27 y 3.42 $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ en el sistema en carrete y sustrato,

respectivamente, valores que son diferentes estadísticamente entre tratamientos. El valor obtenido de la eficiencia intrínseca en el sistema en sustrato está relacionado con que la disminución de la tasa de transpiración de la planta es mayor que la disminución de la tasa de asimilación de CO₂ en la misma planta, lo que indica que el sistema sustrato tiene una mayor capacidad de intercambio CO₂ por molécula de agua evaporada. En el sistema en carrete se tiene un menor valor de eficiencia intrínseca, ya que las plantas que crecieron en carrete tuvieron mayor asimilación de CO₂ (36.4% más que en el sistema en sustrato), y tasa de transpiración (104.7% más que en el sistema sustrato), y la relación entre estas fue menor que la observada en las plantas que crecieron en sustrato. Sobre lo mismo Sun *et al.* (2013) indican que la eficiencia intrínseca se reduce con la apertura estomática, lo cual depende de la respuesta de las estomas a factores como la temperatura o condiciones hídricas de la planta. En este estudio, la conductancia estomática fue mayor en el sistema de carrete (Fig. 2), lo que explica la mayor transpiración y, por lo tanto, la menor eficiencia interna. Al respecto, Melendres *et al.* (2017) mencionaron que la eficiencia interna se utiliza como indicador de la capacidad de las plantas para adaptarse al déficit hídrico; en el mismo Sol, *et al.* (2018) informaron que cuanto menor es el déficit de agua observado en el sistema de carrete en comparación con el sistema de sustrato, menor es la eficiencia interna.

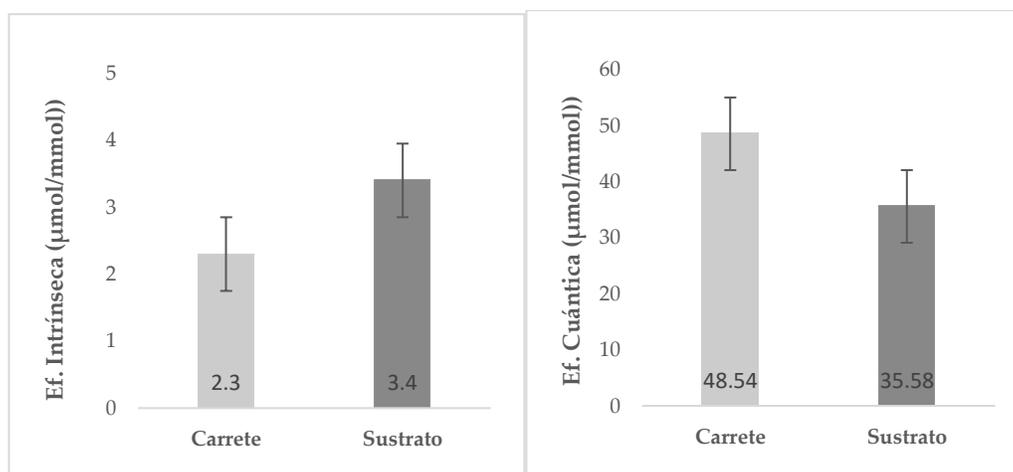


Figura 3. Eficiencia intrínseca y cuántica en tomate variedad EL CID F1, en el sistema NFT tipo carrete y en bolsa en sustrato. (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$).

En la eficiencia fotosintética o eficiencia cuántica (F_v/F_m) se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 2), presentando el sistema en carrete 36.4% mayor eficiencia comparado con el sistema en sustrato con 48.54 y 35.58 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$, respectivamente. La eficiencia cuántica refleja la eficiencia potencial del PSII y se utiliza como indicador de la eficiencia fotosintética o del aprovechamiento de la energía lumínica (DeEll y Toivonen 2003). Los resultados en este estudio indican que la diferencia entre el sistema en carrete y el sistema en sustrato fue 12.96 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$, siendo mayor en las plantas en carrete, lo que sugiere un mejor desempeño de los fotosistemas y aprovechamiento fotosintético. La disminución de la eficiencia cuántica, a nivel del sitio de oxidación del agua en el PSII, tiene relación con la disponibilidad de agua de la planta, se considera un indicador de alteraciones en el aparato fotosintético, a nivel de conversión cuántica y transporte de electrones, resultando en una reducción de la actividad fotosintética en la planta (Asseff *et al.* 2007, Medrano *et al.* 2007).

Variabes de rendimiento. Para las variables relacionadas con el rendimiento (tabla 3), no hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos solo para el diámetro polar del fruto. El número de frutos por planta en el sistema de carrete es de 65, frente a 59 frutos en el sistema de sustrato, lo que supone un aumento del número de frutos en un 10% y 1 kg de frutos por planta usando el sistema en carrete. El rendimiento tuvo un incremento del 16.3% en el sistema en carrete con peso medio de fruto de 109.6 g siendo significativamente diferente al sistema en sustrato que fue de 103.9 g. Los resultados de rendimiento son similares a los reportados por Lycoskoufis y Mavrogianopoulos (2020), quienes evaluaron la producción de tomate en un sistema NFT y un sistema modificado de NFT en NDT (Nutrient Drip Technique) donde obtuvieron un incremento en rendimiento del 24% en el sistema NFT modificado. Por otra parte, Rodríguez-Ortega *et al.* (2019), probaron diferentes sistemas hidropónicos de producción reportan que el sistema NFT las raíces siempre están sumergidos en SN y, por lo tanto, el agua y los nutrientes están fácilmente disponibles a diferencia del cultivo en sustrato, que aunque es un sistema de cultivo sin suelo, las raíces están en contacto con la SN en mayor proporción cuando se aplica el riego; en sustratos inertes como perlita, el contenido de agua como la concentración de sales pueden variar ampliamente entre cada evento

de riego (Borowski y Nurzynski 2012, Voća *et al.* 2007). Sobre lo mismo Wang *et al.* (2018) menciona que el rendimiento de los frutos del tomate depende en gran medida de la disponibilidad de agua y nutrientes, ya que afectan la fase vegetativa y reproductiva del tomate, por lo que optimizando estos aspectos se puede mejorar significativamente el rendimiento.

Tabla 3. Indicadores del rendimiento en tomate variedad EL CID F1, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa.

Sistema de Producción	Frutos por planta	Diámetro (mm)		Peso por fruto (g)	Rendimiento (kg planta ⁻¹)
		Polar	Ecuatorial		
Carrete	65.92	63.85	55.91	109.58	7.20
Sustrato	59.54	63.19	54.56	103.91	6.19
p-value	0.0246	0.333	0.0016	1.75E ⁻⁰⁵	0.0032
	*	ns	**	**	**

**, * y ns indican diferencias significativas a $p \leq 0.01$, 0.05 y no significativas, respectivamente. (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$).

Variabes de crecimiento. Las variables largo de hoja, largo de tallo y diámetro de tallo evaluadas en las plantas, durante el ciclo del cultivo (Figura 4) no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Los valores promedios semanales, obtenidos en el ciclo del cultivo, en largo de tallo fueron 23.06 y 22.28 cm en carrete y sustrato respectivamente, los cuales son considerados como una media de crecimiento normal ya que para el cultivo de tomate se han reportado valores de crecimiento semanal entre 18 y 27 cm, de igual manera en largo de hoja, los valores obtenidos son parámetros considerados normales para tomate 42.59 y 43.84 cm en carrete y sustrato, respectivamente (Juárez-Maldonado *et al.* 2015). Por otra parte, el diámetro de tallo presentó valores, 10.47 mm en carrete y 9.96 mm en sustrato, que están por debajo de los reportados para tomate que van de 11 a 12 mm; sin embargo, esta variable no representa un impacto importante en la producción de la planta (De la Rosa-Rodríguez *et al.* 2016); por otro lado, Flores-Pacheco *et al.* (2016) menciona que factores como la temperatura (mayor a 30 °C) y densidad o área foliar excesiva dan lugar a tallos delgados y débiles. Al respecto, De la Rosa-Rodríguez *et al.* (2020) indican que el desarrollo de las plantas puede ser diferente dependiendo del sistema de producción que se emplee, lo que difiere con Mata-Vázquez *et al.* (2010) quienes indican que el desarrollo agronómico de las plantas está

regulado por múltiples factores (ambientales y de manejo), así como los estímulos que estos factores generan en su desarrollo, por lo que el sistema de producción es únicamente una parte que influye en desarrollo de forma significativa.

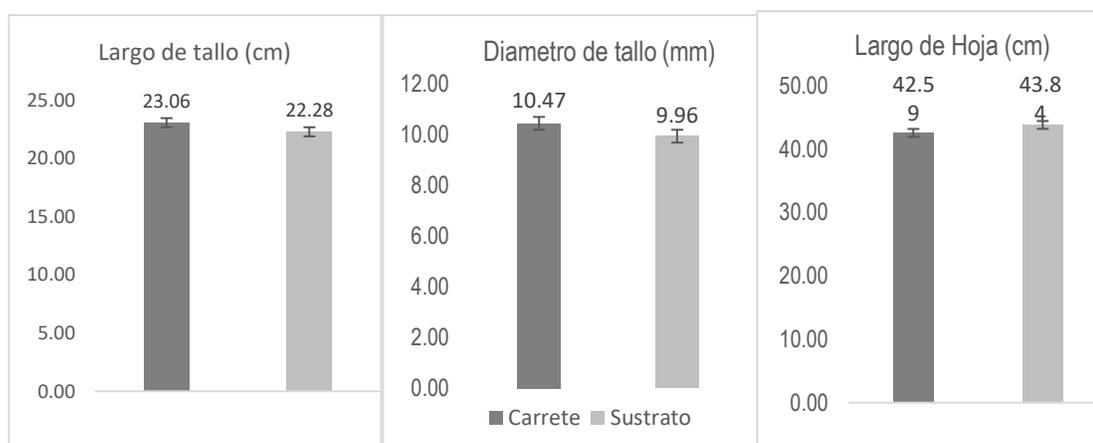


Figura 4. Parámetros de crecimiento en plantas de tomate variedad EL CID F1, en el sistema NFT modificado tipo carrete y en sustrato. (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$).

Bajo las condiciones y sistemas estudiados en invernadero, el sistema NFT modificado en carrete es una alternativa para la producción comercial de tomate, ya que los resultados indican que puede ser comparable con un sistema en sustrato.

LITERATURA CITADA

- Alipio MI, Cruz AEMD, Doria JDA, Fruto RMS (2019) On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 12: 315-324.
- Arriaga-Frías A, de la Cruz-Guzmán GH, Mandujano-Piña M (2016) Conductividad hidráulica en tallos florales de rosa cv. Polo con diferente longitud. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39: 233-239.

- Asseff JMP, Salamanca EJP, González CT (2007) Efecto del nitrógeno y la irradiación en la eficiencia fotosintética del Anamú *Petiveria alliacea* (Phytolaccaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 31: 49-56.
- Borowski E, Nurzynski J (2012) Effect of different growing substrates on the plant water relations and marketable fruit yield greenhouse-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Agrobotanica* 65: 49-56.
- DeEl JR, Toivonen P (2003) Use of chlorophyll fluorescence in postharvest quality assessments of fruits and vegetables. In: DeEl JR, Toivonen PMA (eds) *Practical applications of Chlorophyll fluorescence in plant biology*. Springer. Boston, MA. pp: 203-242.
- De la Rosa-Rodríguez R, Lara-Herrera A, Trejo-Téllez LI, Padilla-Bernal LE, Solis-Sánchez LO, Ortiz-Rodríguez M (2020) Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. *Horticultura Brasileira* 38: 47-52.
- De la Rosa-Rodríguez R, Lara-Herrera A, Lozano-Gutiérrez J, Padilla-Bernal LE, Avelar-Mejía JJ, Castañeda-Miranda R (2016) Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 17: 3439-3452.
- Flores-Pacheco JA, Murillo Y, Oporta R, Pacheco C F, Alemán Y (2016) Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum*) y chiltoma (*Capsicum annuum*) con sustratos inertes. *Revista Científica de FAREM-Estelí* (20): 73-81.
- Gabriel J, Angulo A, Velasco J, Guzmán R (2016) Adaptación de híbridos de tomate indeterminado (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero. *Journal of the Selva Andina Research Society* 7: 47-65.
- García-Sánchez EI, Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, Aguilar-Ávila J (2018) Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. *Cuadernos de Desarrollo Rural* 15: 93-116.
- Juárez-Maldonado A, de Alba-Romenus K, Zermeño González A, Ramírez H, Benavides-Mendoza A. (2015) Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 943-954.
- Lycoskoufis I, Mavrogianopoulos G (2020) NDT, a new soilless growing system without substrate suitable for Mediterranean conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 48: 1292-1305.

- Mata-Vázquez H, Anguiano-Aguilar RA, Vázquez-García E, Gázano-Izquierdo I, González-Flores D, Ramírez-Meraz M, Cervantes-Martínez JE (2010) Producción de tomate sistema hidropónico con solución nutritiva reciclable en sustrato de Tezontle. *CienciaUAT* 4: 50-54.
- Medrano H, Bota J, Cifre J, Flexas J, Ribas-Carbó M, Gulías J (2007) Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43: 63-84.
- Melendres AI, Zermeño A, Ramírez H, Cárdenas JO, Cadena M (2017) Eficiencia del uso del agua de un viñedo y su relación con porosidad del suelo. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8: 57-69.
- Mendoza-Pérez C, Ramírez-Ayala C, Martínez-Ruiz A, Rubiños-Panta JE, Trejo C, Vargas-Orozco AG (2018) Efecto de número de tallos en la producción y calidad de jitomate cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 355-366.
- Morales D, Rodríguez J A, Dell Amico J A, Torrecillas A, Sánchez-Blanco M J (2013) Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. AMALIA). *Cultivos tropicales* 27: 45-48.
- Mundo M, Jaramillo Villanueva J L, Morales Jimenez J (2019) Rentabilidad financiera y económica de las unidades de producción de jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) bajo invernadero en Puebla, México. *Agro Productividad* 12: 47-52.
- Pire R, Pereira A, Díez J, Fereres E (2010) Influence of rootstock and irrigation level on water relations of grapevines grown under tropical conditions. *Journal of Food Agriculture & Environment* 8: 703-709.
- Sánchez del Castillo SD, Moreno-Pérez EDC, Pineda-Pineda J, Osuna JM, Rodríguez-Pérez JE, Osuna-Encino T (2014) Producción hidropónica de jitomate (*Solatum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* 48: 185-197.
- Sun Q, Wang Y, Chen G, Yang H, Du T (2018) Water use efficiency was improved at leaf and yield levels of tomato plants by continuous irrigation using semipermeable membrane. *Agricultural Water Management* 203: 430-437.
- Sun XP, Yan HL, Kang XY, Ma FW (2013) Growth, gas exchange, and water-use efficiency response of two young apple cultivars to drought stress in two scion-one rootstock grafting system. *Photosynthetica* 51: 404-410.
- Voća S, Dobričević N, Šindrak Z, Borošić J, Benko B (2007) Quality of tomatoes grown on different substrates and harvested in three harvest periods. *Deutsche Lebensmittel Rundschau* 9: 431-437.

- Wang X, Yun J, Shi P, Li Z, Li P, Xing Y (2018) Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels. *Journal of Plant Growth Regulation* 38: 400-415.
- Zarza H, Huespe C, Mayeregger M, Trabuco M, Guillén Ó, Rodas M, López F (2018) Manual básico de cultivos sin suelo para producción de tomate en invernadero. Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Caacupé, Paraguay. 60p.
- Zegbe JA, Behboudian MH, Clothier BE (2007) Respuesta del tomate para proceso al riego parcial de la raíz. *Terra Latinoamericana* 25: 61-67.

Artículo

**Efecto de un sistema hidropónico tipo carrete en calidad y
productividad de tomate**

**Effect of a reel-type hydroponic system on tomato quality and
productivity.**

**Efecto de un sistema hidropónico tipo carrete en calidad y
productividad de tomate**
**Effect of a reel-type hydroponic system on tomato quality and
productivity.**

Carmen Alicia Ayala-Contreras¹ (<https://orcid.org/0000-0002-0417-3596>), Oscar Sariñana-Aldaco¹ (<https://orcid.org/0000-0002-9189-1931>), Adalberto Benavides-Mendoza¹ (<https://orcid.org/0000-0002-2729-4315>), Alejandro Zermeño-Gonzalez¹ (<https://orcid.org/0000-0003-4137-9638>), Eduardo Alberto Lara-Reimers (<https://orcid.org/0000-0002-7321-8129>), y José Antonio Gonzales-Fuentes^{1‡} (<https://orcid.org/0000-0002-8740-3931>)

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. 25315 Saltillo, Coahuila, México.

[‡] Autor de correspondencia (jagf252001@gmail.com)

RESUMEN

El tomate es un cultivo de mucha importancia en el mundo dados los requerimientos en consumo fresco como en productos procesados, este cultivo bajo condiciones en ambientes protegidos a establecido un impacto considerable en la actualidad dado el crecimiento de superficies cultivadas, rendimiento y rentabilidad al aplicar esta tecnología; en estos sistemas se utilizan materiales genéticos de crecimiento indeterminado para alcanzar mayor producción, teniendo tallos de mayor longitud a medida que avanzadas el cultivo. Es por esto por lo que se propone un sistema hidropónico tipo carrete donde el tallo se enrolla y se generan raíces adventicias y tienen tallos productivos de 2 m, los cuales se mantienen en esta longitud cortando el tallo enrollado en el carrete cuando excede una vuelta más 20 cm en los mismos; se estableció el testigo en bolsa (20 L) con turba, con tallos manejados normalmente con una longitud de más de 10 m. En este estudio se planteó como objetivo evaluar el efecto del sistema hidropónico en carrete en la calidad y productividad del tomate; para ambos tratamientos se empleó el diseño experimental completamente al azar. Se encontraron diferencias significativas en

calidad como vitamina C y acidez titulable entre los tratamientos, así como en todas las variables relacionadas al rendimiento: cantidad, peso, diámetro polar y ecuatorial de los frutos. No hubo diferencias estadísticas entre tratamientos en carotenoides, capacidad antioxidante, compuestos fenólicos, flavonoides y glutatión. El carrete como sistema hidropónico modificado representa una opción para la producción en invernadero de tomate.

Palabras clave: *Nutracéuticos, calidad, productividad, Solanum lycopersicum L.*

SUMMARY

Tomato is a crop of great importance in the world given the requirements in fresh consumption and processed products, this crop under conditions in protected environments is establishing a considerable impact at present given the growth of cultivated areas, yield and profitability when applying this technology; in these systems genetic materials of indeterminate growth are used to achieve greater production, having longer stems as the crop advances. This is why a reel type hydroponic system is proposed where the stem is rolled and adventitious roots are generated and productive stems of 2 m are maintained at this length by cutting the rolled stem in the reel when it exceeds one more 20 cm in length; the control was established in a bag (20 L) with peat, with stems normally handled with a length of more than 10 m. The objective of this study was to evaluate the effect of the reel hydroponic system on tomato quality and productivity; a complete experimental design was used for both treatments. Significant differences were found in quality such as vitamin C and titratable acidity between treatments, as well as in all variables related to yield: quantity, weight, polar and equatorial diameter of fruits. There were no statistical differences between treatments in carotenoids, antioxidant capacity, phenolic compounds, flavonoids and glutathione. The reel as a modified hydroponic system represents an option for greenhouse production of tomato.

Index words: *Nutraceuticals, quality, productivity, Solanum lycopersicum L.*

INTRODUCCIÓN

El cultivo tomate es importante en el mundo dado su consumo tanto en fresco como en productos procesados (Ardila *et al.*, 2011); bajo condiciones de ambientes protegidos a generando un fuerte impacto en la actualidad, dado su aumento en superficie, producción, calidad y productividad (Ortega-Martínez *et al.*, 2010). En nuestro país y el mundo es el principal cultivo en invernadero por sus ventajas en cuanto a una mayor eficacia en el uso de agua, espacio, fertilizantes, manejo de condiciones ambientales y facilidad de programar las temporadas de siembra y cosecha según las necesidades del mercado (Mundo *et al.*, 2020). La producción de tomate bajo invernadero es favorable dado que permite proteger frente a condiciones meteorológicas desfavorables, beneficia el manejo en general del cultivo, por lo que se maximiza la calidad y productividad del cultivo de tomate (Vargas *et al.*, 2012).

Los genotipos de crecimiento indeterminado son mayormente utilizados en los sistemas hidropónicos, con tallos de 7 m de longitud o más y mayor producción de racimos, lo que implica consumo de energía y demanda nutricional alta para el flujo de nutrientes a las zonas apicales (Suárez *et al.*, 2017); así mismo, los frutos tienen mayor tamaño al inicio de la cosecha ya que los tallos aun no son largos (< 3 m) que cuando son largos (> 7 m) (Gabriel *et al.*, 2016), esto debido a una disminuida conductividad hidráulica en la parte apical del tallo y la reducción en el flujo disponible de agua y nutrientes para la planta (Arriaga *et al.*, 2016).

La producción en invernadero utiliza diversos materiales como sustrato para la producción, principalmente cuando se establecen sistemas hidropónicos, los sustratos son mayormente requeridos que el suelo dadas sus características fisicoquímicas, se puede contar con mayor control de la nutrición, la aireación, el agua y distribución de las raíces (Escobar y Lee, 2017). Cuando las raíces de la planta crecen en un medio diferente al suelo, se dice que es un sistema de producción sin suelo, con esta técnica el sistema radicular se confina en un volumen aislado y determinado, lo cual eficientiza el uso de

los fertilizantes y del agua por la planta, reflejándose en una mayor productividad y calidad de los frutos cosechados (Zarza *et al.*, 2018).

La técnica NFT (Nutrient Film Technique) es un sistema hidropónico 100% en agua, la cual se fundamenta en el desplazamiento continuo de una lámina fina de SN (solución nutritiva), que entra en contacto con las raíces, a lo largo de los contenedores donde se establece el cultivo; este sistema cuenta con canales o contenedores, tanque donde se coloca la SN y un sistema de bombeo, de manera que la SN es enviada a los canales o contenedores desde el tanque, suministrando nutrientes y agua indispensable para su desarrollo; la SN que llega al final de los canales se dirige de nuevo al tanque para su recirculación (Resh, 2013). La ventaja de este sistema se enfoca en la obtención de un desarrollo uniforme del sistema radicular, aprovechamiento eficiente de agua y nutrientes, mejorando el proceso metabólico al reducir el consumo energético que conlleva a mayores rendimientos, mayor calidad organoléptica y nutracéutica, mejor aeración en la raíz, importante disminución en la incidencia de enfermedades radiculares, se obtiene un alto rendimiento y todo esto con un impacto ambiental mínimo (Savvas, 2003; Gruda, 2009).

El objetivo planteado en este estudio fue evaluar un sistema hidropónico tipo carrete en la calidad y productividad de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del experimento y material vegetal

Este experimento se estableció en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México dentro de un invernadero (en forma de túnel) del área de Horticultura; el cual cuenta con estructuras de metal recubierto con fibra de vidrio. Cuenta con pared húmeda como sistema de enfriamiento, para ventilar el área se usan extractores de forma automática y para su calentamiento se usa LPG en un calentador tipo bazooka marca VentDepotel. El almácigo se sembró en febrero de 2021 y la variedad de tomate fue CID F1 (habito indeterminado), se usó turba como sustrato en una charola para plántulas, el trasplante en los sistemas de producción fue en marzo del mismo año. Las plantas se guiaron a un solo tallo utilizando hilo rafia para el tutoreo; la densidad de siembra fue de seis plantas m⁻². Dados los requerimientos nutrimentales del cultivo

de tomate, se fertilizó con la SN de Steiner (1961). Se realizaban monitoreos diarios de la conductividad eléctrica (CE) y el pH para mantener valores de 1.2 a 2.0 dS m⁻¹ y 5.5 a 5.9 en etapa inicial y reproductiva, respectivamente.

Tratamientos

Se evaluaron dos tratamientos, el tratamiento uno (T1) fue un sistema de producción en bolsa con sustrato, en tanto que el tratamiento dos (T2) consistió en un sistema de producción hidropónico modificado tipo carrete. Los tratamientos se establecieron de la siguiente manera:

T1: se utilizaron bolsas color negro de 20 L, con sustrato turba-perlita (1:4). La unidad experimental consistió de dos plantas por bolsa, obteniendo tres bolsas m⁻². El riego (por goteo) fue aplicado tres veces durante el día; del trasplante al inicio de floración se aplicaron 0.5 L por riego y desde la floración a la cosecha se suministraban de 2 a 4 L por cada riego.

T2: la fabricación de carretes (manualmente) fue con fibra de vidrio y lámina PVC espumado. Se utilizaron estructuras de metal para sostener verticalmente los carretes, teniendo una separación entre sí de 30 cm. En la parte superior central del carrete se realizó el trasplante, usando una malla como soporte, removiendo en su totalidad el sustrato de área radicular. La unidad experimental consistió de dos plantas por carrete, obteniendo tres carretes m⁻². Para el riego se empleó un sistema hidropónico recirculante con SN de forma permanente. Para la recirculación se utilizó una bandeja plástica (80 L) y una bomba sumergible (600 gph), la cual se conectó a una manguera de media pulgada de diámetro, utilizando en cada carrete cuatro goteros (gasto: 3 L h⁻¹); en la parte inferior de los carretes, hacia la bandeja plástica, se colocó una canaleta de fibra de vidrio para llevar a cabo la recirculación. Para cubrir los carretes se usó un plástico de color oscuro por su lado externo y claro por su lado interno, evitando con ello la exposición del sistema radicular a la luz. Los tallos se enrollaban en el carrete cuando estos alcanzaron una longitud de 2 m, habiéndose cosechados los frutos con anterioridad (Figura 1). La sección enrollada del tallo en toda el área expuesta a SN generó raíces adventicias (RA) (Figura 2). Una vez completada una vuelta del tallo en el carrete, se procedió a eliminar la raíz principal, esta actividad se realizó subsecuentemente cortando secciones del tallo con RA, buscando siempre mantener un tallo productivo de 2 m.

Se empleó un diseño para los tratamientos completamente al azar (12 repeticiones), la unidad experimental tanto en el sistema hidropónico en sustrato (T1) y el en carrete (T2) fue de dos plantas.

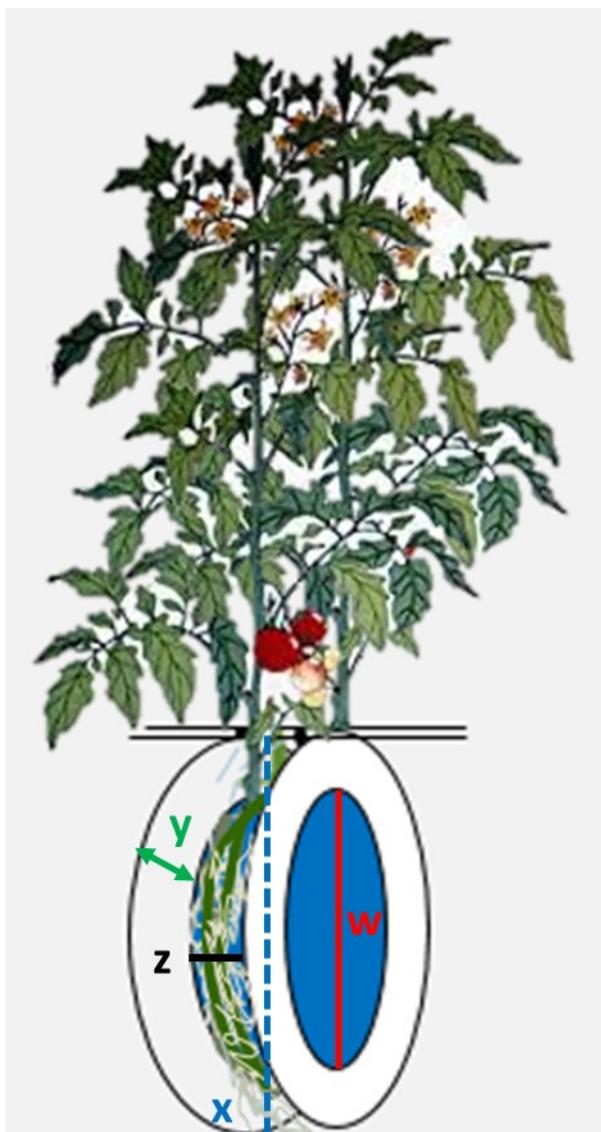


Figura 1. Esquema del carrete empleado en el sistema hidropónico: w: 60 cm (diámetro interno), x: 86 cm (diámetro externo), y: 15 cm (base del cilindro), z: 13 cm (profundidad de la ceja).

Figure 1. Diagram of the reel used in the hydroponic system: w: 60 cm (internal diameter), x: 86 cm (external diameter), y: 15 cm (base of the cylinder), z: 13 cm (depth of the flange).



Figura 2. Generación de raíces adventicias (RA) en el tallo expuesto a solución nutritiva.

Figure 2. Generation of adventitious roots (RA) in the stem exposed to nutrient solution.

Variables bioquímicas

Los compuestos bioquímicos fueron determinados en tres frutos de tomate por planta, las muestras previamente congeladas fueron liofilizadas, posteriormente pulverizadas con un triturador cerámico.

Para la extracción y cuantificar capacidad antioxidante y glutatión, se colocaron en tubos (2 mL) 100 mg de las muestras liofilizadas agregando 10 mg de PVP (polivinilpirrolidona), posteriormente se agregó buffer de fosfatos 0.1 M (2 mL), la mezcla homogenizada, zonificó por 5 min y centrifugó a 12500 rpm (4 °C) por 10 min, una vez finalizado se recolectó el sobrenadante y se realizaron las cuantificaciones.

Glutatión. Este compuesto se determinó por medio de espectrofotométrica, metodología propuesta por Xue *et al.* (2001), utilizando DTNB (ácido 5,5 ditiobis-2 nitro benzoico) como agente de reacción. Se utilizó 0.48 mL de la muestra, fosfato de disódio (2.2 mL), DTNB a 1 mM (0.33 mL) (colorante) y, una vez realizada la mezcla se reposo durante 15 min y posteriormente, en un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) a 412 nm, se realizó la lectura. El resultado es expresado en mg g^{-1} PS.

Proteínas totales. La cuantificación se realizó por medio de espectrofotométrica de Bradford (1976). En tubos de prueba se colocó reactivo Bradford (1 mL) y muestra (0.1 mL), se dejó reposar por 5 min y se leyó la muestra en el espectrofotómetro Uv-Vis (595 nm). Resultados se presentan en mg g^{-1} PS.

Capacidad antioxidante hidrofílica (ABTS). El procedimiento utilizado para la cuantificación de esta variable es el planteado por Re *et al.* (1999), utilizando la decoloración del catión radical ABTS. Al reaccionar el persulfato de potasio a 2.45 mM y ABTS a 7 mM (1:1 v/v) sometidos a 16 h de oscuridad da lugar al radical utilizado en este procedimiento, el radical debe tener una absorbancia a 753 nm de 0.7, para lograrlo se debe diluir en etanol al 20%. Se mezcló en un tubo (2 mL) 980 μL de la dilución antes mencionada con 20 μL de la muestra, agitando y dejando en oscuridad durante 7 min. Se realizó la medición a 754 nm en un espectrofotómetro Uv-Vis. Los datos son reportados en miligramos equivalentes de ácido ascórbico por gramo de peso seco (mg EAA g^{-1} PS).

Fenoles totales. Para medir esta variable se implementó la metodología de Singleton *et al.* (1999). Para la extracción de la muestra se usó 2 mL de la mezcla de acetona con agua (1:1 v/v) en 100 mg de tejido liofilizado, en agitación (20 s) usando un vórtex, posteriormente se zonificó por 5 min, para luego ser centrifugada durante 10 min a 12000 rpm (4°C). Para la cuantificación se utilizó el sobrenadante obtenido de la extracción, se colocó 50 μL de la muestra en tubos de ensayo, se agregó carbonato de sodio al 20% (500 μL) y reactivo Folin Ciocalteu (200 μL) y agua destilada (5 mL), durante 30 min se mantuvo en reposo y a 45 °C. Los datos fueron leídos un espectrofotómetro Uv-Vis a 750 nm y reportados en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (mg EAG g^{-1} PS).

Flavonoides. La determinación de este compuesto fue según Zhishen *et al.* (1999). Se empleó metanol al 80%, colocando 2 mL más 100 mg de muestra seca (liofilizado), se agito en vórtex, se zonificó durante 5 min y se procedió a centrifugar (10 min a 4 °C) a 4000 rpm. La cuantificación fue con NaNO_2 al 5% (75 μL); durante de 5 min se mantuvo en reposo, luego se agregó 150 μL de AlCl_3 al 10%; finalmente se agregó agua destilada (2 ml) y 500 μL de NaOH 1 M. Se utiliza un espectrofotómetro Uv-Vis a 510 nm para la lectura. La cuantificación de flavonoides se realiza por medio de una curva estándar de catequina, expresándose miligramos equivalentes de catequina por gramo de peso seco (mg EC g^{-1} PS).

Licopeno y β -caroteno. Estas variables se evaluaron según Fish *et al.* (2002), se utilizó 0.1 g de material seco (lío-filizado) combinado con 2 mL de hexano:acetona (3:2). En un espectrofotómetro Uv-Vis se mide a 453, 505, 645 y 663 nm del sobrenadante. Los compuestos se calculan mediante las siguientes ecuaciones y se exponen en mg 100 g⁻¹ PF:

$$\text{Licopeno} = -0.0458 \times A663 + 0.204 \times A645 + 0.372 \times A505 - 0.0806 \times A453 = \text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$$

$$\beta\text{-caroteno} = 0.216 \times A663 - 1.22 \times A645 - 0.304 \times A505 + 0.452 \times A453 = \text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$$

Vitamina C. Esta variable se cuantificó por titulación, se utilizaron 15 g de jugo diluidos en agua destilada (15 mL). Se usó el reactivo Thielmann y HCl al 2% para la titulación. El contenido de vitamina C se cuantifica mediante:

$$\text{Vitamina C} = \text{VRT} \times 0.088 \times \text{VT} \times 100 / \text{Pv} \times \text{G}$$

(VRT= gasto en mL de Thielmann, VT= Total en ml captado de vitamina C en HCl, Pv= Volumen en mL de la porcional, G= g de la muestra).

Sólidos solubles totales (SST). Se cuantificaron con un refractómetro portátil Civeq, expresándose en °Brix.

Acidez titulable (TTA). La determinación de este compuesto se realizó por titulación usando NaOH 0.1 N y fenolftaleína. Se colocó en un vaso de precipitado el volumen de jugo equivalente a 7 g con agua destilada (100 mL) para su dilución. Para determinar el contenido se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{TTA (\%)} = (\text{V} \times \text{N} \times 0.064 \times 100) / \text{Volumen de la muestra}$$

(V= mL gastados de NaOH, N= Normalidad del NaOH)

Los datos se expresan en % de ácido cítrico.

Rendimiento.

La cosecha de los frutos se realizó a los 101 días después del trasplante (DDT) cuando presentaban un color rojo y finalizó a los 278 DDT; se evaluaron las variables: diámetro de fruto (polar y ecuatorial) usando un pie de rey digital (Sunnimix), cantidad de frutos por planta por medio del conteo manual y el peso de cada uno de los frutos, por cada racimo, usando una báscula digital (Ohaus-precisión 0.01 g).

Análisis estadístico

Fue usada la prueba t de Welch ($\alpha \leq 0.05$) para el análisis de resultados, utilizando Rstudio versión 1.3.1093 como programa para el análisis estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados correspondientes a acidez titulable (%) y sólidos solubles (°Brix) en frutos frescos de tomate se muestran en la Figura 3, donde se indican diferencias estadísticas significativas (prueba de t de Welch $\alpha \leq 0.05$) para acidez titulable, a diferencia de sólidos solubles que no presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos. La etapa de desarrollo de los frutos de tomate y su madurez influye en la acidez y contenido de sólidos solubles, así como factores genéticos propios del genotipo y condiciones ambientales que intervienen en su producción (Agius *et al.*, 2018). Los datos que se presentan tienen similitud con lo obtenido por Salas *et al.* (2016) donde evaluaron la calidad comercial de tomates en diferentes sistemas de producción, indican que las variables como contenido de sólidos solubles no son estadísticamente diferentes entre sistemas, lo que indica que los sistemas son solo un componente que influir o no en estas variables; por su parte Fandi *et al.* (2008) mencionan que los frutos de tomate cultivados en suelo presentan menor contenido de sólidos solubles que los establecidos en sistemas hidropónicos, lo cual difiere con los resultados en este estudio. El contenido de sólidos solubles es un atributo de calidad importante durante la fase de maduración (Siddiqui *et al.*, 2015); a nivel comercial, los frutos de tomate de alta calidad deben tener valores de °Brix superiores a tres (Schwarz *et al.*, 2013). Los valores de sólidos solubles reportados en este experimento fueron superiores al valor sugerido anteriormente.

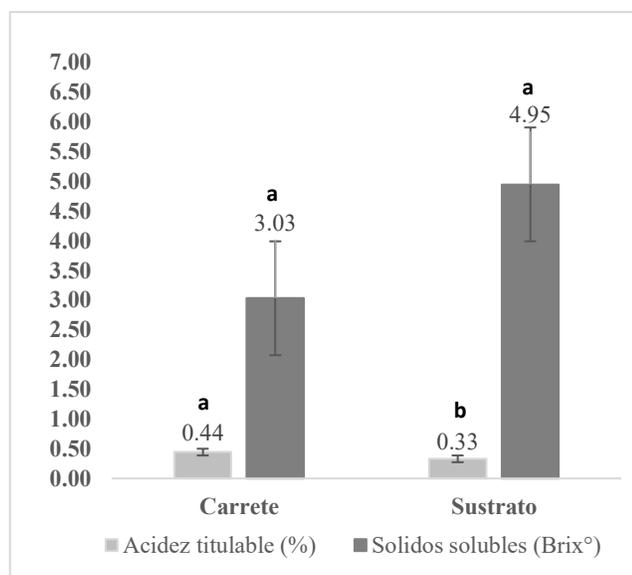


Figura 3. Acidez titulable y sólidos solubles totales en frutos de tomate producidos en los diferentes sistemas hidropónicos (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$).

Figure 3. Acidity and total soluble solids in tomato fruits produced in the different hydroponic systems (Welch's t-test, $\alpha \leq 0.05$).

Los compuestos bioquímicos de interés nutraceutico se presentan en el Cuadro 1. La vitamina C es la única variables con diferencias estadísticas significativas (prueba de t de Welch $\alpha \leq 0.05$) entre los tratamientos, siendo 13% mayor en el sistema en carrete. En los vegetales el ácido l-ascórbico (AA, ascorbato o vitamina C) es el antioxidante más abundante que se solubiliza en agua y es de gran interés a nivel comercial por su valor nutricional (Yactayo-Chang *et al.*, 2017). Los frutos producidos en el sistema en carrete tienen mayor contenido de vitamina C, este resultado concuerda con los alcanzados por Siomos *et al.* (2001) donde los frutos de tomate establecidos en un cultivo sin suelo presentaron mayor contenido de vitamina C en comparación con el cultivo en suelo. En cuanto a los carotenoides, capacidad antioxidante, compuestos fenólicos, flavonoides y glutatión (Cuadro 1) no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los sistemas hidropónicos (prueba de t de Welch $\alpha \leq 0.05$). Los carotenoides (licopeno y β -caroteno) son pigmentos sintetizados durante la maduración del fruto (Perveen *et al.*, 2015), su acumulación esta influenciada por la temperatura del aire, entre 22-25 °C se consideran ideales para la biosíntesis de estos compuestos, por debajo de 10 °C y por encima de 30 °C, la biosíntesis se ve comprometida (Domis *et al.*, 2002). Durante este

experimento, la media mensual de la temperatura mínima del aire varió entre 7 °C y 10 °C, siendo la máxima entre 23 °C y 38 °C. Estas variables se vieron influenciadas por el ambiente y no por el sistema de producción. En cuanto a los compuestos fenólicos, flavonoides y glutatión, el sistema de producción no influyó en el contenido de estos metabolitos secundarios, ya que su cantidad se ve modificados cuando la planta se somete a algún tipo de estrés (Ramírez *et al.*, 2006). Pocos estudios han investigado los efectos del medio de cultivo en los parámetros de calidad Gruda (2009) y Olle *et al.* (2012) sugiere que existen cambios significativos en los parámetros de calidad de muchas hortalizas en respuesta al medio de cultivo utilizado.

Cuadro 1. Compuestos bioquímicos en frutos de tomate establecidos en sistema hidropónico tipo carrete e hidropónico en sustrato (testigo).

Table 1. Biochemical compounds in tomato fruits established in a hydroponic system type a reel and hydroponic substrate (control).

Sistema de Producción	Licopeno	β -caroteno	Capacidad Antioxidante	Compuestos Fenólicos	Flavonoides	Glutatión	Vitamina C
	mg 100 g ⁻¹ PS	mg 100 g ⁻¹ PS	mg EAA 100 g ⁻¹ PS	mg EAG 100 g ⁻¹ PS	mg EC 100 g ⁻¹ PS	mg g ⁻¹ PS	mg 100 g ⁻¹ PF
Carrete	21.97	12.62	78.07	597.07	51.19	55.95	32.9
Sustrato	24.45	11.60	73.00	513.07	70.61	69.82	24.9
p-value	0.4509	0.4688	0.5457	0.2097	0.2264	0.2311	0.0396
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*

* (existen diferencias significativas a $p \leq 0.05$) y ns (estadísticamente iguales) con la prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$.

PS: peso seco, PF: peso fresco, EAA:, EAG:, EC:

Para el rendimiento y sus variables (Cuadro 2), se presentan diferencias estadísticas significativas (prueba de t de Welch $\alpha \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas entre los tratamientos. En el sistema hidropónico tipo carrete mostró mayor número de furtos por planta, 13 frutos más que en el sistema en sustrato, esto simboliza un incremento del 10.4% equivalente a 1 kg de frutos por planta; estos resultados coinciden con los reportados por Lycoskoufis y Mavrogianopoulos (2020), donde se evaluaron un sistemas hidropónicos 100% en agua (sistema NFT) y sistema NDT (Nutrient Drip Technique) en el rendimiento de tomate, obteniendo un aumento de 34% en el sistema NDT. El diámetro polar y ecuatorial fueron diferentes estadísticamente (prueba de t de Welch $\alpha \leq 0.05$) entre los sistemas de producción, lo cual influye en el peso del fruto y finalmente en rendimiento (Cuadro 2), con un 12.2% de aumento en el sistema hidropónico en carrete con frutos de

107.99 g, los cuales son superiores significativamente en comparación con el sistema en sustrato donde el peso por fruto fue de 102.85 g. El sistema en carrete permite contar con un suministro constante de SN en equilibrio facilitando la absorción de nutrientes a diferencia del sustrato en bolsa, en donde a medida que avanza el ciclo del cultivo se incrementa la CE en el sustrato y limita la absorción nutrimental (Castillo *et al.*, 2014).

Tomando en cuenta que el aporte nutricional en ambos sistemas de producción fue el adecuado para alcanzar el potencial del cultivo, estos datos sugieren que el mayor rendimiento en el sistema en carrete se debió al hecho de que las plantas tuvieron acceso a agua y nutrientes en todo momento de forma constante. Estudios realizados por Rodríguez *et al.* (2019), quienes evaluaron distintos sistemas de producción en hidroponía, encontraron que las raíces de las plantas establecidas en sistemas NFT están siempre sumergidas en SN lo cual permite una mejor disponibilidad de agua y los nutrientes; en sistemas de producción con sustrato el sistema radicular recibe SN en los eventos de riego mayormente; la perlita, que es un sustrato sólido e inerte, puede variar ampliamente el contenido de agua y la concentración de nutrientes entre riegos (Borowski y Nurzynski 2012, Voća *et al.*, 2007). Por otro lado, el medio de crecimiento en el que crecieron las raíces en este experimento, fueron en gran medida muy diferente entre sistemas de producción, por lo que, las propiedades morfológicas y fisiológicas de las raíces también pueden diferir y determinar la respuesta de rendimiento (Rodríguez *et al.*, 2019).

Cuadro 2. Variables de rendimiento en el cultivo de tomate establecido en sistema hidropónico tipo carrete e hidropónico con sustrato (testigo).

Table 1. Yield variables in tomato established in a hydroponic system type a reel and hydroponic substrate (control).

Tratamiento	Frutos por planta	Diámetro (mm)		Peso por fruto (g)	Rendimiento (kg planta ⁻¹)
		Polar	Ecuatorial		
Carrete	73.92 a	66.59 a	55.91 a	107.99 a	7.96 a
Sustrato	60.83 b	62.95 a	53.63 b	102.85 b	6.23 b
p-value	0.0246	0.333	0.0016	1.75E-05	0.0032
	**	*	**	**	**

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (prueba t de Welch, $\alpha \leq 0.05$). ** (diferencias significativas a $\alpha \leq 0.01$), * (existen diferencias significativas a $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Para la producción de tomate de manera comercial, el sistema hidropónico tipo carrete representan una opción factible en invernadero ya que los resultados en las variables de calidad de fruto son equiparables a la producción en sustrato, la vitamina C tuvo un 13% más de contenido en el sistema en carrete; así mismo, las variables relacionadas con el rendimiento fueron significativamente superiores con un 34% al sistema en sustrato.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Desarrollo del experimento, preparación del borrador original, CAAC.; análisis de laboratorio, OSA.; metodología, recursos, JAGF.; análisis de datos, AZR.; revisión y edición, JAGF, EALR, AZG y ABM.

LITERATURA CITADA

- Agius, C., Tucher, S. Von, Poppenberger, B., & Rozhon, W. (2018). Quantification of sugars and organic acids in tomato fruits. *MethodsX*, 5(May), 537–550. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.014>
- Ardila, G., Fischer, G., & López, H. E. B. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 44-56.
- Arriaga-Frías, A., de la Cruz-Guzmán, GH., & Mandujano-Piña, M. (2016). Conductividad hidráulica en tallos florales de rosa cv. Polo con diferente longitud. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39: 233-239.
- Bradford, M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of protein utilizing the principle of proteindye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254
- Borowski, E., & Nurzynski, J. (2012). Effect of different growing substrates on the plant water relations and marketable fruit yield greenhouse-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Agrobotanica* 65: 49-56.
- Castillo S.D., Moreno-Pérez, D.C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J.M., Rodríguez-Pérez, J.E., & Osuna-Encino, T. (2014) Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* 48: 185-197.
- Domis, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2002). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticult. Rev*, 26, 239-349.
- Fandi, M., Al-Muhtaseb, J. A., & Hussein, M. A. (2008). Yield and fruit quality of tomato as affected by the substrate in an open soilless culture. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 4(1), 65-72.
- Fish, W.W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J.K. (2002). A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *J. Food Comp. Anal.*, 15, 309–317.
- Gabriel, J., Angulo, A., Velasco, J., & Guzmán R. (2016). Adaptación de híbridos de tomate indeterminado (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero. *Journal of the Selva Andina Research Society* 7(2): 47-65.
- Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. – 2009, vol. 82, p. 141–147.

- Lycoskoufis I., & Mavrogianopoulos G. (2020) NDT, a new soilless growing system without substrate suitable for Mediterranean conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 48: 1292-1305.
- Magallanes-López, A. M., Martínez-Damián, M. T., Sahagún-Castellanos, J., Pérez-Flores, L. J., Marín-Montes, I. M., & Rodríguez-Pérez, J. E. (2020). Calidad poscosecha de 40 poblaciones de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativas de México. *Agrociencia*, 54(6), 779-796.
- Mundo Coxca, M., Jaramillo Villanueva, J. L., Morales Jiménez, J., Macías López, A., & Ocampo Mendoza, J. (2020). Caracterización tecnológica de las unidades de producción de tomate bajo invernadero en Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 979-992.
- Olle, M., Ngouajio, M., & Siomos, A. (2012). Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. *Agriculture*, 99(4), 399-408.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.
- Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., & Ahmad, S. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopenes chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims—A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919-929.
- Ramírez, H., Rancaño-Arriola, J., Benavides-Mendoza, A., Mendoza-Villarreal, R., & Padrón-Corral, E. (2006). Influencia de promotores de oxidación controlada en hortalizas y su relación con antioxidantes. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12.
- Rodríguez-Ortega, W. M., Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernández-Zapata, J. C., & García-Sánchez, F. (2019). Agricultural and physiological responses of tomato plants grown in different soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. *Scientific Reports* 9(1): 1-13. DOI: 10.1038/s41598-019-42805-7.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26: 1231-1237.
- Salas, P. L., González, F. J. A., García, C. M., Sifuentes, I. E., Parra, T. S., & Preciado, R. P. (2016). Calidad biofísica y nutracéutica de frutos de tomate producido con sustratos orgánicos. *Nova Scientia*, 8(17): 310-325.
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology that supports the application of integrated greenhouse crop management. *Food, Agriculture and Environment*, 1(1), 80-86.

- Schwarz, K., de Resende, J. T. V., Preczenhak, A. P., de Paula, J. T., Faria, M. V., & Dias, D. M. (2013). Desempenho agrônômico e qualidade físico-química de híbridos de tomateiro em cultivo rasteiro. *Horticultura Brasileira*, 31, 410-418.
- Siomos, A.S., G. Beis, P.P. Papadopoulou and N. Barbayiannis. (2001). Quality and composition of lettuce (cv. Plenty) grown in soil and soilless culture. *Acta Horticulturae*, 548:445-450.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Meth. Enzymol.* 1999, 299, 152–178.
- Siddiqui, M. W., Ayala-Zavala, J. F., & Dhua, R. S. (2015). Genotypic variation in tomatoes affecting processing and antioxidant attributes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(13), 1819-1835.
- Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., Aguilar-Ávila, J., Camacho-Vera, J. H., Ocampo-Ledesma, J. G., & Medina-Cuellar, S. E. (2018). Efficiency of small enterprises of protected agriculture in the adoption of innovations in Mexico. *Estudios Gerenciales*, 34(146), 52–62. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2811>
- Voća, S., Dobričević, N., Šindrak, Z., Borošić, J., & Benko, B. (2007). Quality of tomatoes grown on different substrates and harvested in three harvest periods. *Deutsche Lebensmittel Rundschau* 9: 431-437.
- Xue, T., Hartikainen, H., & Piironen, V. (2001). Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant and Soil* 237: 55-61.
- Yactayo-Chang, J. P., Acosta-Gamboa, L. M., Nepal, N., & Lorence, A. (2017). The Role of Plant High-Throughput Phenotyping in the Characterization of the Response of High Ascorbate Plants to Abiotic Stresses. In “Ascorbic Acid in Plant Growth, Development and Stress Tolerance”, pp. 321-354. Springer.
- Zarza, H., Huespe, C., Mayeregger, M., Trabuco, M., Guillén, Ó., Rodas, M., & López, F. (2018). Manual básico de cultivos sin suelo para producción de tomate en invernadero. Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Caacupé, Paraguay. 60 p.
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chem.* 1999, 64, 555–559.

CONCLUSIONES GENERALES

Realizar un proyecto innovador implica una serie de actividades que permitan crear nuevas ideas o productos que aporten un valor agregado a lo ya existente, el sistema en carrete es una modificación al sistema hidropónico NFT, que permite ayudar en el manejo de la producción de tomate con variedades de crecimiento indeterminado, con tallos que pueden ser enrollado en el carrete y cortados conforme avanza el ciclo del cultivo.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el sistema en carrete fue superior en múltiples variables, como el rendimiento, eficiencia intrínseca en el uso del agua y cuántica del fotosistema II, variables asociadas a la fotosíntesis e intercambio gaseoso, contenido de vitamina C y ácidos orgánicos, estos dos últimos, en los frutos de tomate.

El sistema en carrete es una alternativa viable en la producción de tomate, comparado con el sistema en sustrato, dados los resultados obtenidos en este estudio y las condiciones bajo las que se evaluaron ambos sistemas.

REFERENCIAS

- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., & Rodriguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, 2(4), 45-54.
- Ali Q, Athar HR, Ashraf M (2008) Modulation of growth, photosynthetic capacity, and water relations in salt stressed wheat plants by exogenously applied 24-epibrassinolide. *Plant Growth Regul* 56:107–116. <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9290-7>
- Aloni R, Aloni E, Langhans M, Ullrich CI (2006) Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: Regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. In: *Annals of Botany*. pp 883–893
- Aloni R, Langhans M, Aloni E, et al (2005) Root-synthesized cytokinin in *Arabidopsis* is distributed in the shoot by the transpiration stream. *Journal of Experimental Botany* 56:1535–1544. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri148>
- Ardila, G., Fischer, G., & López, H. E. B. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 44-56.
- Alemán Pérez, R. D., Domínguez Brito, J., Rodríguez Guerra, Y., & Soria Re, S. (2016). Indicadores morfológicos y productivos del cultivo del tomate en Invernadero con manejo agroecológico en las condiciones de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 43(1), 71-76.
- AMHPAC. (2020). Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A.C. Obtenido de Portal de negocios y mercados. Histórico Cierres de la Producción Agrícola - SIAP SADER.: <https://amhpac.org/negociosmercados/socios/v2/produccion/>
- Arriaga-Frías, Alberto; de-la-Cruz-Guzmán, Gumercindo H.; MANDUJANO-PIÑA, Manuel. Conductividad hidráulica en tallos florales de rosa cv. Polo con diferente longitud. *Revista fitotecnica mexicana*, 2016, vol. 39, no 3, p. 233-239.
- Assmann, S. M., and Jegla, T. (2016). Guard cell sensory systems: recent insights on stomatal responses to light, abscisic acid, and CO₂. *Curr. Opin. Plant Biol.* 33, 157–167. doi: 10.1016/J.PBI.2016.07.003
- Braimoh, A. K. (2013). Global agriculture needs smart science and policies. In *Agriculture and Food Security* (Vol. 2, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-6>
- Azcón-Bieto, J., Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal* (No. 581.1). Segunda edición. Editor McGraw-Hill Interamericana.

- Baeza, L. A. P., Torres, R. E. P., Ortiz, A. G. B., Seañez, A. R. R., Mendoza, S. L., Escoboza, F. A. V., & Félix, G. D. (2018). Rendimiento y fruto de híbridos de jitomate en cuatro sustratos bajo invernadero en el trópico. *Agricultura Tropical*, 3(2).
- Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. 22(1), 81-90.
- Beltrano, J. (2015). Introducción al cultivo hidropónico. En B. José, & D. O. Gimenez, *Cultivo en hidroponía* (págs. 10-33). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Benková, E., & Bielach, A. (2010). Lateral root organogenesis—from cell to organ. *Current opinion in plant biology*, 13(6), 677-683.
- Bergmann, D. C., and Sack, F. D. (2007). Stomatal development. *Annu. Rev. Plant Biol.* 58, 163–181. doi: 10.1146/annurev.arplant.58.032806.104023
- Bertolino LT, Caine RS, Gray JE (2019) Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Front Plant Sci* 10:225. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00225>
- Boulard, T. et al. 2011. Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development*. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 31(4): 757–77
- Casimiro, I., Beeckman, T., Graham, N., Bhalerao, R., Zhang, H., Casero, P., . . . Bennett, M. J. (2003). Dissecting Arabidopsis lateral root development. *Trends in plant science*, 8(4), 165-171.
- Casson SA, Lindsey K (2003) Genes and signalling in root development. *New Phytologist* 158:11–38
- Castillo, S. D., Moreno-Pérez, E. D. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E., & Osuna-Encino, T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185-197.
- Castillo-Castellanos, D., Zavala-Leal, I., Ruiz-Velazco, J. M. J., Radilla-García, A., Nieto-Navarro, J. T., Romero-Bañuelos, C. A., & González-Hernández, J. (2016). Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International*, 24(2), 637–646. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9954-z>
- Chen, J., Shi, H., Sivakumar, B., & Peart, M. R. (2016). Population, water, food, energy and dams. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56, pp. 18–28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.043>
- Cocetta, G., Casciani, D., Bulgari, R., Musante, F., Kolton, A., Rossi, M., & Ferrante, A. (2017). Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor

- environments. In *European Physical Journal Plus* (Vol. 132, Issue 1). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11298-x>
- Contreras, E. A. (2014). Efecto del injerto sobre la nutrición y fotosíntesis de tomate (*lycopersicon esculentum mill*) bajo condiciones de invernadero. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía.
- Dubreuil C, Jin X, Grönlund A, Fischer U (2018) A Local Auxin Gradient Regulates Root Cap Self-Renewal and Size Homeostasis. *Current Biology* 28:2581-2587.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.090>
- Escobar, H. (2009). Manual de producción de tomate bajo invernadero. (H. Escobar, & R. Lee, Edits.) Republica de Colombia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Faustino, L. I., Graciano, C., Gortari, F., & Guiamet, J. J. (2011). ¿Cómo afectan los nutrientes el uso del agua en plantas leñosas? *Ecología austral*, 21(3), 233-250.
- Fornaris, G. J. (2007). Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate: Características de la planta. En *Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate de Ensalada* (págs. 1-6). Puerto Rico: Estación Experimental Agrícola.
- Franks, P. J., Doheny-Adams, W. T., Britton-Harper, Z. J., and Gray, J. E. (2015). Increasing water-use efficiency directly through genetic manipulation of stomatal density. *New Phytol.* 207, 188–195. doi: 10.1111/nph.13347
- Flores-Pacheco, J. A., Murillo, Y., Oporta, R., Pacheco, C. F., & Alemán, Y. (2016). Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum*) y chiltoma (*Capsicum annum*) con sustratos inertes. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (20), 73-81.
- Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127-134.
- García-Sánchez, E. I., Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., & Aguilar-ávila, J. (2018). The innovation system as an analytical framework for protected agriculture in the Mexican central region. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81), 1–24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr15-81.sima>
- Gallo, M., Rodríguez, G. R., Zorzoli, R., & Pratta, G. R. (2011). Ligamiento genético entre variables asociadas a calidad del fruto de tomate y polipéptidos expresados en dos estados de madurez. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2), 145-156.
- Gil, E., Aranda, I., Peguero, J. J., & Vilagrosa, A. (2005). El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 14(3), 358-370.
- Guan L, Li Y, Huang K, Cheng ZM (Max) (2020) Auxin regulation and MdPIN expression during adventitious root initiation in apple cuttings. *Horticulture Research* 7:. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00364-3>

- Guan L, Murphy AS, Peer WA, et al (2015) Physiological and Molecular Regulation of Adventitious Root Formation. *Critical Reviews in Plant Sciences* 34:506–521. <https://doi.org/10.1080/07352689.2015.1090831>
- Guan L, Tayengwa R, Cheng ZM, et al (2019) Auxin regulates adventitious root formation in tomato cuttings. *BMC Plant Biology* 19:. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2002-9>
- Gruda, N. S. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(3), 141 - 147.
- Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions*, 3(4), 297-304.
- Hernández-Fuentes, Carolina; Bravo León A.; Cavieres, Lohengrin A. 2015. Conductancia hidráulica foliar y vulnerabilidad a la cavitación disminuyen con la altitud en *Phacelia secunda* JF Gmel (Boraginaceae). *Gayana. Botánica*, vol. 72, no 1, p. 84-93.
- Ikkonen, E.N., Shibaeva, T.G., Rosenqvist, E. et al. (2015). Daily temperature drop prevents inhibition of photosynthesis in tomato plants under continuous light. *Photosynthetica* 53, 389–394 <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0115-4>
- Jiang K, Feldman LJ (2005) Regulation of root apical meristem development. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 21:485–509
- Juárez, M. A., De Alba, R. K., Ramírez, H., & Benavides, M. A. (2015). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), 943-954.
- Juárez Hernández, M., Jesús, D., Baca Castillo, G. A., Lorenzo, A., Navarro, A., Sánchez García, P., ... & Colinas De León, M. T. (2006). Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Interciencia*, 31(4), 246-253.
- Latkowska, E., Lechowski, Z., Bialczyk, J. et al. Photosynthesis and Water Relations in Tomato Plants Cultivated Long-Term in Media Containing (+)-Usnic Acid. *J Chem Ecol* 32, 2053–2066 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10886-006-9128-6>
- Lee, A. (2009). El movimiento del agua a través de las plantas. *Horticultura internacional*, 44, 72.
- Ligarreto, G. A. (2013). Componentes de variancia en variables de crecimiento y fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 87-96.
- Ljung K, Hull AK, Celenza J, et al (2005) Sites and regulation of auxin biosynthesis in arabidopsis roots. *Plant Cell* 17:1090–1104. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.029272>

- López, P. P., Cano, A., Rodríguez, G. S., Torres, N., Rodríguez, S. M., & Rodríguez, R. (2011). Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. *Tecnociencia*, 5(2), 98-104.
- López, R., Inzunza, M. A., Sánchez, I., Fierro, A., & Sifuentes, E. (2015). Water use efficiency and productivity of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) based on two transplanting dates. *Water Science and Technology*, 71(6), 885-891.
- Luis Hernández Suárez, J. (n.d.). *La política pública hacia la agricultura protegida en el gobierno de López Obrador*.
- Luna-Fletes, J. A., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Bugarín-Montoya, R., & Valdivia-Reynoso, M. (2018). Intensidad de raleo y soluciones nutritivas en la calidad de tomate cherry. *Revista fitotecnia mexicana*, 41(1), 59-66.
- Martínez-Rodríguez, O. G., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., & García-Paredes, J. D. (2017). Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(1), 53-65.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas (Esp)*, (43), 63-84.
- Melendres, A. I., Zermeño, A., Ramírez, H., Cárdenas, J. O., & Cadena, M. (2017). Eficiencia del uso del agua de un viñedo y su relación con porosidad del suelo. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 57-69.
- Moreno Reséndez, A., Aguilar Durón, J., & Luévano González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de agronegocios*, 29(1345-2016-104296), 763-774.
- Mundo Coxca, M., Jaramillo Villanueva, J. L., Morales Jiménez, J., Macías López, A., & Ocampo Mendoza, J. (2020). Caracterización tecnológica de las unidades de producción de tomate bajo invernadero en Puebla. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(5), 979-992.
- Muraro D, Byrne H, King J, Bennett M (2013) The role of auxin and cytokinin signalling in specifying the root architecture of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Theoretical Biology* 317:71–86. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.08.032>
- Nicola, S., Pignata, G., Casale, M., Hazrati, S., & Ertani, A. (2021). Setting Up a Lab-Scale Pilot Plant to Study the New Growing System (NGS®) for Leafy Vegetable and Culinary Herb Growth. *Horticulturae*, 7(5), 90.
- Noguchi, K., & Yoshida, K. (2008). Interaction between photosynthesis and respiration in illuminated leaves. *Mitochondrion*, 8(1), 87-99.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en

- crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.
- Páez, A., Paz, V., & López, J. C. (2000). Crecimiento y respuestas fisiológicas de plantas de tomate cv. Río Grande en la época mayo-julio. Efecto del sombreado. *Rev. Fac. Agron.(LUZ)*, 17, 173-184.
- Pardossi, A.; Carmassi, G.; Diara, C.; Incrocci, L.; Maggini, R. and Massa, D. 2011. Fertigation and Substrate management in closed soilless culture. *Euphoros*. 1a (Ed.). University of Pisa. 63 p.
- Peer WA, Bandyopadhyay A, Blakeslee JJ, et al (2004) Variation in expression and protein localization of the PIN family of auxin efflux facilitator proteins in flavonoid mutants with auxin transport in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell* 16:1898–1911. <https://doi.org/10.1105/tpc.021501>
- Pérez-Urria, E. (2009). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*. Serie Fisiología Vegetal, 2(3), 1-47.
- Pertierra Lazo, R., & Quispe Gonzabay, J. (2020). Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 118-130.
- Pratt, L., Ortega, J. M., Nieto, E., & Braly-Cartillier, I. (n.d.). *Agricultura protegida en México Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado Autores*.
- Puerta, A. R., Shinohara, Y., & Maruo, T. (2007). A modified nutrient film technique system offers a more uniform nutrient supply to plants. *HortTechnology*, 17(2), 227-233.
- Ramirez, E., & Martínez, S. T. (2016). Determinación del contenido extra e intracelular de algunas enzimas líticas relacionadas con la pared celular en raíces de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.). *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 5-11.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower (Seventh ed.)*. United States of America: CRC Press.
- Ron, M., Dorrity, M. W., De Lucas, M., Toal, T., Hernandez, R. I., Little, S. A., . . . Brady, S. M. (2013). Identification of novel loci regulating interspecific variation in root morphology and cellular development in tomato. *Plant Physiology*, 162(2), 755-768.
- Rodríguez, R. D. L., Lara-Herrera, A., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., & España-Luna, M. P. (2018). Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(SPE20), 4343-4353.
- Rodríguez-Ortega, WM, Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernández-Zapata, JC., y García-Sánchez, F. (2019). Respuestas agrícolas y fisiológicas de las plantas de

tomate cultivadas en diferentes sistemas de cultivo sin suelo con agua salina en condiciones de invernadero. Informes científicos, 9.

- Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Lozano-Gutiérrez, J., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., & Castañeda-Miranda, R. (2016). Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3439-3452.
- Reyes-Pérez, J. J., Rivero-Herrada, M., García-Bustamante, E. L., Beltran-Morales, F. A., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. *Biotecnia*, 22(3), 156-163.
- Sánchez-Del Castillo, F.; Moreno-Pérez, E. C.; Pineda-Pineda, J.; Osuna, J. M.; Rodríguez-Pérez, J. E. y Osuna-Encino, T. 2014. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*. 2(48):185-197.
- Santos, B. M., Obregón-Olivas, H. A., & Salamé-Donoso, T. P. (2010). *Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida 1 GENERALIDADES DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA*. <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Sory Toure, A., Nieto-Ángel, R., Rodríguez-Pérez, J. E., Barrientos-Priego, A. F., Ibáñez-Castillo, L. A., Romanchik, K., & Núñez-Colín, C. A. (2010). Variación anatómica del xilema en tallo de cultivares de tomate injertados en un tipo criollo. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 16(1), 67-76.
- Solarte, M. E., Moreno, L., & Melgarejo, L. M. (2010). VI. Fotosíntesis y pigmentos vegetales. En L. M. Melgarejo, *Experimentos en fisiología vegetal* (págs. 107-122). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Song, N. (2012). Evolusi fotosintesis pada tumbuhan. *Jurnal Ilmiah Sains*, 12(1), 28-34.
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology that supports the application of integrated greenhouse crop management. *Food, Agriculture and Environment*, 1(1), 80-86.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. Edición III. Editor Universitat Jaume I.
- Tomás, A. M. O., Expósito, L. D., Conesa, J. D. R. (2015). Evolución de la Fisiología Vegetal en los últimos 100 años. *Eubacteria*, 34(9): 74-82.
- Ubeda-Tomás S, Beemster GTS, Bennett MJ (2012) Hormonal regulation of root growth: Integrating local activities into global behaviour. *Trends in Plant Science* 17:326–331
- Urrestarazu, M., Mazuela, P. C., Boukhalfa, A., Arán, A., & Salas, M. d. (2005). Oxygen content and its diurnal variation in a new recirculating water soilless culture for horticultural crops. *HortScience*, 40(6), 1729-1730.

- Urbina-Sánchez, E., Cuevas-Jiménez, A., Reyes-Alemán, J. C., Alejo-Santiago, G., Valdez-Aguilar, L. A., & Vázquez-García, L. M. (2020). Solución nutritiva adicionada con NH₄⁺ para producción hidropónica de chile huacle (*Capsicum annum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(3), 291-291.
- Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., Aguilar-Ávila, J., Camacho-Vera, J. H., Ocampo-Ledesma, J. G., & Medina-Cuellar, S. E. (2018). Efficiency of small enterprises of protected agriculture in the adoption of innovations in Mexico. *Estudios Gerenciales*, 34(146), 52–62. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2811>
- Verstraeten, I., Schotte, S., & Geelen, D. (2014). Hypocotyl adventitious root organogenesis differs from lateral root development. *Frontiers in Plant Science*, 5(495).
- Villegas, J. R., Gonzalez, V. A., Carrillo, J. A., Livera, M., Sanchez, F., & Osuna, T. (2004). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a densidades de población en dos sistemas de producción. *Revista fitotecnia mexicana*, 27(4), 333-338.
- Villordon AQ, Ginzberg I, Firon N (2014) Root architecture and root and tuber crop productivity. *Trends in Plant Science* 19:419–425
- Zarza, H., Huespe, C., Mayeregger, M., Trabuco, M., Guillén, Ó., Rodas, M., & López, F. (2018). Manual básico de cultivos sin suelo para producción de tomate en invernadero. Caacupé, PY, IPTA-CONACYT.