

Eficiencia del agua en tomate cultivado en sustrato inerte

Use of *Water Efficiency in Tomato Cultivation Using Inert Substrate*



Héctor Méndez Tomalá
Rosa Pertierra Lazo
Carlos Balmaseda Espinosa

✉ <https://orcid.org/0000-0002-4494-9424>
✉ <https://orcid.org/0000-0001-8938-9849>
✉ <https://orcid.org/0000-0003-2436-7993>

Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias Agrarias | La Libertad - Ecuador | CP 240350

✉ mendez92h@gmail.com

<https://doi.org/10.26423/rctu.v10i2.753>
Páginas: 23- 34

Resumen

La provincia de Santa Elena es una zona de gran potencial productivo para diversos cultivos agrícolas. El marcado déficit hídrico y la existencia de grandes superficies de suelos degradados se consideran un desafío en la producción para sostener la seguridad alimentaria. Los cultivos sin suelo se caracterizan por un ahorro considerable de agua y figuran como alternativa en estas zonas. Se realizó una investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la solución nutritiva sobre los parámetros químicos de la solución recirculante, la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de un cultivo protegido de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) bajo un sistema de sustrato inerte (50 % cascarilla de arroz y 50 % de arena). Los tratamientos fueron establecidos bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones, se probaron tres soluciones nutritivas con recirculación: Hoagland/Arnon, Sonneveld/Voogt y Steiner. Los resultados mostraron que el pH y conductividad eléctrica en todas las soluciones nutritivas superaron los umbrales adecuados para el cultivo, y este último obligó a eliminar la recirculación. El rendimiento bruto, comercial y eficiencia del agua no mostraron diferencias significativas. En el fruto, la solución Sonneveld fue superior en cuanto al peso fresco y Steiner en el porcentaje de materia seca y sólidos solubles totales.

Palabras clave: Ahorro de agua, conductividad eléctrica, clima semiárido, hidroponía, solución nutritiva.

Abstract

The province of Santa Elena is a region with significant agricultural potential for various crops. Marked water deficit and the presence of extensive degraded soil areas pose a challenge in sustaining food security. Soilless crops are known for substantial water savings and emerge as a viable alternative in these regions. This research aimed to assess the impact of nutrient solution on the chemical parameters of the recirculating solution, water use efficiency, and yield of a protected tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.) under an inert substrate system (50% rice husk and 50% sand). Treatments were arranged in a completely randomized design with three replicates, testing three recirculating nutrient solutions: Hoagland/Arnon, Sonneveld/Voogt, and Steiner. Results revealed that the pH and electrical conductivity in all nutrient solutions exceeded the appropriate thresholds for cultivation, necessitating the discontinuation of recirculation. Gross and commercial yields, as well as water efficiency, showed no significant differences. Concerning the fruit, the Sonneveld solution exhibited superior fresh weight, while the Steiner solution excelled in dry weight percentage and total soluble solids..

Keywords: Water savings, electrical conductivity, semi-arid climate, hydroponics, nutrient solution.

Recepción: 04/10/2023 | Aprobación: 28/11/2023 | Publicación: 22/12/2023

1. Introducción

A nivel mundial el aprovechamiento del agua en muchas regiones ha alcanzado el nivel crítico, creando con la sobreexplotación de los recursos hídricos un impacto negativo en el ecosistema [1]. La agricultura registra el 72 % del consumo de agua dulce y es una de las responsables de su escasez, por tanto, se debe buscar nuevas alternativas productivas que hagan uso eficiente de la misma [2].

En Ecuador el 70 % del consumo de agua dulce es ocupado para la producción agrícola [3]; existen zonas donde el agua subterránea es la única fuente de abasto y se constituye en el recurso esencial para mantener la seguridad alimentaria, por lo que, su eficiencia debe incrementarse [4]. La eficiencia o productividad del agua se define como la relación entre la cantidad de producto cosechado por unidad de agua utilizada [5]. Se ha demostrado que la implementación de técnicas como agricultura protegida, sistemas hidróponicos han incrementado la productividad del agua significativamente [6].

A nivel nacional los datos de producción reflejan una baja productividad del recurso hídrico en diversos cultivos a campo abierto [7]. En el cultivo de tomate la mayor producción (24 730 kg ha⁻¹) se obtiene mediante invernaderos en las provincias situadas en la región Sierra, donde el riego por goteo se encuentra ampliamente difundido [8]. Los sistemas hidropónicos a escala comercial sólo existen en la provincia de Pichincha (sierra de Ecuador) [9]. En la región Costa, el cultivo de tomate a campo abierto dejó de producirse en gran escala debido al intenso ataque del díptero *Prodidiplosis longifila* [10].

Actualmente, varias provincias de la región costa entre ellas Santa Elena (clima semiárido) son consideradas zonas de alto riesgo en cuanto al marcado déficit hídrico, las precipitaciones varían de insuficientes a normales para la zona, pero éstas no cubren la demanda de los cultivos [11]. Por otra parte, el proyecto de travases que abastecería parte de la provincia de Santa Elena con los excedentes pluviométricos de la zona del Guayas no han cumplido las expectativas de cobertura del recurso hídrico [12].

Los cultivos sin suelo son una alternativa para la producción de alimentos, que permite incrementar la eficiencia del uso del agua [13]. Estos

sistemas sustituyen el suelo por sustratos o agua, proporcionando a nivel radicular un balance adecuado entre agua y oxígeno y todos los nutrientes necesarios para un óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo [14]. Además, disminuyen la cantidad de fertilizantes utilizados, se obtiene mayor producción por unidad de superficie y al ser independiente del suelo minimiza los problemas sanitarios asociados a enfermedades radiculares [15].

Los sustratos utilizados en cultivos hidropónicos han permitido masificar la producción debido a su bajo costo, larga durabilidad, fácil adquisición, ausencia de contaminantes, libre de agentes patógenos, etc. [16]. Su principal función en sostener el cultivo debido a que no presenta interacción iónica con los elementos de la solución nutritiva [17]. La nutrición de los cultivos mediante la hidroponía ha logrado un mejor aprovechamiento de nutrientes debido al suministro balanceado de los elementos esenciales [18], a su vez, existe un mejor control sobre los parámetros químicos de la solución nutritiva (pH, conductividad eléctrica, interacciones iónicas, etc.) que pueden limitar la adsorción de los elementos [19].

Frente a estos antecedentes, se realizó una investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la solución nutritiva sobre los parámetros químicos, la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de un cultivo protegido de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) bajo un sistema hidropónico en sustrato inerte.

2. Materiales y métodos

El experimento fue realizado en la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) desde enero a abril del 2018, coordenadas geográficas 2°13'56" Latitud sur y 80°52'30" Longitud oeste, 44 m.s.n.m; posee un clima semiárido, con precipitaciones anuales de 200 mm, humedad relativa de 81,6 % y temperatura ambiental de 24,5 °C. El ensayo fue establecido en una casa de cultivo construida con hierro galvanizado de 200 m² (20 x 10 m) con cubierta de polietileno UV/IR calibre 6, paredes laterales y frontales cubiertas con malla blanca 50 % de sombreo [20].

Los tratamientos consistieron en tres soluciones nutritivas propuestas por diferentes investigadores: (T1) Hoagland/Arnon, (T2) Sonneveld/Voogt, y (T3) Steiner, bajo un diseño completamente al azar (DCA) con 4 réplicas (Tabla 1).

El agua potable utilizada presentó baja salinidad 0,23 dS m⁻¹, pH neutro 7,2 y bajo contenido de nutrientes. Los niveles de sodio, cloruros y bicarbonatos fueron adecuados con 6,9, 45,5 y 53,7 mg L⁻¹, respectivamente. Las soluciones nutritivas (SN) finales se prepararon en base a varios fertilizantes de manera que cumplieran con los requerimientos de macro y micronutrientes (Tabla 2). Cada tratamiento fue preparado en solución madre 100 veces concentrada y colocadas en 3 recipientes distintos (1: Macronutrientes; 2: Micronutrientes; 3: Nitrato de calcio).

2.1. Material vegetal y sistema de producción

El material utilizado fue el híbrido indeterminado “Pietro” establecido a una densidad de 8 plantas m⁻², a distancias de 0,55 x 0,3 m entre filas y plantas respectivamente. Las plántulas con 3 hojas fueron trasplantadas en un contenedor de madera de 1,5 m de largo y 1 m de ancho recubierto con polietileno negro, en un sustrato inerte de 20 cm de espesor. La mezcla de sustrato fue 50 % de cascarilla de arroz + 50 % de arena fina de río en una proporción de 24 L planta⁻¹. Cada cama fue alimentada con tres cintas de riego y 15 goteros con un caudal de 0,96 L h⁻¹ cada uno, además se realizó un agujero de drenaje en el extremo opuesto a la entrada de agua. Plantas conducidas a un eje, se extrajeron las hojas a medida que se avanzaba con la cosecha, eliminando todo el follaje hasta 2 hojas bajo cada racimo en madurez fisiológica.

Tabla 1: Contenido de nutrientes de las soluciones nutritivas y agua potable utilizada para riego.

Formulación de Soluciones nutritivas (Tratamientos)	Elementos químicos (mMol L ⁻¹)									
	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	H ₂ PO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺⁺
Requerimiento										
Hoagland/Arnon	15	2	1			4	2	6		1
Agua de riego	0	0,05	0	0,88	1,28	1,15	0,65	0,18	0,3	0
Aporte Real	15	1,948	1	0,37	1,28	2,85	1,35	5,82	0,3	1
Requerimiento										
Sonneveld/Voogt	11	0	1,45			4	2	8		0,5
Agua de riego	0	0,05	0	0,88	1,28	1,15	0,65	0,18	0,3	0
Aporte real	11	0,05	1,45	0,17	1,28	2,85	1,35	7,82	0,3	0
Requerimiento Steiner	12	3,5	1			4,5	2	7		1
Agua de riego	0	0,05	0	0,88	1,28	1,15	0,65	0,18	0,3	0
Aporte Real	12	3,448	1	0,17	1,28	3,35	1,35	6,82	0,3	1

Tabla 2: Fertilizantes usados en las soluciones nutritivas (T1) Hoagland/Arnon, (T2) Sonneveld/Voogt, (T3) Steiner; para un cultivo de tomate cv. “Pietro” en sustrato inerte.

Fertilizantes	Dosis	Solucion nutritiva		
		Hoagland	Sonneveld	Steiner
H ₃ PO ₄	cc L ⁻¹	0,012	0,016	0,016
KNO ₃	g L ⁻¹	0,789	0,607	0,202
Ca(NO ₃) ₂	g L ⁻¹	0,673	0,673	0,791
(NH ₄)(NO ₃)	g L ⁻¹	0,040	0,000	0,040
K ₂ SO ₄	g L ⁻¹	0,000	0,000	0,436
MgSO ₄	g L ⁻¹	0,332	0,162	0,060
NH ₄ HPO ₄	g L ⁻¹	0,057	0,000	0,034
KH ₂ PO ₄	g L ⁻¹	0,000	0,204	0,000
Mg(NO ₃) ₂	g L ⁻¹	0,000	0,000	0,333
Quelato Fe	mg L ⁻¹	2,470	4,470	1,300
Sulfato Mn	mg L ⁻¹	0,500	0,750	0,620
Sulfato Cu	mg L ⁻¹	0,020	0,100	0,020
Sulfato Zn	mg L ⁻¹	0,050	0,100	0,110
Ácido Bórico	mg L ⁻¹	0,420	0,270	0,360
Molibdato de sodio	mg L ⁻¹	0,010	0,050	0,049

Se despuntaron las plantas a los 66 días después del trasplante a causa de un intenso ataque de *Protoplasma longifila* (negrita), lo que permitió cosechar y evaluar sólo hasta el tercer racimo.

2.2. Variables de la solución nutritiva

La conductividad eléctrica (CE), el potencial de hidrógeno (pH) y la temperatura fueron tomados diariamente a partir del trasplante en el estanque (500 L) de cada solución nutritiva y en el correspondiente drenaje. Los instrumentos utilizados fueron el medidor de pH Milwaukee pH55 y el medidor de conductividad eléctrica y temperatura OAKTON ECTester11. Las variables temperatura, potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas se analizaron estadísticamente en dos momentos: trasplante e inicio de floración. Estos eventos correspondieron a los 3 y 24 días después del trasplante (DDT).

2.3. Variables evaluadas a las plantas

Culminada la cosecha se sumó el peso de cada fruto producido por planta incluyendo frutos sanos y dañados para determinar el rendimiento bruto y comercial. A los frutos cosechados se le registro el peso que se obtuvo mediante una balanza digital BOECO BWL 61, mientras que el porcentaje de materia seca se determinó mediante el secado de cada fruto a 65 °C por 3 días en una estufa EquipsLab modelo GX125BE y se utilizó la ecuación 1 para calcular esta variable:

$$\%MateriaSeca = \frac{PesoSeco(g)}{PesoFresco(g)} \quad (1)$$

El potencial de hidrógeno de la pulpa del fruto se obtuvo con el medidor de pH (Milwaukee pH55) y el nivel de sólidos solubles mediante un refractómetro con rango de lectura de 0 a 32 °Brix.

2.4. Consumo y productividad del agua

El consumo del agua se determinó mediante la diferencia entre el volumen de agua suministrado vs la cantidad drenada, mientras que la productividad del agua se calculó en relación de la cantidad de producto cosechado por unidad de agua utilizada (Ecuación 2). Para el período de recirculación se consideró el volumen de agua consumida y para el período sin recirculación el de agua aplicada [20].

$$Eficiencia_{agua} \frac{kg}{m^3} = \frac{Produccion(kg)}{AguaUtilizada(m^3)} \quad (2)$$

El potencial de hidrógeno de la pulpa del fruto se obtuvo con el medidor de pH (Milwaukee pH55) y el nivel de sólidos solubles mediante un refractómetro con rango de lectura de 0 a 32 °Brix.

2.5. Análisis de variables

El análisis estadístico de las variables de las soluciones nutritivas, eficiencia de agua y de fenología del cultivo se realizaron con un intervalo de confianza del 95 % mediante el paquete estadístico Infostat v2018e. Se utilizó la prueba de Kruskal Wallis para las variables no paramétricas y prueba de Fisher para las paramétricas.

3. Resultados y discusión

3.1. Manejo de las soluciones nutritivas

La Figura 1 muestra la evolución de la CE durante el cultivo de tomate tanto los valores de la mezcla en el tanque de fertirriego como del drenaje. La conductividad eléctrica para que el cultivo de tomate exprese el 100 % de su potencial productivo debe oscilar de manera óptima entre 1,6 a 2,6 dS m⁻¹ [14]. Los niveles de salinidad registrados en el ensayo no presentaron diferencias entre tratamientos fertilizante a trasplante ni a inicio de floración (Figura 1).

La formulación Steiner superó el límite adecuado en 25 y 88 % al trasplante y plena floración, respectivamente, mientras que la solución nutritiva Hoagland/Arnon sobrepasó el umbral en 28 % a los 24 días después del trasplante. A su vez, Sonneveld/Voogt fue el tratamiento que se mantuvo más cercano al rango adecuado entre 2,72 y 2,94 dS m⁻¹.

Posterior a los 24 DDT las tres soluciones fertilizantes reflejaron un aumento de la salinidad en el tanque fertilizante y en la solución drenaje, este evento fue provocado por la recirculación de los lixiviados, lo cual coincide con lo reportado en ensayos donde probaron proporciones de drenaje de la solución nutritiva en cultivo de tomate [6]. Desde los 34 DDT se modificó el manejo del drenaje para no afectar a las plantas, alternando con reposición sólo de agua o de fertilizante según las mediciones de CE en el

lixiviado. El aumento de la conductividad eléctrica también estuvo ocasionado por la acumulación de sales menos utilizadas por las plantas y por la presencia de iones de sodio, cloruros y bicarbonatos. A pesar de la eliminación de la recirculación a partir de ese momento, la CE aumentó, posiblemente, a la falta de un lavado intenso del sustrato como evento restaurador del equilibrio iónico del mismo o por la descomposición microbiológica sufrida por el sustrato [21].

El pH de las soluciones fertilizantes se encuentra estrechamente relacionado con la disponibilidad de los nutrientes. En cultivos hidropónicos se recomienda

que los valores se encuentren entre 6,0 y 6,5 [22]. El agua potable utilizada en el cultivo tenía un pH neutro, pero un muy bajo contenido de bicarbonatos a neutralizar, lo cual impidió agregar suficiente ácido fosfórico para llegar al pH óptimo. No existieron diferencias significativas en el pH entre tratamientos, las cifras superaron levemente el rango óptimo con 7,35 hasta 7,62 a los 3 días después de trasplante y de 7,37 a 7,85 a los 24 DDT. Fue positivo que este parámetro no sufriera grandes cambios ni diferencias entre solución nutritiva y drenaje, tampoco evolucionó negativamente durante el desarrollo del cultivo (Figura 2).

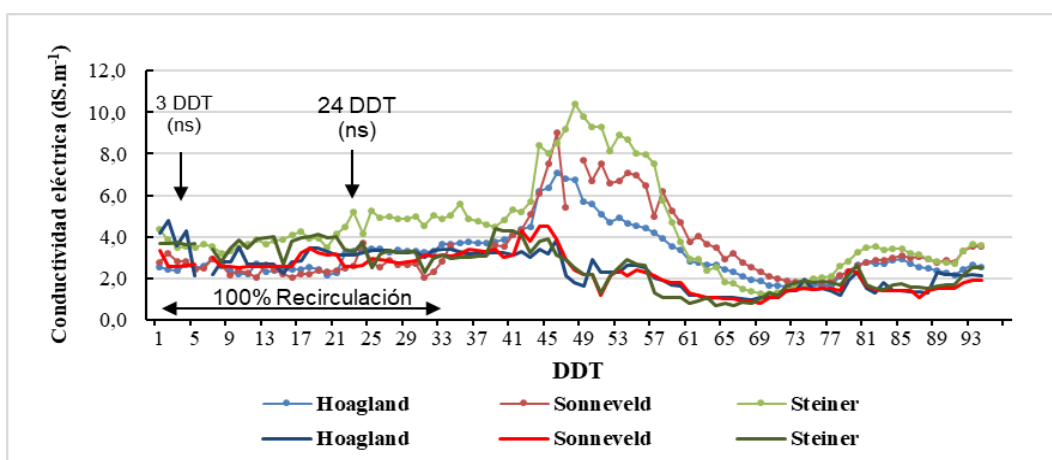


Figura 1: Dinámica de la conductividad eléctrica de la mezcla fertilizante en el estanque (líneas continuas) y del drenaje (líneas punteadas) para un cultivo de tomate cv. “Pietro” en sustrato inerte con recirculación, en la provincia de Santa Elena.

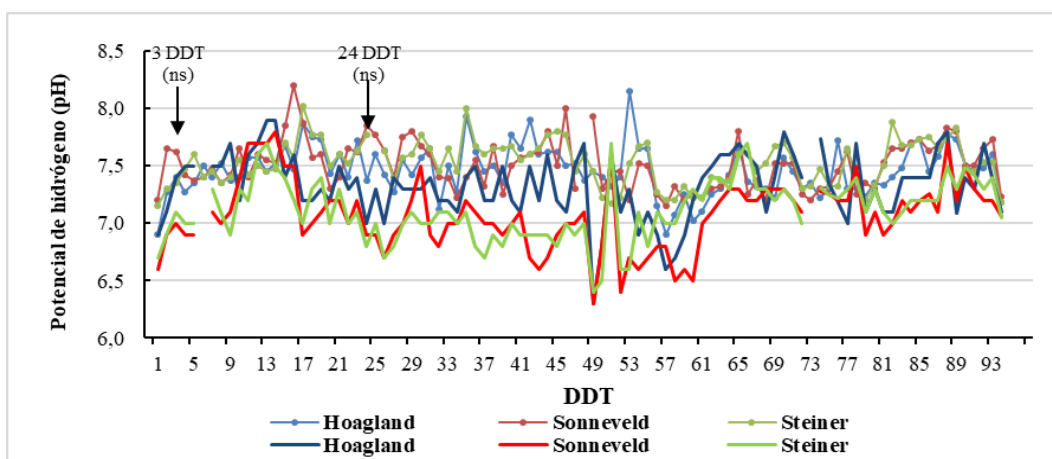


Figura 2: Dinámica del potencial de hidrógeno (pH) de la mezcla fertilizante en el estanque (líneas continuas) y del drenaje (líneas punteadas) para un cultivo de Tomate cv. “Pietro” en sustrato inerte con recirculación, en la provincia de Santa Elena.

La temperatura de la solución fertilizante tiene una relación directa con la absorción de agua y nutrientes. En condiciones hidropónicas debe estar cercana a 22 °C para la mayoría de cultivares de tomate, a temperaturas menores de 15 °C se producen problemas por deficiencia de calcio, fósforo y hierro [23]. En este caso el valor promedio durante el día fue 28,2 °C (Figura 3), por lo tanto, parece ser que la absorción de agua y nutrientes no se vio afectada. Las variaciones en la temperatura de las soluciones nutritivas, entre 24,4 y 31,6 °C, fue directamente proporcional a la temperatura dentro del invernadero.

3.2. Rendimiento y características del fruto

El rendimiento bruto y comercial hasta el tercer racimo no presentaron diferencias significativas entre las tres formulaciones fertilizantes (Tabla 3). El ataque de *Prodidiplosis longifila* (negrita) impidió cosechar los siguientes racimos, aún con aplicación de varios productos insecticidas. Este díptero se considera la principal plaga del cultivo de tomate en Ecuador [24].

Bajo estas condiciones se obtuvo para los tres tratamientos un rendimiento bruto entre 1 848,60 y 2 345,11 g planta⁻¹ y uno comercial entre 1 585,61 y 1 860,47 g planta⁻¹ (Tabla 3). Otros autores reportaron valores más elevados para el rendimiento bruto en planta con 25,2 kg m⁻², ellos confinaron 6 plantas m⁻², permitiéndoles un mejor aprovechamiento de la luminosidad, bajo un clima templado con temperaturas de 12 a 18 °C [25]. A su vez, se han registrados resultados inferiores con la solución Howard Resh,

variedad Redondo 2,99 kg m⁻² y una densidad de 4 plantas m⁻² [22].

Los valores del rendimiento comercial se consideran inferiores en comparación con tomate cultivado en condiciones protegidas con temperaturas promedio de 32 °C, densidad de plantación de 4,5 plantas m⁻² obtuvieron valores de 15 kg planta⁻¹ en 7,25 racimos con el híbrido Mirama [26]. Igualmente, no existieron diferencias para el peso de frutos desechados, el cual representó el 11 % del rendimiento bruto (Tabla 3). Las pérdidas fueron causadas por presencia de frutos partidos (cracking), con pudrición apical (blossom end rot) y en menor medida pudrición fúngica y malformaciones. Bajo otro escenario, no se encontraron para tomate diferencias para rendimiento ni desecho entre un sistema hidropónico cerrado y uno abierto [27].

Las alteraciones en el abastecimiento hídrico provocan la pérdida de frutos por agrietamiento, la pudrición apical es provocada por deficiencia de calcio, mientras que el estrés hídrico, alta radiación y alta CE también influyen en la producción [28]. La baja o alta temperatura tiene efecto en el deficiente cuajado del fruto producto de la baja viabilidad del polen, lo que se manifiesta en malformaciones [29]. Las temperaturas registradas en el interior de la nave fueron de 36,8, 23,5 y 30 °C para la máxima, mínima y media, respectivamente en los meses evaluados (enero a abril 2018), estos umbrales térmicos no se consideraron ideales ya que las óptimas para tomate fluctúan entre 20 y 30 °C durante el día y 14 a 17 °C durante la noche.

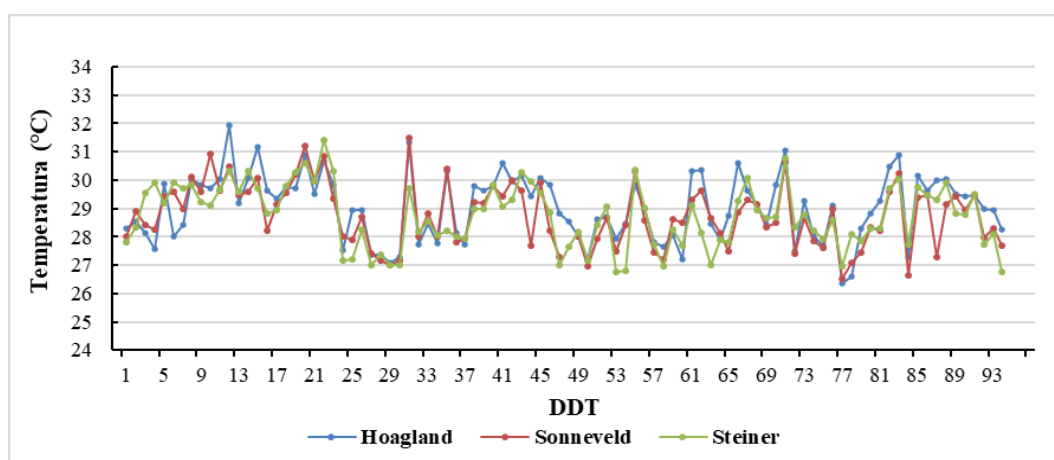


Figura 3: Dinámica de la temperatura de soluciones fertilizantes en los estanques de fertirriego para un cultivo de Tomate cv. "Pietro" en sustrato inerte con recirculación, en la provincia de Santa Elena.

3.3. Características del fruto

El efecto de las distintas formulaciones nutritivas presentó diferencias significativas sobre la cantidad de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) y materia seca del fruto de tomate. La formulación Steiner obtuvo 4° Brix en la pulpa de tomate, una concentración 14 % superior respecto a Hoagland y Sonneveld, los cuales fueron estadísticamente similares (Tabla 3). Andrés *et al.* 2017 alcanzaron un nivel de grados Brix 30 % más elevado utilizando la solución estandar, variedad Marglobe y escoria volcánica de sustrato [30]. La formulación Sonneveld/Voogt obtuvo con 4,69 % de materia seca la cifra más baja. Peña *et al.* 2013 mencionan que el porcentaje de materia seca obtenido para tomate de excelente calidad se encuentra en el rango de 4,8 a 7,0 % [31]. La cantidad de sólidos totales y materia seca del fruto fue debido a la conductividad eléctrica, estos parámetros son mayores cuando las plantas se encuentran sometidas a una salinidad superior a la deseada [32]. Esto se cumplió con la solución Steiner al poseer mayores concentraciones de sales respecto a Hoagland y Sonneveld (Figura 1).

No existieron diferencias para el pH del fruto, el cual estuvo alrededor de 4,8 para todos los tratamientos (Tabla 3), los resultados son similares a los obtenidos con solución Steiner por Rosa *et al.* 2016 [6]. Para la variable peso del fruto existieron diferencias significativas entre tratamientos fertilizantes (Tabla 3). La solución Sonneveld/Voogt obtuvo en promedio frutos de 176,76 g, cifra 21 % más elevadas respecto a Hoagland/Arnon y Steiner.

3.4. Consumo y eficiencia del agua

La cantidad de agua suministrada durante el ensayo en cada tratamiento fue de 4 793,28 L desde el trasplante a cosecha del tercer racimo (85 DDT), equivalente a $7\,988,8\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$. En promedio de los tres tratamientos fue absorbido el 58,43 % del agua por el cultivo, mientras que el 41,57 % se recolectó a través de los drenajes. Tal como se observa en la Figura 2 el consumo de agua por planta varió de una etapa fenológica a otra. Rosa *et al.* 2018 probando en tomate seis diferentes porcentajes de drenaje entre 25 y 60 %, encontraron el mejor rendimiento con 40 % de drenaje [6]. En la fase vegetativa (hasta 24 DDT) la absorción diaria promedio por planta fue 0,30 L e incrementó su volumen a partir del evento de plena floración hasta la cosecha del segundo racimo (60 DDT) con valores promedio de 1,08 L, luego volvió a descender a $0,76\text{ L planta}^{-1}$ a la cosecha del tercer racimo. La mayor tasa de absorción de agua se registró durante la cosecha del primer y segundo racimos con variaciones máximas diarias de 1,5 a $2,3\text{ L planta}^{-1}$, mientras que la absorción total en todo el ciclo hasta la cosecha del tercer racimo fue de 65,86, 74,53 y 68,90 L planta⁻¹ para los tratamientos Hoagland/Arnon, Sonneveld/Voogt y Steiner, respectivamente; frente a un volumen bruto aplicado de 119,83 L. Esto arrojó una eficiencia en el uso del agua (EA) de 18,25, 19,35 y $16,43\text{ kg m}^{-3}$, respectivamente (Tabla 4). A mayor valor más eficiente el sistema productivo. Los resultados en el consumo de agua por planta fueron similares a los obtenidos por Ruelas *et al.* 2022, quienes obtuvieron valores de $1,32\text{ L planta}^{-1}$ en la etapa de mayor demanda utilizando un sistema hidropónico con sustrato a base de tezontle rojo [33].

Tabla 3: Efecto de tres soluciones fertilizantes sobre rendimiento y características del fruto de tomate (cosecha hasta el tercer racimo) cv. Pietro, realizado en sustrato inerte con recirculación, entre enero y abril de 2018, en la provincia de Santa Elena, Ecuador.

Variables	p-Valor	CV (%)	Solución Fertilizante		
			Hoagland/ Arnon	Sonneveld/ Voogt	Steiner
Rendimiento Bruto (kg planta-1)	0,117	24,83	1848,6 a	2345,11 a	1886,21 a
Rendimiento Comercial (kg planta-1)	0,370	27,14	1585,61 a	1860,47 a	1762,14 a
Descarte (kg)	0,362	111,00	202,69 a	212,97 a	108,33 a
Peso fresco (g)	6,5E-07	32,26	149,82 b	176,76 a	141,28 b
Materia seca fruto (%)	0,0003	14,49	5,06 ab	4,69 b	5,41 a
pH fruto	0,9139	9,82	4,78 a	4,75 a	4,76 a
Sólidos totales ($^{\circ}$ Brix)	0,0000	12,04	3,60 b	3,40 b	4,00 a

Letra común dentro de las columnas, no presentan diferencias significativas (0.05).

CV= coeficiente de variación

Según la demanda hídrica promedio nacional ya mencionada de $6\,500\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ y el rendimiento nacional promedio del 2017 al 2021 de $24\,730\text{ kg ha}^{-1}$, la eficiencia del agua (EA) en Ecuador para tomate a campo abierto en suelo sería de $3,80\text{ kg m}^{-3}$ [20]. Los resultados obtenidos en el ensayo, aún sin haber llegado al final del cultivo, fueron superiores, lo cual confirma el carácter altamente ahorrativo de agua de la hidroponía como sistema cerrado o semicerrado (Tabla 4).

Pertierra *et al.* 2000 trabajando en clima templado (época seca) con distintos porcentajes de reposición de bandeja de evaporación al interior de un invernadero midieron en tomate flujos de savia entre 0,50 y 1,25 para 50 % de reposición; y 0,75 y 1,75 L planta^{-1} para 100 % de reposición, registraron además que la curva de demanda de agua diaria tuvo una distribución normal (campana de Gauss) [34]. Autores como Flores *et al.* 2017 al evaluar la evapotranspiración diaria en un cultivo de tomate registraron valores de 0,2 L planta^{-1} en la etapa inicial y una absorción máxima de 1,5 L planta^{-1} en la etapa de mayor demanda,

el volumen bruto total fue 143 L planta^{-1} . Esto le permitió lograr una eficiencia en el uso del agua de 35 kg m^{-3} , considerando el rendimiento en planta entera de tomate cv. Tequila a una densidad de siembra de $4,3\text{ planta m}^{-2}$ y roca volcánica como sustrato [35]. Esto sugiere que aplicando pulsos de riego más frecuentes y de menor duración se hubiera podido aspirar a mejores rendimientos puesto a que se lograría una mayor retención de agua y nutrientes por parte de las plantas [36].

La productividad del agua fue mayor en el período de recirculación (1 a 36 DDT) (Tabla 4). Luego el drenaje fue manejándose en función de la CE en el estanque, reponiendo alternadamente con agua hasta llegar a su total eliminación. Las formulaciones fertilizantes no registraron diferencias en la absorción de agua ni en la EA en ninguno de los períodos en que se dividió el análisis. La tendencia de mejores resultados para la formulación Sonneveld/Voogt pudo ser producto de una conductividad eléctrica más cercana al umbral adecuado, favoreciendo la absorción de agua.

Tabla 4: Eficiencia del agua en el cultivo de tomate cv. Pietro cultivado en sustrato inerte bajo tres formulaciones fertilizantes, entre enero y abril de 2018, en la provincia de Santa Elena (Ecuador).

Periodo evaluado	P-valor	CV (%)	Eficiencia del agua (kg m^{-3})		
			Hoagland	Sonneveld	Steiner
Periodo completo: Trasplante-cosecha 3er racimo	0,17	12,14	18,25 a	19,35 a	16,43 a
Periodo con recirculación: Trasplante-cosecha 1er racimo	0,58	25,24	15,21 a	16,10 a	13,83 a
Periodo sin recirculación: cosecha 2do y 3er racimo	0,58	15,47	20,65 a	22,31 a	19,41 a

Letra común dentro de las columnas, no presentan diferencias significativas con p-valor 0.05.

Nota: p-valor= Nivel de significancia; CV= coeficiente de variación

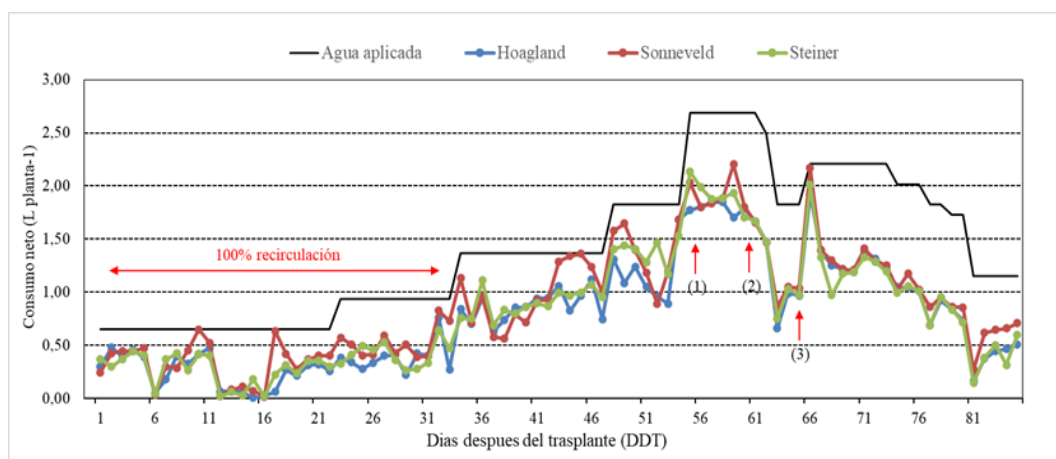


Figura 4: Agua aplicada y consumo diario de agua por planta de tomate cv. Pietro, cultivado en sustrato inerte, en la provincia de Santa Elena. Flecha indica Inicio cosecha del: (1) 1er racimo, (2) 2do racimo y (3) 3er racimo.

La EA en el período de recirculación fue inferior a la del periodo sin recirculación, ya que en éste sólo se cosechó un racimo. Mientras que el segundo período evaluado correspondió a la cosecha de dos racimos. Por tanto, esta mayor producción de frutos resultó en un mejor aprovechamiento del agua aplicada (Tabla 4). En tomate se ha reportado un ahorro de agua del 35 % en sistema cerrado respecto del abierto [37].

Reportes mexicanos comparan la EA para tomate en suelo entre campo abierto e invernadero ubicando los valores entre 7,3 y 22,1, respectivamente [35]. Para la realidad de la costa mediterránea los rangos fluctúan entre 7,4 y 17,0 para campo abierto y 24 y 27 kg m⁻³ para invernadero [38]. Las diferencias obtenidas con el presente trabajo se justifican por el corto ciclo evaluado, la baja frecuencia de riego utilizada, las diferencias tecnológicas en los diseños de los sistemas productivos y a que en este caso la casa de cultivo tenía caras laterales de malla y no de polietileno, lo cual aumentó considerablemente la transpiración de las plantas al interior de la nave, por la influencia del viento.

4. Conclusiones

La eficiencia del agua aún sin haber llegado al final del cultivo es superior a la estimada para un cultivo en suelo a campo abierto, lo cual confirma el carácter altamente ahorrativo de agua de la hidroponía como sistema cerrado o semicerrado.

La solución nutritiva con Sonneveld/Voogt es el tratamiento que se mantuvo más cercano al rango adecuado en cuanto a los parámetros químicos de la solución nutritiva, además, obtuvo mayor eficiencia del agua, mejor rendimiento bruto, comercial y peso fresco del fruto.

El incremento de la conductividad eléctrica en los lixiviados es producto de la recirculación. Este aumento obligó, en todos los tratamientos, a modificar el manejo de la recirculación del drenaje de 100 % hasta llegar a 0 % en el último tercio del cultivo.

La producción por planta se vio limitada debido al intenso ataque de *Prodiplosis longifila*, díptero que provocó pérdidas a partir del cuarto racimo, por ende, el efecto de las soluciones fertilizantes sobre el rendimiento bruto y comercial fue evaluado hasta el tercer racimo.

Es necesario realizar el lavado del sustrato como evento restaurador del equilibrio iónico debido a la acumulación de elementos no deseados a mediados del cultivo.

5. Financiamiento

El presente estudio fue financiado por la Universidad Estatal Península de Santa Elena, a través del proyecto de investigación “Sistemas de producción hidropónica: alternativa para el cambio de la matriz agroproductiva en la Península de Santa Elena, Código 91870000.0000.381020”.

6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener conflicto de interés.

7. Referencias

1. AGUILAR, C. R. B., PUÑALES, T., y BETANCOURT, Y. El manejo integrado del agua en la agricultura: Necesidad de implementación y aspectos vinculados. *Revista Científica Agroecosistemas* **5**, 40-54. [Consulta: 3 agosto 2023]. Disponible en: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/119> (2017).
2. NAVARRO, M. Nivelación de tierras: Una opción viable para el uso eficiente y gestión sustentable del agua en la agricultura. *Ingeniería y Región* **20**, 103-110. [Consulta: 1 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.25054/22161325.2504> (2018).
3. NIETO, C., PAZMIÑO, E., ROSERO, S., y QUISHPE, B. Estudio del aprovechamiento de agua de riego disponible por unidad de producción agropecuaria, con base en el requerimiento hídrico de cultivos y el área regada, en dos localidades de la Sierra ecuatoriana. *Siembra* **5**, 51-70. [Consulta: 1 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1427> (2018).

4. VIDAL, L., y MENDOZA, Á. Calidad de agua de consumo humano en las comunidades balsa en medio, Julián y Severino de la microcuenca Carrizal, Ecuador. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas* **21**, Article 42. [Consulta: 23 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v21i42.15785> (2018).
5. GONZÁLEZ, O., MONTAÑA, A., LÓPEZ, E., SÁNCHEZ, S., ZAMBRANO, D., MACÍAS, L., y HERRERA, M. Productividad del agua de riego en cultivos seleccionados de la región central de Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* **29**, 56-63. [Consulta: 5 octubre 2023]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542020000100006&script=sci_arttext&tlng=es (2020).
6. ROSA, R., LARA, A., PADILLA, L., AVELAR, J., y ESPAÑA, M. P. Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* **9**, 4343-4353. [Consulta: 29 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1003> (2018).
7. SOLANO, J., URDANETA, A., ORTEGA, C., VÁSQUEZ, E., y ALCALÁ, J. Impacto del riego por goteo subsuperficial en la eficiencia de uso del agua en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Científica Agroecosistemas* **9**, Article 1. [Consulta: 14 septiembre 2023]. Disponible en: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/450> (2021).
8. TOBAR, A. Análisis exploratorio hacia la comprensión de evolución tecnológica del riego en el Ecuador. *Revista Economía* **70**, Article 112. [Consulta: 19 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.29166/economia.v70i112.2045> (2018).
9. RUBIO, C. *Automatización de un cultivo hidropónico NFT para el control de temperatura, riego y mezcla de solución nutritiva, ubicada en la zona urbana de Quito* [bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana]. [Consulta: 14 octubre 2023]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14533> (2017).
10. CHAMORRO, S. *Diagnóstico fitosanitario en cultivos hortícolas en Santa Elena y Guayas*. [bachelorThesis, Universidad de guayaquil]. [Consulta: 10 agosto 2023]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/28996>.
11. GARCÍA, I., ROMERO, P., JIMÉNEZ, S., y JORDÁ, L. Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático. *DYNA* **84**, 37-44. [Consulta: 2 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.59600> (2017).
12. CORNEJO, C., HAMAN, D. Z., ESPINEL, R. L., y JORDAN, J. Irrigation Potential of the TRASVASE System (Santa Elena Peninsula, Guayas, Ecuador). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **132**, 453-462. [Consulta: 14 agosto 2023]. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:5\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:5(453)) (2006).
13. CASTILLO, F., MORENO, E., PINEDA, J., OSUNA, J., RODRÍGUEZ-PÉREZ, J., y OSUNA, T. Hydroponic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production with and without recirculation of nutrient solution. *Agrociencia* **48**, 185-197. [Consulta: 10 octubre 2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/289833147_Hydroponic_tomato_Solanum_lycopersicum_L_production_with_and_without_recirculation_of_nutrient_solution (2014).
14. BELTRANO, J., y GIMÉNEZ, D. *Cultivo en hidroponía* (1.a ed., Vol. 1). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). [Consulta: 14 octubre 2023]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>.
15. LÓPEZ, J. La producción hidropónica de cultivos. *Idesia* **36**, 139-141. [Consulta: 25 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005000801> (2018).

16. GUERRERO, E. M. Evaluación de sustratos bajo un sistema hidropónico en un cultivo de fresa con variables de calidad. *Informador técnico* **85**, 52-63. Disponible en: <https://doi.org/10.23850/22565035.2922> (2021).
17. SOTO, F., ARAYA, E., y ECHANDI, C. Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce 'dulcítico', en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* **44**, 43-64. [Consulta: 10 septiembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.40001> (2020).
18. URBINA, E., CUEVAS, A., REYES, J., ALEJO, G., VALDEZ, L., y VÁZQUEZ, L. Solución nutritiva adicionada con NH₄⁺ para producción hidropónica de chile huacle (*Capsicum annum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* **43**, 291-291. [Consulta: 15 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.291> (2020).
19. SALVADOR, J., BOLAÑOS, M., CEDILLO, A., VÁZQUEZ, Y., VARELA, S., y MEZA, J. Efecto de la aplicación de soluciones nutritivas en la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico de Avena sativa y Hordeum vulgare. *Terra Latinoamericana* **40**, [Consulta: 14 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.996> (2022).
20. MÉNDEZ, H. *Evaluación de fenología y rendimiento de tomate hidropónico Lycopersicon esculentum Mill, bajo distintas soluciones nutritivas en clima semiárido. Cuban Journal of Agricultural Science*, [Consulta: 1 octubre 2023]. [Tesis grado, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2019.]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/4802> (2019).
21. CASTAÑARES, J. *El ABC de la Hidroponía*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [Consulta: 25 octubre 2023]. *Espacios*. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/inta> (2020).
22. VILLACORTA, M. W. B., y TICONA, E. Efecto de dos soluciones nutritivas en dos variedades del cultivo hidropónico de tomate (*Solanum lycopersicum*) en la Estación Experimental Patacamaya. *Apthapi* **8**, 2393-2400. [Consulta: 4 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.53287/hh1b4193vy59h> (2022).
23. HERRERA, A. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana* **17**, 221-229. [Consulta: 1 julio 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317306.pdf> (1999).
24. ALVEAR, E. "Manejo integrado de Negrita (*Prodiplosis longifila*) en el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.)" [Consulta: 14 octubre 2023]. [bachelorThesis, Universidad Técnica de Babahoyo]. Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8465>.
25. ORTEGA, L., MARTÍNEZ, C., OCAMPO, J., SANDOVAL, E., y PÉREZ, B. Efficiency of substrates in soil and hydroponic system for greenhouse tomato production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **7**, 643-653. [Consulta: 12 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263145554014.pdf> (2016).
26. RIVAS, M., ALBARRACÍN, M., MORATINOS, H., y NAVAS, F. Rendimiento y calidad de fruto en cuatro cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones protegidas. *Rev. Fac. Agron. LUZ* **29**, 395-412. [Consulta: 28 octubre 2023]. Disponible en: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27063> (2012).
27. ROSA, R., LARA, A., LOZANO, J., PADILLA, L., AVELAR, J., y CASTAÑEDA, R. Yield and quality of tomato in open and closed hydroponic systems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **17**, 3439-3452. [Consulta: 16 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149506005.pdf> (2016).
28. CHAHID, S. textitEficiencia nutritiva para calcio en distintas variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.). [Consulta: 29 octubre 2023] [bachelorThesis, Universidad

- de Almería]. Disponible en: <https://repositorio.ual.es/handle/10835/6821>.
29. BACALLAO, M., y ÁLVAREZ, M. Aspectos relacionados con el estrés de calor en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales* **36**, 77-95. [Consulta: 20 octubre 2023]. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258\bibrangedash59362015000500008&script=sci_abstract (2015).
 30. MIRANDA, A., PÉREZ, M., y SIERRA, B. Evaluación de dos fuentes de fertilización, en tres sustratos sólidos bajo la técnica de hidroponía y su incidencia en el rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) variedad marglobe. *Revista Agrociencia* **1**, 6-17. [Consulta: 17 septiembre 2023]. Disponible en: <https://www.agronomia.ues.edu.sv/agrociencia/index.php/agrociencia/article/view/40> (2017).
 31. PEÑA, M., POSADA, F., y MONSALVE, O. Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y orgánicos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* **7**, 217-227. [Consulta: 18 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2236> (2013).
 32. ANTOLINOS, V., SÁNCHEZ, M., MAESTRE, J., GALLEGU, B., y MARÍN, P. *Calidad de tomate cultivado con agua desalada en sistema hidropónico. Poster*. [Consulta: 20 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.31428/10317/8667>.
 33. RUELAS, J., RUBIÑOS, J., PEINADO, L., MENDOZA, C., MARTÍNEZ, A., y ESCOBOSA, I. Consumo de agua de tomate en invernadero en función del número de tallos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* **13**, 137-147. [Consulta: 18 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3269> (2022).
 34. PERTIERRA, R., JARA, J., SUAREZ, M., Celis, J., y REYES, F. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) growth in greenhouse under two irrigation levels: Sap flow, growth and yield. *Ciencia e Investigacion Agraria (Chile)* **27**, 161-168. [Consulta: 14 octubre 2023]. Disponible en: <http://repository.ou.ac.lk/bitstream/handle/94ousl/948/JETOUSL-Vol11-No2-01.pdf?sequence=1> (2000).
 35. FLORES, J., OJEDA-BUSTAMANTE, W., LÓPEZ, I., ROJANO, A., y SALAZAR, I. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Tierra Latinoamericana* **25**, 127-134. [Consulta: 14 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57325204.pdf> (2017).
 36. HONGOLO, E., PEREZ, Y., y CRUZ, R. Evaluación del riego superficial en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Avances* **22**, 194-207. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005000801> (2020).
 37. SÁNCHEZ, F., MORENO, E., PINEDA, J., OSUNA, J., RODRÍGUEZ, J., y OSUNA, T. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) Con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* **48**, 185-197. [Consulta: 6 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/302/30230743005.pdf> (2014).
 38. GALLARDO, M., FERNÁNDEZ, M., THOMPSON, R., y MAGNA, J. Productividad del agua en cultivos bajo invernadero en la costa mediterránea. *Vida rural* **259**, 48-51. [Consulta: 14 agosto 2023]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2475816> (2007).



Artículo de **libre acceso** bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.