



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA  
INSTITUTO DE HORTICULTURA**

**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE RECIRCULACIÓN DE  
SOLUCIÓN NUTRITIVA PARA EL CULTIVO DE JITOMATE  
MANEJADO EN ALTA DENSIDAD DE POBLACIÓN**

**TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

**Presenta:**

**ALAN CABAÑAS DÍAZ**



**Bajo la dirección del Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez**

**Chapingo Estado de México, mayo de 2020**



**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE RECIRCULACIÓN DE SOLUCIÓN  
NUTRITIVA PARA EL CULTIVO DE JITOMATE MANEJADO EN ALTA  
DENSIDAD DE POBLACIÓN**

Tesis realizada por **Alan Cabañas Díaz**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**



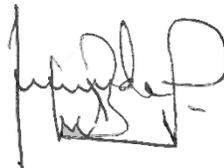
DIRECTOR: \_\_\_\_\_

Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez



ASESOR: \_\_\_\_\_

Dr. Felipe Sánchez del Castillo



ASESOR: \_\_\_\_\_

Dr. Joel Pineda Pineda

Chapingo, Estado de México, mayo de 2020

## CONTENIDO

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE CUADROS .....   | vi  |
| AGRADECIMIENTOS.....   | ix  |
| DEDICATORIA .....  | x   |
| DATOS BIBLIOGRÁFICOS .....   | xi  |
| RESUMEN.....   | xii |
| I. INTRODUCCIÓN .....  | 1   |
| 1.1. Objetivos .....   | 3   |
| 1.2. Hipótesis.....  | 3   |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA.....                                      | 4   |
| 2.1. Generalidades del jitomate.....                                 | 4   |
| 2.2. Importancia económica del jitomate .....                        | 6   |
| 2.3. Invernaderos y sistemas hidropónicos en México .....            | 6   |
| 2.4. Requerimientos climáticos.....                                  | 7   |
| 2.4.1. Luz.....  | 7   |
| 2.4.2. Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....                   | 7   |
| 2.4.3. Temperatura .....   | 8   |
| 2.4.4. Humedad relativa.....   | 9   |
| 2.5. Requerimientos nutricionales .....                              | 9   |
| 2.5.1. Función de los macronutrientes minerales en las plantas ..... | 10  |
| 2.6. Hidroponía.....   | 15  |
| 2.6.1. Definición y concepto.....                                    | 15  |
| 2.7. Solución nutritiva hidropónica.....                             | 16  |
| 2.8. Sustratos hidropónicos .....                                    | 19  |
| 2.8.1. Propiedades físicas de los sustratos.....                     | 20  |
| 2.8.2. Propiedades químicas de los sustratos .....                   | 23  |
| 2.9. Arena de tezontle como sustrato.....                            | 25  |
| 2.9.1. Propiedades físicas y químicas del tezontle .....             | 26  |

|  |    |
|--|----|
| 2.10. Sistemas hidropónicos abiertos y cerrados .....                      | 26 |
| 2.11. Eficiencia en el uso de agua y nutrientes .....                      | 29 |
| 2.12. Sistema convencional y alternativo en la producción de jitomate..... | 30 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 32 |
| 3.1. Localización del experimento .....                                    | 32 |
| 3.2. Establecimiento del experimento.....                                  | 32 |
| 3.3. Tratamientos .....  | 35 |
| 3.4. Conducción del experimento .....                                      | 37 |
| 3.5. Variables morfológicas .....  | 39 |
| 3.6. Variables de peso seco .....  | 39 |
| 3.7. Variables del rendimiento y sus componentes .....                     | 40 |
| 3.8. Variables del balance nutrimental (N, P, K, Ca, Mg y S) .....         | 40 |
| 3.9. Diseño experimental y tratamientos .....                              | 43 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 44 |
| 4.1. Variables morfológicas .....  | 44 |
| 4.2. Variables de peso seco .....  | 45 |
| 4.3. Variables del rendimiento y sus componentes .....                     | 47 |
| 4.4. Variables relacionadas con el consumo de agua y balance nutrimental   | 49 |
| 4.4.1. Gasto en agua y macronutrientes durante el ciclo de cultivo.....    | 49 |
| 4.4.2. Macronutrientes absorbidos por la planta .....                      | 51 |
| 4.4.3. Macronutrientes solubles contenidos en los drenajes.....            | 53 |
| 4.4.4. Macronutrientes resolubilizados del sustrato .....                  | 55 |
| 4.5. Balance final de macronutrientes en el sistema .....                  | 56 |
| 4.5.1. Balance final de nitrógeno .....                                    | 57 |
| 4.5.2. Balance final de fósforo .....                                      | 58 |
| 4.5.3. Balance final de potasio .....                                      | 60 |
| 4.5.4. Balance final de calcio .....                                       | 61 |
| 4.5.5. Balance final de magnesio.....                                      | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 4.5.6. Balance final de azufre .....                 | 63 |
| 4.6. Eficiencia en el uso de agua y nutrientes ..... | 64 |
| 4.7. Análisis económico.....                         | 66 |
| V. CONCLUSIONES.....                                 | 68 |
| VI. LITERATURA CITADA .....                          | 70 |

## LISTA DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística de caracteres morfológicos de jitomate a los 59 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                            | 44 |
| Cuadro 2. Comparación de medias de caracteres morfológicos de jitomate a los 59 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....   | 45 |
| Cuadro 3. Cuadrados medios y significancia estadística de variables de peso seco por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                 | 46 |
| Cuadro 4. Comparación de medias de variables de peso seco (g) por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                    | 46 |
| Cuadro 5. Cuadrados medios y significancia estadística de variables de rendimiento en jitomate con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....  | 49 |
| Cuadro 6. Comparación de medias de variables de rendimiento en jitomate con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....   | 49 |
| Cuadro 7. Gasto de agua en litros y macronutrientes en g aplicados por planta y (m <sup>2</sup> ) de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. .... | 51 |
| Cuadro 8. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes absorbidos por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....             | 53 |
| Cuadro 9. Macronutrientes absorbidos por planta de jitomate en g y (%) en tejido vegetal a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                | 53 |
| Cuadro 10. Macronutrientes solubles drenados (g por planta de jitomate) durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                       | 54 |
| Cuadro 11. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes resolubilizados del sustrato por planta de jitomate durante 110 días de   |    |

|  |    |
|--|----|
| trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....   | 55 |
| Cuadro 12. Macronutrientes resolubilizados del sustrato (g por planta de jitomate) durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....  | 56 |
| Cuadro 13. Balance de nitrógeno en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                  | 58 |
| Cuadro 14. Balance de fósforo en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                    | 59 |
| Cuadro 15. Balance de potasio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                    | 60 |
| Cuadro 16. Balance de calcio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                     | 61 |
| Cuadro 17. Balance de magnesio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                   | 62 |
| Cuadro 18. Balance de azufre en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                     | 63 |
| Cuadro 19. Eficiencia del sistema en el uso de agua para producir un kg de fruto de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                | 65 |
| Cuadro 20. Eficiencia del sistema en el uso de macronutrientes (g aplicados en la producción de un kg de fruto) en jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. .... | 66 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Interior del invernadero donde se implementó el experimento. ....   | 32 |
| Figura 2. Camas de cultivo forradas con polietileno negro y tubería de PVC ranurada para la conducción de la solución nutritiva drenada. ....   | 33 |
| Figura 3. Charolas de poliestireno de 60 cavidades con volumen de 250 ml por cavidad utilizadas para la producción de plántulas. ....   | 33 |
| Figura 4. Plántula de jitomate en etapa de semillero lista para su trasplante. ..   | 34 |
| Figura 5. Tinacos de 5,000 litros utilizados para preparar solución nutritiva. ....   | 36 |
| Figura 6. Tinacos de 1,000 litros utilizados para la colecta de la solución drenada. ....   | 37 |
| Figura 7. Plantas de jitomate despuntadas al tercer racimo y en alta densidad de población. ....  | 38 |
| Figura 8. Método de microkjeldahl para la determinación de nitrógeno. ....  | 41 |
| Figura 9. Embudos de cerámica y extractor para digestión de muestras en el laboratorio. ....  | 42 |
| Figura 10. Distribución de peso seco por órgano en planta de jitomate a los 101 días después de del trasplante para diferentes métodos de recirculación de solución nutritiva. ....                                     | 47 |
| Figura 11. Costo de fertilizante (pesos por kg de fruto) en diferentes métodos de recirculación de solución nutritiva para producir un kg de fruto de jitomate manejado a 110 días de trasplante a fin de cosecha. .... | 66 |

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado del Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, por brindarme todas las facilidades para la realización de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, por sus grandes aciertos en la dirección de la presente tesis.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo y al Dr. Joel Pineda Pineda, por sus valiosas contribuciones y asesorías para la realización de este trabajo.

Al profesor José Cutberto, por su apoyo y aportaciones hechas en la parte de análisis nutrimental.

A mis profesores del posgrado, por todos los conocimientos que me transmitieron durante las clases con gran vocación y entusiasmo.

A mis compañeros y amigos de generación, de quienes aprendí mucho.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido a la realización de esta tesis.

Muchas Gracias.

## DEDICATORIA

*A mi padre Lorenzo José Cabañas Guerrero quien me inspira siempre a ser mejor.*

*A mi madre Esther Díaz Huerta, por su amor incondicional.*

*A mis hermanos Miguel, Omar, Sara y Dania a quienes quiero mucho.*

*† A mi tío Israel Díaz Huerta en donde quiera que se encuentre le dedico este logro.*

*A Rosario, por todo su cariño y por el apoyo que me brindo en esta nueva aventura.*

*Los amo.*

## **DATOS BIBLIOGRÁFICOS**

Nombre: Alan Cabañas Díaz  
Fecha de nacimiento: 01 de febrero de 1993  
Lugar de nacimiento: Ciudad de México, México  
Profesión: Ingeniero Agrónomo

### **Desarrollo académico**

Licenciatura  
2012-2016  
Licenciatura como Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

Maestría  
2018-2020  
Maestría en Ciencias en Horticultura. Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

## RESUMEN

### **Evaluación de métodos de recirculación de solución nutritiva para el cultivo de jitomate manejado en alta densidad de población**

En México, el Jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza que más se maneja en invernadero y sistemas hidropónicos, siendo además de alto consumo y de gran importancia económica. Para su cultivo en sistemas hidropónicos se utilizan fertilizantes altamente solubles de costo elevado, mismo que ha aumentado en los últimos años, aunado a ello, el agua es un recurso cada vez más limitado en nuestro país, por lo que se han implementado sistemas de recirculación de la solución nutritiva para solventar esta problemática; sin embargo, con el manejo del jitomate en un ciclo largo (un solo ciclo al año) como normalmente se practica, es difícil recircular la solución nutritiva, ya que los nutrientes se desequilibran conforme avanza el ciclo del cultivo afectándose la calidad y el rendimiento.

Con base en lo anterior, se llevó a cabo la presente investigación con el objetivo de evaluar diferentes métodos de recirculación de la solución nutritiva y un sistema abierto, en el comportamiento agronómico de jitomate manejado en alta densidad de población con plantas despuntadas al tercer racimo.

Se evaluaron tres métodos de recirculación de solución nutritiva y el testigo (sin recirculación), los métodos fueron: recirculación sin análisis de los drenajes, recirculación con análisis de los drenajes y recirculación según la absorción teórica de nutrientes. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y siete repeticiones. Las variables evaluadas fueron área foliar, grosor de tallo, altura de planta, peso seco de planta, número de frutos, peso medio de frutos y rendimiento por unidad de superficie, además, se hizo análisis del balance nutrimental, así como de la eficiencia de agua y nutrientes.

Se encontró que tanto en las variables morfológicas como en las de peso seco y del rendimiento no hubo diferencias entre los distintos tratamientos, lográndose rendimientos del orden de 11.13 a 12.71 kg por m<sup>2</sup> de invernadero en un periodo de 110 días de trasplante a fin de cosecha. Sin embargo, recirculando la solución nutritiva se ahorró 20 % de agua y hasta 16.5 % de nitrógeno, fósforo y potasio y 35.1, 38.9 y 41.3 % de magnesio, calcio y azufre, respectivamente, comparado con el sistema abierto. Con los métodos de recirculación se tuvo por concepto de fertilizantes un costo de 1.12 a 1.25 pesos por kg de fruto producido, con lo que se podrían tener ahorros de 18,130 a 64,150 pesos/ha/año. Aunque estos ahorros no fueron tan relevantes, el uso de los sistemas cerrados tiene beneficio desde un punto de vista ambiental y se justifica para zonas donde el agua es un factor que limita la producción.

Se concluye que, con el manejo de las plantas de jitomate en alta densidad de población y despunte para cosechar solamente tres racimos, en un ciclo de 110 días de trasplante a fin de cosecha, es posible utilizar cualquiera de los tres métodos de recirculación de solución nutritiva evaluados sin que se presenten desbalances nutricionales, de manera que, al comparar estos métodos con un sistema abierto, no se modificaron las variables de peso seco y tampoco se afectó el rendimiento.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., sistemas hidropónicos, recirculación de solución nutritiva, eficiencia del uso de agua y nutrientes.

## ABSTRACT

### **Evaluation of recirculation methods of nutrient solution in high plant density tomato production (*Solanum lycopersicum L.*)**

Tomato (*Solanum lycopersicum L.*) is the most important vegetable grown in greenhouses using hydroponic systems in México, as well as being of high consumption and economic importance. Thus, tomato production in hydroponic systems, needs highly soluble fertilizers which are expensive, increasing prices in recent years. In addition to this, water has become a limited resource in our country, therefore, recirculation systems of nutrient solutions have been implemented in order to solve the problem. Tomato management is normally in a long cycle (one cycle per year), thus a recirculating nutrient solution system, turns hard as nutrients become unbalanced according to the long crop cycle development. Therefore, quality and yield are affected.

Based on this, the objective of the present investigation was to evaluate different methods of nutrient solution recirculation in an open system in the agronomic behavior of tomato under high plant density with plants trimmed to the third cluster.

Three nutrient solution recirculation methods and the control (without recirculation) were evaluated; the methods were: recirculation without drainage analysis, recirculation with drainage analysis, and recirculation according to the theory of nutrients absorption. A randomized complete block design with four treatments and seven replications was used. The variables evaluated were leaf area, stem thickness, plant height, plant dry weight, number of fruits, average fruit weight and yield per unit area. In addition, a nutritional balance analysis, as well as the efficiency of water and nutrients were made.

Results indicated that there were no differences in morphological, dry weight and yield variables among the different treatments. Yields in the order of 11.13 to 12.71 kilograms per square meter in greenhouse were achieved in a period of 110 days from transplant to end of harvest. Recirculating the nutrient solution saved 20 % of water and up to 16.5 % of nitrogen, phosphorus and potassium, and 35.1, 38.9 and 41.3 % of magnesium, calcium and sulfur, respectively, compared to the open system. With recirculation methods, the cost of fertilizers was 1.12 to 1.25 pesos per kilogram of fruit produced, which can lead to savings of 18,139 to 64,150 pesos per hectare per year. Although these savings were not relevant, closed systems represent an environmental benefit and it is justified for areas where water is a factor that limits production.

In conclusion, for the management of tomato in a high plant density with plants trimmed to the third cluster, in a cycle of 110 days from transplant to end of harvest, it is possible to use any of the three evaluated methods of nutrient solution recirculation without nutritional imbalances. Compared to an open system, plant dry weight variables were not modified, neither yield was affected.

**Key words:** *Solanum lycopersicum L.*, hydroponic systems, recirculation of nutrient solution, water and nutrients efficiency.

## I. INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas que más se manejan bajo condiciones de invernadero y en sistemas hidropónicos (SIAP, 2018). Ambas tecnologías permiten alto grado de control ambiental que favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas, con lo que se puede lograr el mayor rendimiento y calidad posibles. Por ello, su uso ha crecido grandemente tanto en México como a nivel mundial, ganándole terreno a la producción en suelo y cielo abierto, donde por las condiciones restrictivas existentes, se genera poco rendimiento y baja calidad de los productos cosechados (Raviv y Lieth, 2008; Pérez y Castro, 2011; Sánchez y Moreno, 2017).

No obstante, los sistemas hidropónicos con sustrato, como convencionalmente se manejan, tienen el inconveniente de que se emplean fertilizantes generalmente de costo elevado, mismo que se ha incrementado notablemente en los últimos años (Huang, 2009). Aunado a ello, el agua es también un recurso natural cada vez más limitado para la agricultura y su implementación en sistemas hidropónicos requiere que sea usada de manera muy eficiente (Salazar *et al.*, 2014).

En casi la totalidad de los sistemas hidropónicos que utilizan sustrato, se aplica el riego por goteo con una solución nutritiva que contiene los nutrientes minerales esenciales en concentraciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, dicha solución nutritiva debe estar en forma iónica, tener un balance equilibrado entre cationes y aniones y, para la mayoría de hortalizas, un pH de 5.5 a 6.5 y una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 dS/m (Adams, 2004).

En los sistemas de producción con sustrato, debido a la constante absorción selectiva de nutrientes por la raíz, la solución nutritiva aportada con el riego se va desequilibrando rápidamente. Para mantener la concentración y balance de nutrientes minerales en la rizósfera se recurre a riegos frecuentes y con un cierto porcentaje de sobre-riego a fin de restaurar ese equilibrio (Marfá, 2000).

El sistema hidropónico es abierto cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero, y es un sistema cerrado si la solución nutritiva se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste del pH, CE y nutrimentos (Canovas, 2003). En la mayoría de las unidades de producción con hidroponía en México, se utilizan sistemas abiertos, con lo que se tienen pérdidas considerables de agua y fertilizantes, además que, en instalaciones grandes se puede afectar negativamente el manto freático (Alarcón, 2006).

Si la solución nutritiva que drena se reutiliza (sistemas hidropónicos cerrados) para volverse a aplicar al cultivo, previa esterilización, ajuste de pH, CE y concentración de nutrientes, además de tener un ahorro económico de agua y fertilizantes, el daño ambiental sería menor, al evitar que grandes cantidades de nutrientes minerales contaminen ríos, lagos, mantos freáticos o mares (Pardossi *et al.*, 2006; Nakano *et al.*, 2010).

El problema principal con los sistemas cerrados es que, con el paso del tiempo, ocurre un desbalance de la solución nutritiva drenada debido a la acumulación de iones menos consumidos por la planta ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), lo que rompe el equilibrio de nutrientes, y en la mayoría de las veces incrementa la CE en el drenaje a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento final (Tunali *et al.*, 2009; Van Os, 2009), sobre todo cuando se manejan ciclos de cultivo tan largos como es el manejo convencional del jitomate en México, en el que se establece un ciclo de cultivo que puede durar un año (Sánchez *et al.*, 2014a). Por otra parte, con los sistemas cerrados también existe un alto riesgo de dispersión de enfermedades que atacan a la raíz.

Para que los sistemas cerrados se puedan implementar con mayor probabilidad de éxito y aprovechar sus ventajas, es conveniente buscar formas de manejo sencillas para el productor, sin reducir el rendimiento o la calidad.

Una estrategia para disminuir los riesgos de alteraciones en la CE, desequilibrios nutricionales o dispersión de enfermedades, sería producir con ciclos de cultivo

muy cortos como lo proponen Sánchez *et al.* (2014b); sin embargo, hacen falta estudios concretos para saber cómo debe ser el manejo.

### **1.1. Objetivos**

La presente investigación se llevó a cabo con el objetivo de comparar diferentes métodos de recirculación de la solución nutritiva contra un sistema abierto, en relación al comportamiento agronómico de jitomate manejado en alta densidad de población con plantas despuntadas al tercer racimo.

Particularmente se pretende:

1. Comparar el rendimiento de jitomate que se obtiene con diferentes métodos de recirculación de la solución nutritiva en relación a un sistema abierto.
2. Definir un método práctico de recirculación de la solución nutritiva que permita mantener el equilibrio nutricional a lo largo de un ciclo de cultivo de menos de cuatro meses de trasplante a fin de cosecha en jitomate.
3. Determinar el ahorro en agua y nutrientes que se puede lograr con la recirculación de la solución nutritiva respecto a un sistema abierto.
4. Evaluar la eficiencia en el uso del agua y nutrientes de los diferentes métodos de aplicación de la solución nutritiva.
5. Evaluar la rentabilidad económica que se puede lograr al emplear diferentes métodos de recirculación de la solución nutritiva, con respecto a un sistema abierto.

### **1.2. Hipótesis**

Con el sistema de manejo de plantas de jitomate en alta densidad de población y despunte al tercer racimo, se puede utilizar un método de recirculación de solución nutritiva, con el que se podrá tener ahorros en agua y fertilizantes, respecto a un sistema abierto, sin que se afecte el rendimiento final, en virtud de que la solución nutritiva no presentará desequilibrios nutricionales por lo corto del ciclo de producción.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades del jitomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia de las *Solanáceas*, aunque puede tener un ciclo de vida mayor a un año, su cultivo es anual. Tiene limitado su crecimiento apical en las variedades determinadas e ilimitado en las variedades indeterminadas; se desarrolla en forma rastrera, semierecta o erecta, pudiendo llegar, en las variedades indeterminadas hasta 10 m en un año (Muñoz, 2009).

Su fruto es una baya típica, de forma variable entre esférica y cilíndrica, la cual en su madurez presenta un pericarpio carnoso con dos o más lóculos y una placenta con una parte carnosa en el centro y otra más gelatinosa que llena parcialmente los lóculos, donde se encuentran las semillas (Carravedo, 2006).

Las semillas tienen forma lenticular con dimensiones aproximadas de 5 x 4 x 2 mm y están conformadas por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal. El embrión, cuyo desarrollo da lugar a la planta adulta, está constituido, a su vez, por una yema apical, dos cotiledones, el hipocótilo y la radícula. El endospermo contiene los elementos nutritivos necesarios para el desarrollo inicial del embrión. La testa o cubierta seminal está constituida por un tejido duro e impermeable, recubierto de pelos, que envuelve y protege el embrión y el endospermo (Chamarro, 2001; Cepeda, 2009; Muñoz, 2009). Las semillas pueden conservarse hasta por 12 años en condiciones de refrigeración y recipiente sellado, no obstante, en climas tropicales solamente tienen viabilidad entre 3 y 4 años; se considera buena calidad de semilla cuando alcanza entre 85 y 95 % de germinación (Durán, 2010).

Su sistema radicular consiste en una raíz principal pivotante que crece alrededor de 3 cm al día hasta alcanzar aproximadamente 60 cm de profundidad, y simultáneamente crecen raíces adventicias y ramificaciones secundarias que llegan a formar una masa densa y de gran volumen. Sin embargo, este sistema radicular, que surge cuando la planta se origina de una semilla, puede ser

modificado por las prácticas culturales empleadas (Rodríguez *et al.*, 1997). Así, cuando la planta procede de trasplante, bajo condiciones de cultivo sin suelo y con sistema de riego por goteo, la mayor parte de éstas tienden a concentrarse en torno a la salida del emisor de la cintilla de riego (Pérez y Castro, 2011).

Su tallo es herbáceo y de superficie angulosa, con pelos agudos y otros glandulares capitados, cuya esencia confiere su aroma característico a la planta. El tallo principal forma de 6 a 12 hojas antes de que la primera inflorescencia sea formada; este tipo de crecimiento se llama ramificación monopodial, dicho tallo termina en la primera inflorescencia, la cual es desplazada lateralmente por el brote correspondiente a la axila de la hoja siguiente, que viene a ocupar la dirección principal, esto se repite con cada nueva inflorescencia cuyo resultado es una ramificación simpodial. De manera general, el tallo principal crece en forma continua con inflorescencias internodales cada tres hojas (Folquer, 1979; Flórez *et al.*, 2012).

Sus hojas son compuestas y alternas, bipinatisectas y pecioladas, con una longitud de entre 10 y 25 cm. Los segmentos foliares son de borde lobulado, ovales y acuminados. Normalmente aparecen tres hojas entre dos racimos en los híbridos de jitomate de crecimiento indeterminado (Pérez y Castro, 2011). El limbo se encuentra fraccionado en siete, nueve y hasta once folíolos (Rodríguez *et al.*, 1997).

Sus flores son hermafroditas, actinomorfas y péndulas, con una coloración amarillo brillante y 1 a 2 cm de largo. El cáliz está formado por cinco a diez segmentos, lineales a lanceolados y persistentes. Su tamaño va aumentando a medida que se desarrolla el fruto. La corola es rotada, con el tubo corto, dividida en cinco o más lóbulos, con numerosos pelos glandulares en la cara dorsal, cinco o más estambres adheridos al tubo de la corola, de filamentos cortos y anteras dehiscentes por hendiduras longitudinales. El pistilo es único, formado por la unión de cinco a seis carpelos. El ovario es bilocular con la placenta central carnosa. Los pedicelos presentan un pequeño estrangulamiento en la parte media que corresponde a la zona de abscisión (Pérez y Castro, 2011). Las flores

de las variedades cultivadas se agrupan en inflorescencias simples o ramificadas (Blancard, 2011). El tipo simple se presenta con más frecuencia en la parte baja de la planta y los tipos ramificados en la parte superior.

## **2.2. Importancia económica del jitomate**

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), es una de las hortalizas de mayor consumo en todo el mundo y de gran importancia económica en México. El volumen cosechado en el año 2017 fue de 3,469,707 toneladas, con lo cual México ocupó el lugar número 10 en producción mundial. Los Estados con mayor producción fueron Sinaloa, San Luis Potosí, Baja California, Michoacán, Jalisco y Zacatecas; los tres primeros generan anualmente casi 10 mil millones de pesos por su venta (SIAP, 2018). De acuerdo con FIRA (2017) actualmente se siembran alrededor de 60,000 ha de jitomate; de éstas, al menos 20,000 ha corresponden a siembras en invernaderos y casa sombra (Sánchez y Moreno, 2017).

## **2.3. Invernaderos y sistemas hidropónicos en México**

La producción de cultivos en suelo y a cielo abierto es de alto riesgo debido a los factores bióticos y abióticos desfavorables que imperan, por lo que la tecnología de invernaderos e hidroponía en México está creciendo ampliamente, ya que permiten minimizar las restricciones y efectos negativos de dichos factores (Moreno *et al.*, 2011; Pérez y Castro, 2011).

El incremento de superficie de invernaderos en México se ha establecido en los últimos años en 12 %, aunque en el periodo comprendido del año 2000 al 2005 fue de 600 % al pasar de 340 a 7,000 ha. Este rápido crecimiento ha originado un gran impacto en la economía de producción (Flores y Ojeda, 2016). Actualmente la superficie de invernaderos con hidroponía supera las 12,000 ha y su distribución se encuentra principalmente en los estados de Jalisco, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Michoacán (Sánchez y Moreno, 2017).

## **2.4. Requerimientos climáticos**

### **2.4.1. Luz**

El factor luz tiene gran relevancia sobre la fotosíntesis, crecimiento de los tejidos, floración y maduración de los frutos. Sus niveles óptimos varían de acuerdo a la etapa de desarrollo en que se encuentre la planta (Rodríguez *et al.*, 1997; Pérez y Castro, 2011). De acuerdo con Sánchez y Moreno (2017) para hortalizas de fruto, como el jitomate, los rangos óptimos de luz en etapa de plántula van de 600 a 900  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , mientras que para la etapa vegetativa y reproductiva el rango está entre 1,200 y 1,500  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ .

Valores inferiores a los antes mencionados, pueden influir negativamente en el crecimiento y desarrollo de la planta (Cepeda, 2009). Al parecer, una alta intensidad de luz en combinación con bajas temperaturas, favorece la división de los racimos y una mayor cantidad de flores en cada uno de éstos (Flórez *et al.*, 2012).

### **2.4.2. Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El CO<sub>2</sub> es el sustrato para la fotosíntesis, por lo tanto, su concentración más alta en el ambiente y la mayor difusión en las hojas aumentan el contenido de materia seca en las plantas (Heuvelink y Dorais, 2005).

Se encuentra en el aire a una concentración pequeña (entre 0.5 y 0.6 g por m<sup>3</sup>), pero muy estable, debido al equilibrio ecológico conocido como ciclo del carbono, en donde el mar actúa como fuente de restablecimiento a lo consumido por las plantas. Sin embargo, durante el día y dentro de un invernadero, la concentración de esta molécula puede bajar a menos de la mitad, como consecuencia de su consumo por las plantas en la fotosíntesis. Lo que ocurre principalmente con plantas en condiciones de abundante follaje y rápido crecimiento, acrecentándose en los meses de invierno, cuando debido a las bajas temperaturas no es posible airear suficientemente los invernaderos. Esto se vuelve un factor limitante de la velocidad de fotosíntesis y del crecimiento del

cultivo, aun cuando los demás factores ambientales se manejen dentro de rangos óptimos (Flórez *et al.*, 2012; Sánchez y Moreno, 2017).

Pérez y Castro (2011) mencionan que, aunque la fotosíntesis y por lo tanto el rendimiento del cultivo aumenta con concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores a las encontradas en el ambiente, su aplicación no suele ser económicamente rentable en México, a más de 500 ppm.

### **2.4.3. Temperatura**

La temperatura influye en todas las funciones vitales de la planta como la transpiración, fotosíntesis, biosíntesis, germinación, etc., teniendo en cada momento de su ciclo biológico una temperatura óptima. Para el jitomate, las temperaturas óptimas de manera general según su ciclo de vida van de 15 a 18 °C en la noche y 24 a 25 °C en el día; para la floración la temperatura óptima es de 21 °C y para el desarrollo vegetativo entre 22 y 23 °C (Rodríguez *et al.*, 1997).

De acuerdo con Velasco *et al.* (2012) en germinación se requieren 25 a 28 °C; por debajo de 10 °C la semilla no germina o lo hace muy desuniformemente. La temperatura óptima para el crecimiento está entre 21 y 26 °C; en la etapa de floración durante el día se requieren de 23 a 26 °C y en la noche de 15 a 18 °C; temperaturas mayores a 28 °C reducen el número de flores y racimos por planta, las flores se desarrollan pequeñas y pueden caer sin ser polinizadas debido a la falta de carbohidratos que consumen las partes vegetativas. Con temperaturas del día mayores de 35 °C el polen se deshidrata, y de 22 °C por la noche, el pistilo se prolonga de manera anormal situándose por encima de los granos de polen antes de que las anteras se abran. Estos factores reducen la polinización ocasionando poco amarre de frutos, siendo éstos desuniformes.

Cuando los niveles de luz descienden por tiempo prolongado, es importante mantener baja la temperatura durante la noche y el día, de lo contrario, se percibe una planta raquítica y débil con floración pobre, como consecuencia de que la energía proporcionada en la fotosíntesis es inadecuada para la velocidad de crecimiento (León, 2001).

De manera general, la temperatura afecta drásticamente la estabilidad de las enzimas y los procesos bioquímicos. Con temperaturas óptimas las enzimas trabajan bien y permanecen estables por periodos más prolongados. A temperaturas relativamente bajas, permanecen estables, pero no funcionan o lo hacen muy lento, mientras que a altas temperaturas se desnaturalizan por completo (Sánchez y Moreno, 2017).

#### **2.4.4. Humedad relativa**

Según León (2001) para el jitomate, la humedad relativa óptima día y noche, oscila entre 70 y 80 %, estos valores permiten una adecuada transpiración y favorecen los procesos relacionados con el desarrollo y crecimiento. Para Pérez y Castro (2011) la humedad relativa óptima en un día soleado dentro del invernadero debe variar entre 50 y 60 %, debido a que con alta humedad en el ambiente (mayor a 70 %) el cultivo es más susceptible a enfermedades foliares como el tizón temprano (*Alternaria solani*), tizón tardío (*Phytophthora infestans*) y botritis (*Botrytis cinérea*), principalmente.

Para el proceso de polinización, el óptimo está entre 60 y 85 % de humedad relativa; por debajo de este rango se reducen las características de adherencia del estambre, provocando la desecación del polen y haciéndole perder su efectividad. Valores superiores contribuyen a reducir el desprendimiento del polen de la antera (Flórez *et al.*, 2012).

#### **2.5. Requerimientos nutricionales**

Las plantas se nutren de agua, CO<sub>2</sub>, luz, oxígeno (O), hidrógeno (H) y nutrientes minerales. Los nutrientes minerales esenciales son aquellos imprescindibles para la vida del organismo vegetal y cuya función en la célula es tan específica que no pueden ser reemplazados por otros. Algunos de ellos forman las estructuras cuantitativamente más importantes o activas en el metabolismo, y por lo tanto son requeridos en cantidades relativamente elevadas, denominándose elementos mayores o macronutrientes; en este grupo se encuentra el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S). Otro grupo

de nutrientes esenciales se necesitan en cantidades más reducidas y son denominados, por ello, elementos menores o micronutrientes, entre los que figuran el Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Boro (B), Molibdeno (Mo) y Cloro (Cl). Es importante destacar que la necesidad de menor cantidad no implica que tengan menor importancia, sólo que son requeridos en menores cantidades relativas respecto a los macronutrientes (Carbone, 2015).

En cuanto a su porcentaje en la planta de acuerdo con Alcántar *et al.* (2016) los elementos minerales esenciales representan aproximadamente entre el 2 y 10 % del peso seco total de la planta, el otro porcentaje es aportado por el carbono, oxígeno e hidrógeno que son elementos no minerales; el carbono se encuentra entre el 44 y 49 % del peso seco, el oxígeno del 42 a 46 % y el hidrógeno del 5 a 7 %, por tanto, se puede considerar que la porción mineral existente en las plantas (2 a 10 %) no es la más abundante, no obstante son esenciales, pues ejercen una función vital sobre el crecimiento y desarrollo de las mismas.

Guardiola y García (1990) señalan que la concentración de macronutrientes (%) en plantas de jitomate bien nutridas y en rangos de suficiencia son las siguientes: N= 1.5 a 3.5, P= 0.1 a 0.3, K= 1.5 a 5.0, Ca= 1.0 a 7.5, Mg= 0.2 a 1.0, y S= 0.1 a 0.3. Según Sánchez (2004) dichos intervalos se encuentran entre 2.0 a 2.5, 0.2 a 0.5, 1.0 a 5.0, 0.1 a 1.0, 0.1 a 0.4 y 0.1 a 0.3 % para N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente. Por su parte Resh (2006) menciona que la concentración de macronutrientes en tejido vegetal para plantas de jitomate debe ser en el orden de 4.5, 0.7, 4.5, 1.5 y 0.5 % de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

### **2.5.1. Función de los macronutrientes minerales en las plantas**

**Nitrógeno:** es utilizado para sintetizar aminoácidos, formar clorofila, proteínas, enzimas, nucleótidos, ácidos nucleicos y orgánicos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (León, 2001; Resh, 2006).

Las formas más comunes en que se encuentra el nitrógeno inorgánico en el suelo son nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). La concentración de nitrógeno, especialmente la de nitrato, puede cambiar rápidamente debido a procesos como la absorción

por las raíces, la acción de microorganismos, la lixiviación y procesos de desnitrificación. Una vez que las plantas absorben el nitrógeno, éste es translocado por medio del xilema hacia las hojas. La forma en que ocurre la translocación del nitrógeno depende de la fuente de absorción y el metabolismo de la raíz. El amonio absorbido se asimila casi por completo en el tejido de la raíz y es translocado en gran medida en forma de aminoácidos a las partes superiores, en cambio el nitrato generalmente es translocado sin alteraciones hacia las hojas donde se reduce hasta  $\text{NH}_2$  para su incorporación a compuestos orgánicos, tales como asparagina y glutamina (Schwarz, 1995; Mengel y Kirkby, 2001; Alcántar *et al.*, 2016).

El nitrato es móvil en las plantas y puede almacenarse fácilmente en vacuolas, pero para que pueda ser utilizado en la síntesis de proteínas, debe reducirse a amonio. Para esto, la enzima nitrato reductasa participa en la reducción de nitrato a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ). Todas las células vegetales vivas tienen la capacidad de reducir el nitrato a nitrito utilizando energía de la fotosíntesis y la respiración en los tejidos verdes y de la respiración en las raíces y los tejidos no verdes. Posteriormente, se lleva a cabo la reducción de nitrito a amonio por la enzima nitrito reductasa, que se encuentra en los cloroplastos de los tejidos verdes y en los proplástidos de las raíces y los tejidos no verdes y utiliza la energía de la fotosíntesis para dicho proceso (ferrodoxina reducida) (Barker y Bryson, 2006).

A pesar de que la planta gasta menos energía para incorporar el nitrógeno en forma de amonio a moléculas orgánicas, la mayoría de éstas absorben el nitrógeno en forma de nitrato, debido a que puede ser almacenado en las células sin efectos tóxicos, pero el amonio, al no poderse almacenar en las plantas debe ser reducido a amoniaco, antes de pasar a  $\text{NH}_2$ , lo que provoca efectos tóxicos incluso en bajas concentraciones, por lo cual debe metabolizarse en combinación orgánica. En consecuencia, el metabolismo del amonio para la desintoxicación puede agotar las reservas de carbono incluso mucho más que la energía necesaria para la acumulación de nitrato (Barker y Bryson, 2006).

Como el nitrógeno es muy móvil por el floema y se transporta progresivamente hacia las hojas más jóvenes o ápices en crecimiento, son generalmente las hojas basales, las que exhiben primeramente los síntomas de deficiencia. Se anticipa la senescencia y las hojas tienden a secarse, quedando con coloración amarillo claro debido a la pobre síntesis de clorofilas (Gil, 1995). Por el contrario, los excesos de nitrógeno causan con frecuencia una gran proliferación de tallos, hojas y reducción de frutos (Bidwell, 2002).

**Fósforo:** las plantas absorben el fósforo principalmente como ortofosfato monobásico ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y ortofosfato dibásico ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), no obstante, pueden también a través de sus enzimas desprender los grupos fosfatos de los compuestos orgánicos y posteriormente absorberlos. A diferencia del nitrato y sulfato, el fosfato no se reduce en las plantas, sino que es incorporado a los compuestos orgánicos en su mismo estado de oxidación (Alcántar *et al.*, 2016).

El fósforo es un elemento estructural de los ácidos nucleicos y fosfolípidos. El adenosín difosfato (ADP) y el adenosín trifosfato (ATP), producidos a través de la respiración y la fotosíntesis, son compuestos con grupos fosfato de alta energía que impulsan la mayoría de los procesos fisiológicos en las plantas, incluida la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de proteínas y el transporte de iones a través de las membranas celulares, por ello, sin un suministro adecuado de fósforo las plantas no pueden alcanzar su máximo potencial de rendimiento (Fageria, 2009).

En plantas con una buena nutrición, la mayor parte del fósforo se halla en las vacuolas (85 a 95 %) en un acervo no metabólico, reserva que disminuye lentamente cuando las plantas no obtienen suficiente fósforo del medio (Gil, 1995).

Algunos de los síntomas de deficiencia pueden confundirse con los de nitrógeno. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el nitrógeno, la deficiencia de fósforo suele ocasionar zonas necróticas en las hojas, pecíolos o frutos; en ocasiones, las hojas pueden adquirir una coloración azul oscura debida a la

síntesis de flavonoides, aunque también suele presentarse pigmentaciones antociánicas rojizas o purpúreas. Dada su gran movilidad en la planta, es en las hojas basales donde se manifiestan los primeros síntomas visuales (Gil, 1995).

**Potasio:** su absorción como ion  $K^+$  es altamente selectiva y está estrechamente relacionada a la actividad metabólica. Es el catión presente más abundante en el citoplasma, manteniendo el equilibrio eléctrico; aunque no es un componente de ninguna molécula orgánica o estructura vegetal, es necesario para las funciones de todas las células vivas. Participa en la regulación de la apertura y cierre de estomas en las células epidérmicas, lo cual es causado por un aumento de turgencia como resultado de la acumulación de sales de potasio (Mia, 2015).

Está presente en forma soluble en las vacuolas de las células y en todos los tejidos donde la división celular es más activa. Juega un papel importante como activador de reacciones enzimáticas en la fotosíntesis y la respiración, además de algunas necesarias para la formación de almidón y proteínas. Es requerido para la acumulación y translocación de carbohidratos recién formados (León, 2001; Pérez y Castro, 2011).

Su deficiencia generalmente se manifiesta en una clorosis típicamente moteada de las hojas maduras, ya que es muy móvil en las plantas. Se producen áreas necróticas a lo largo de los márgenes y en las puntas de las hojas, las que se enroscan de una manera característica y puede producirse un extenso ennegrecimiento de las hojas. Otros de los síntomas son la reducción del crecimiento caulinar, el debilitamiento del tallo y la baja resistencia a patógenos (Bidwell, 2002).

**Calcio:** es absorbido en su forma catiónica como  $Ca^{2+}$ . Participa en la estabilidad de la pared celular al actuar como material cementante al formar pectatos de calcio. Tiene el papel de la regulación y permeabilidad de la membrana y la integridad estructural de la célula. Aumenta el crecimiento de las raíces mejorando la división y expansión celular. Además, es de gran valor en la germinación y crecimiento del polen. Está involucrado en la síntesis de proteínas

y transferencia de carbohidratos. Bloquea reacciones que afectan la calidad del fruto y la sanidad de los tejidos de conducción (León, 2001; Mia, 2015).

Una de las funciones de mayor interés es su participación como mensajero secundario en la conducción de señales, entre factores del ambiente y la respuesta de la planta en términos de crecimiento y desarrollo. En esta función el calcio se une a la calmodulina, proteína que se localiza en el citosol de las células vegetales (Wiedenhoeft, 2006; Alcántar *et al.*, 2016).

Su deficiencia afecta las regiones meristemáticas del tallo, hojas y raíz ocasionando muerte temprana; se detiene la mitosis, con lo que las hojas jóvenes presentan malformaciones, quedando con los extremos curvados hacia atrás; las raíces son cortas y pardas. Más tarde las hojas muestran clorosis marginales y estas áreas laterales inician un fenómeno de necrosis. Al final, las hojas caen y se detiene el crecimiento del ápice. Se produce entonces la brotación de yemas laterales, a las que les ocurre lo mismo. En jitomate los síntomas de deficiencia se presentan también, en la degeneración del ápice de los frutos y en una menor resistencia a la infección por hongos (Gil, 1995).

**Magnesio:** se absorbe en forma de ion  $Mg^{2+}$  y es el mineral más importante en la activación de enzimas. También, es un elemento estructural de la clorofila, y está involucrado en la síntesis de ácidos nucleicos. Estimula la actividad de la enzima Rubisco, principal enzima para la fotosíntesis; sus efectos positivos en la asimilación de  $CO_2$  y posteriormente en la producción de azúcar son el resultado de dicha actividad (Mia, 2015). Además, participa en forma significativa en la regulación del pH celular y del balance anión-cation. Adicionalmente es esencial como componente constitutivo de los ribosomas, y como puente entre los ácidos ribonucleicos para mantener la agregación de las subunidades de los ribosomas (Cammarano *et al.*, 1972, citado por Alcántar *et al.*, 2016).

Al participar de manera importante en muchos aspectos de la bioquímica de las células, no hay un patrón único de síntomas para su deficiencia, pero dado que su principal función es actuar como elemento estructural en la clorofila, se exhibe

clorosis intervenal en las hojas maduras ya que se puede translocar dentro de la planta hacia los tejidos de demanda (Wiedenhoeft, 2006). En ocasiones, aparecen coloraciones rojizas, ápices y bordes foliares retorcidos, con la concavidad hacia arriba (Gil, 1995).

**Azufre:** es absorbido por las plantas en forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Está involucrado en la síntesis de proteínas y es un componente de aminoácidos tales como la cisteína y metionina, encontrándose en el grupo sulfidril de ciertas enzimas (León, 2001).

Las vitaminas tiamina y biotina, así como la coenzima A (un compuesto esencial para la respiración y para la síntesis y la degradación de los ácidos grasos) son otros compuestos esenciales que contienen azufre. Los síntomas de deficiencia consisten en una clorosis general en toda la hoja, lo que incluye a los haces vasculares (Salisbury y Ross, 2000).

## **2.6. Hidroponía**

### **2.6.1. Definición y concepto**

La palabra hidroponía fue acuñada por W. F. Gericke, profesor de la Universidad de California, a quien le corresponde el mérito de haber comenzado en el año 1938 los primeros cultivos comerciales de plantas sin suelo. La palabra se deriva del griego “*hidro*” (agua) y “*ponos*” (labor o trabajo) lo cual significa literalmente “trabajo en agua” (Durán, 2010). De acuerdo con Sánchez y Escalante (1988) la hidroponía se puede definir como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se riegan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales, disueltos en agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material inerte, o simplemente la misma solución.

Propiamente dicha la hidroponía implica que las raíces de las plantas crezcan en una solución nutritiva aireada sin ningún sustrato sólido. Sin embargo, esta acepción de los cultivos hidropónicos, por lo general, se conoce como “cultivo en solución”. En su concepción más amplia los sistemas hidropónicos engloban a

todo cultivo en que a las plantas se les hace crecer y desarrollarse sin la necesidad de suelo, ya sea en sustrato sólido o en la solución nutritiva (Sandoval *et al.*, 2012).

## **2.7. Solución nutritiva hidropónica**

La solución nutritiva es el principal componente de los sistemas hidropónicos. Según Schubert (1981) y Muñoz-Ramos (2003) una solución nutritiva es una disolución efectuada en agua, que contiene oxígeno disuelto y todos los nutrientes minerales esenciales para las plantas en forma de iones, que se aportan como fertilizantes comerciales. La relación entre los nutrientes, la concentración total de los mismos, la CE y el pH de la solución nutritiva, son los factores que conforman la solución ideal. Sin embargo, Sánchez y Escalante (1988) mencionan que no existe una solución nutritiva teórica ideal para un cultivo en particular, pues la concentración óptima de elementos nutritivos para una especie vegetal, depende de un conjunto de factores como la parte a cosechar de la planta, la estación del año, el clima, la calidad del agua y el estado de desarrollo de la planta.

Según Resh (2006) es más exacto hablar de soluciones nutritivas, en lugar de solución nutritiva, ya que, en relación a muchos factores, las características químicas que la solución debe poseer para satisfacer plenamente las exigencias de la planta, son muy distintas de una especie a otra, e incluso, para una misma especie, variando de manera sensible con relación a la fase de desarrollo en que ésta se encuentre.

La solución nutritiva de acuerdo con Adams (2004) debe tener un balance equilibrado entre cationes y aniones, y para la mayoría de hortalizas, un pH de 5.5 a 6.5 y una CE entre 1.5 y 3 dS/m.

Las primeras soluciones nutritivas surgieron hacia el año 1860, y continuaron su desarrollo hasta mediados del siglo pasado. Knop en 1860, Crone en 1900, Arnon en 1902 y Hougland en 1950, fueron sólo algunos de los autores que formularon soluciones nutritivas. Sin embargo, fue hasta el año de 1961 que Steiner en

Holanda, propuso el concepto de solución nutritiva universal, indicando que las plantas podían crecer bien, si se seguían las siguientes relaciones y rangos de porcentajes de aniones y cationes en la solución nutritiva (meq por litro):  $\text{NO}_3^-$  50 a 70 %,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  3 a 20 %,  $\text{SO}_4^{2-}$  25 a 40 %,  $\text{K}^+$  30 a 40 %,  $\text{Ca}^{2+}$  35 a 55 % y  $\text{Mg}^{2+}$  15 a 30 %. Finalmente, el porcentaje de aniones y cationes en la solución nutritiva propuesta por Steiner en 1980 fue:  $\text{NO}_3^-$  60 %,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  5 %,  $\text{SO}_4^{2-}$  35 %,  $\text{K}^+$  35 %,  $\text{Ca}^{2+}$  45 % y  $\text{Mg}^{2+}$  20 % (Castellanos y Ojodegua, 2009).

La calidad del agua con la que se prepararan soluciones nutritivas es de gran importancia ya que, a excepción del agua de lluvia, todas las fuentes naturales contienen cantidades variables de sales en solución, elementos esenciales como calcio, magnesio, sulfatos y boro. Pero también elementos nocivos como cloro y sodio que pueden originar un aumento en la salinidad, y por lo tanto en la conductividad del agua (Velasco *et al.*, 2012).

De acuerdo con León (2001) niveles de sodio y cloro menores a 3 meq por litro son tolerados por la mayoría de las plantas y la cantidad de carbonatos más bicarbonatos debe ser menor a 3 meq por litro para que no causen problemas en el desarrollo de las plantas.

En la mayoría de hortalizas cuando el boro está presente en una concentración mayor a 2 ppm puede causar toxicidad (Pérez y Castro, 2011).

El pH es otro factor determinante en la solución nutritiva, su manejo apropiado afectará, entre otros aspectos, la disponibilidad de fósforo en la solución. Además, la disponibilidad de otros nutrientes como el nitrógeno amoniacal, hierro y manganeso (Baca *et al.*, 2016). Según Velasco *et al.* (2012) para el jitomate, se requiere de manera óptima un valor de pH entre 5.5 y 6.5. En reacciones neutras o ligeramente alcalinas suele inmovilizarse fósforo, hierro, boro y manganeso (Penningsfeld y Kurzmann, 1983).

Baca *et al.* (2016) señala que el fósforo es el único nutriente de la solución nutritiva que se ve afectado en su forma química y en consecuencia en su concentración por efecto del pH. Cuando la solución se encuentra en un pH igual

a 5, casi el 100 % del fósforo presente se encuentra en la forma de ortofosfato monobásico ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), cuando el pH asciende a 7.2 sólo el 50 % de fósforo se encuentra en esta forma y el resto en forma de ortofosfato dibásico ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), que tiende a formar la sal ortofosfato dibásico de calcio ( $\text{CaHPO}_4$ ) al asociarse con el ion presente en la solución nutritiva. Al ser una sal poco soluble, basta una cantidad pequeña en la solución nutritiva para que precipite.

La CE mide el contenido de aniones y cationes presentes en la solución nutritiva, su valor ideal es específica para cada cultivo y depende de las condiciones ambientales (Pérez y Castro, 2011); sin embargo, el rango para sistemas hidropónicos varía de 1.5 a 2.5 dS/m. Una CE más alta dificulta la absorción de nutrientes al aumentar la presión osmótica, mientras que una CE más baja puede afectar gravemente el rendimiento de las plantas (Samarakoon *et al.*, 2006). Cuando existe un incremento en la CE en los sustratos, ocasionado por la concentración de sales, se corrige por medio de lixiviación controlada o lavados para evitar su acumulación, no obstante, este tipo de prácticas son ineficientes en el uso de agua y nutrientes.

La relación entre los nutrientes presentes en la solución nutritiva es importante y dependerá de la concentración de cada uno de ellos. Así, dos elementos pueden ser sinérgicos a bajas concentraciones, pero antagónicos a concentraciones elevadas. El caso más conocido de competencia en el mecanismo de absorción es el exceso de potasio, que puede provocar dificultades para absorber magnesio y/o calcio a causando síntomas de deficiencias de estos dos elementos (Sánchez y Escalante, 1988; Carbone, 2015).

La absorción de nutrientes puede afectarse por la forma del nitrógeno aplicado (nitrato o amonio) al cultivo; en diferentes estudios se han encontrado concentraciones más altas de potasio, calcio, magnesio y sodio en la materia seca, cuando se aplica nitrato como fuente de nitrógeno. La absorción de potasio puede ser inhibida en forma creciente por altos niveles de amonio, y niveles altos de fósforo pueden reducir la absorción de manganeso, boro y zinc (Adams, 2004).

La solubilidad de los nutrientes y su interacción con el sustrato es otro factor a considerar en las soluciones nutritivas para la óptima nutrición de las plantas. Según Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008) el nitrato que es la fuente principal usada en soluciones nutritivas para el aporte de nitrógeno, posee una solubilidad muy alta y su afinidad por las partículas cargadas positivamente es muy baja en comparación con los fosfatos y sulfatos, por lo tanto, no se ve afectado en una proporción importante por procesos de precipitación o fijación en el sustrato. El amonio, que es otra fuente utilizada de nitrógeno en soluciones nutritivas, generalmente no precipita, pero a diferencia del nitrato tiene una alta afinidad por las partículas cargadas negativamente, lo que puede llegar a afectar su disponibilidad para las plantas. El potasio al ser muy soluble, tampoco está involucrado en reacciones de precipitación en un grado apreciable; sin embargo, como catión cargado positivamente puede ser fijado por las superficies cargadas negativamente del sustrato y, en consecuencia, se puede reducir su disponibilidad para las plantas. Por su parte la afinidad del calcio y magnesio a superficies cargadas negativamente también es muy alta, y están involucrados en reacciones de precipitación, especialmente con fosfatos y sulfatos. La concentración de fósforo en la solución nutritiva disminuye continuamente después de su aplicación, a través de dos mecanismos; el primero tiene que ver con la afinidad del fósforo para ser adsorbido por las partículas del sustrato, y que sucede en cuestión de minutos, el segundo mecanismo es mediante la formación de nuevos compuestos de fósforo con calcio y magnesio a pH alcalino y que se lleva a cabo en cuestión de horas o días.

## **2.8. Sustratos hidropónicos**

Según Abad *et al.* (2004) el término sustrato se aplica en horticultura a todo material sólido distinto del suelo *in situ*, puede ser natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, y que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta. Además, puede intervenir o no en la nutrición mineral de

la planta. Pueden ser químicamente inertes (arena granítica o silíceas, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, etc.) o activos (turba, corteza de pino, vermiculita, materiales ligno-celulósicos, etc.).

Las funciones más importantes para un sustrato de cultivo son proporcionar un medio ambiente ideal para el crecimiento de las raíces y construir una base adecuada para el anclaje o soporte mecánico de las plantas, para esto, un elevado número de materiales pueden ser utilizados con éxito, solos o bien en mezcla (Abad, 2001).

Actualmente, se encuentran una gran cantidad de materiales con posible utilidad para la elaboración de sustratos y su uso depende de la especie vegetal, costos, disponibilidad y características propias del sustrato (Ortega-Martínez *et al.*, 2010). Sin embargo, tomando en cuenta el punto de vista ambiental, los criterios más importantes para la elección de un material como sustrato son la durabilidad del mismo y su capacidad para ser reciclados posteriormente (Abad *et al.*, 2004)

Según Durán (2010) los sustratos deben cumplir varias funciones como ser livianos, no degradarse fácilmente, retener humedad y, al mismo tiempo, permitir una correcta aireación. El sustrato no debe absorber ni suministrar ningún elemento nutritivo para evitar alteraciones de la solución nutritiva, y debe ser biológicamente inerte.

La primera etapa en la utilización de un sustrato en hidroponía es la caracterización del mismo, en este proceso se distinguen tres tipos de propiedades: físicas, químicas y biológicas. La importancia de estas características radica en que de ellas depende el manejo adecuado de la fertilización y el riego y, por tanto, el éxito del cultivo (Abad, 2001; Burés, 1997).

### **2.8.1. Propiedades físicas de los sustratos**

Las propiedades físicas de los sustratos son de suma importancia, ya que una vez que el sustrato se encuentra en el contenedor y la planta está creciendo en él, no es posible modificar dichas características en el sustrato (Salazar, 2010).

Un buen sustrato tiene un comportamiento similar al de una esponja, es decir, una elevada porosidad, gran capacidad de retención de agua fácilmente disponible, drenaje rápido, buena aireación, distribución de partículas, baja densidad aparente y estabilidad (Baixauli y Aguilar, 2002).

**Espacio poroso total:** se refiere al porcentaje de volumen de espacios libres que se forman entre las partículas y dentro de las mismas. Su nivel óptimo se sitúa por encima de un 85 % del volumen del sustrato. El total de poros existentes en un sustrato se reparte entre poros capilares de pequeño tamaño ( $< 30 \mu\text{m}$ ), que son los que retienen agua, y poros no capilares o macroscópicos de mayor tamaño ( $> 30 \mu\text{m}$ ), que son los que se vacían después de que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación. Una alta porosidad total no indica por sí misma que se posea un buen sustrato, sino que es necesario conocer la relación entre la fracción de la porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación (Bunt, 1988; Abad *et al.*, 2004; Salazar, 2010).

En cuanto a su caracterización, la porosidad puede ser intraparticular, cuando hay poros que se sitúan en el interior de las partículas del sustrato, o interparticular, cuando está constituida por los poros existentes entre las diferentes partículas. Si el material presenta porosidad intraparticular, el comportamiento de la fase acuosa y gaseosa será distinto, según que esta porosidad sea abierta o cerrada. En el caso de porosidad cerrada, no existe comunicación directa entre los poros del interior de las partículas y los que están en el exterior, entre dichas partículas, consecuentemente, los poros internos no influirán sobre la distribución del agua y del aire en el sustrato, apoyando únicamente la característica deseable de ligereza en dicho sustrato. Si, por el contrario, la porosidad es abierta, el agua circulará por el interior de las partículas, pudiendo participar, en consecuencia, en la porosidad del sustrato y en la nutrición hídrica de la planta (Lemaire *et al.*, 1989).

**Capacidad de aireación:** se define como la proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar, esto se logra usualmente a 10 *cm* de tensión de columna

de agua. Su valor óptimo se sitúa entre 20 y 30 % del volumen total (Abad *et al.*, 2004; Salazar, 2010).

La importancia de mantener en rangos óptimos la capacidad de aireación radica en que, las células de la raíz de las plantas, requieren de oxígeno, pues necesitan liberar energía, no sólo para el metabolismo sino también para la absorción de nutrientes minerales y agua, y la gran mayoría de las especies vegetales no lo pueden translocar de la parte aérea, por lo que lo deben adquirir de la zona aledaña a la raíz (rizósfera) (Sánchez y Moreno, 2017).

**Agua fácilmente disponible:** es el volumen de agua que libera el sustrato al aumentar la tensión de succión de 10 a 50 *cm* de columna de agua de potencial mátrico y se considera que en estas condiciones hídricas la planta tiene un crecimiento adecuado. Su óptimo oscila entre 20 y 30 % del volumen total (Abad *et al.*, 2004; Salazar, 2010). Como bien lo dice el nombre, es la succión de agua efectuada por las plantas sin necesidad de realizar un gran esfuerzo. Se ha demostrado que, una tensión de agua de más de 50 *cm* puede afectar desfavorablemente el crecimiento y desarrollo de las plantas (Baixauli y Aguilar, 2002).

Según Bunt (1988) cuando un sustrato posee baja capacidad de retención de agua fácilmente disponible, puede ser debido a una baja porosidad total, los poros pueden ser grandes y gran parte del agua se puede perder por la gravedad, los poros pueden ser muy pequeños y esto favorece a que la planta sea incapaz de extraer una parte importante de agua antes de marchitarse y finalmente puede ocurrir una combinación de las situaciones anteriores.

**Agua de reserva:** es la cantidad de agua que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 *cm* de columna de agua. Su valor óptimo está entre 4 y 10 % del volumen total (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004).

**Agua total disponible:** se define como la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva. Su nivel óptimo se sitúa entre 20 y 40 % del volumen del sustrato (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004).

**Agua difícilmente disponible:** es el volumen de agua retenida por el sustrato a la tensión de 100 *cm* de columna de agua. Sin embargo, en el caso de plantas hortícolas como el jitomate, se ha demostrado que pueden alcanzar tensiones de hasta 300 *cm* de columna de agua sin afectar de modo significativo el crecimiento vegetal (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004).

**Densidad:** la densidad de un sustrato se puede referir bien a la del material sólido que lo compone y entonces se habla de densidad real, o bien a la densidad calculada considerando el espacio de poros ocupado por los componentes sólidos más el espacio poroso y se le llama densidad aparente, que indica indirectamente la porosidad del sustrato y su facilidad de transporte y manejo (Pérez y Castro, 2011).

### **2.8.2. Propiedades químicas de los sustratos**

Las propiedades químicas de los sustratos caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato, reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (química), reacciones de intercambio de iones (físico-químicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bio-químicas) (Abad *et al.*, 2004).

Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen en mayor grado a la química de los sustratos, debido principalmente a la formación y presencia de sustancias húmicas, el producto final más importante de la materia orgánica (Salazar, 2010).

**Conductividad eléctrica:** la conductividad eléctrica ideal en la solución del sustrato depende de diversos factores como el cultivar, la época del año, el estado de crecimiento, el clima, las necesidades de controlar el crecimiento vegetativo, el tipo de invernadero y la necesidad de mejorar la calidad. Los jitomates demandan generalmente una conductividad eléctrica en el rango de 2.5 a 4 ó 5 dS/m a través de sus etapas fenológicas (León, 2001).

**pH:** el desarrollo de las plantas se ve reducido en condiciones de acidez o alcalinidad marcadas, e influye en la asimilabilidad de los nutrientes por la planta. Con pH inferior a 5 pueden presentarse deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y, con valores superiores a 7.0, se disminuye la asimilación de hierro, fósforo, manganeso, boro, zinc y cobre. Los materiales orgánicos presentan mayor capacidad tampón que los inorgánicos y, por lo tanto, mayor capacidad de mantener constante el pH (Baixauli y Aguilar, 2002). Según Abad *et al.* (2004) para cultivo intensivo de hortalizas, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo estrecho, este rango se sitúa entre 5.5 a 6.8.

**Capacidad de intercambio catiónico:** es la capacidad de un sustrato de adsorber e intercambiar cationes. Se expresa generalmente en meq por 100 g de sustrato. La capacidad de intercambio catiónico es la suma de todos los cationes intercambiables o complejo de cambio. Los cationes divalentes generalmente están adsorbidos con mayor fuerza que los monovalentes y se intercambian con mayor facilidad, excepto el  $H^+$ .

Los materiales muy ácidos, o que tienen el complejo de cambio saturado de  $H^+$ , liberan iones  $H^+$  que se intercambian con los iones de la solución. Se puede saturar el complejo de cambio de un sustrato con iones determinados mediante su titulación, los cuales pueden mantenerse con aportes continuos de una misma solución nutritiva y actúan como amortiguadores de esta solución después del tiempo. En los sustratos con capacidad de intercambio catiónico alta, conviene cargar el complejo de cambio con cationes en equilibrio compatible con la solución nutritiva (Burés, 1997).

El valor óptimo en los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación. Si dicha fertirrigación es aplicada permanentemente, la capacidad de absorción de los cationes no constituye alguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si, por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente la utilización de sustratos con moderada o elevada

capacidad de intercambio catiónico, en todo caso superior a 20 meq por 100 g de sustrato (Abad *et al.*, 2005).

**Salinidad:** a consecuencia del reducido volumen de medio de cultivo de que disponen las raíces de las plantas cultivadas en contenedor, la concentración de nutrientes en la solución acuosa suele ser elevada (Ansorena, 1994).

Se considera que valores de conductividad eléctrica superior a 3.5 dS/m son excesivamente altos para la mayor parte de los cultivos hortícolas (Baixauli y Aguilar, 2002).

## **2.9. Arena de tezontle como sustrato**

El tezontle, arena volcánica o escoria volcánica, es un material que se genera por las erupciones volcánicas, es utilizado como sustrato en sistemas hidropónicos principalmente en la zona centro de México (Cruz *et al.*, 2014). Está constituido por aluminosilicatos, formado por fragmentos y partículas de lava porosa y de poco peso. Se encuentra presente en todas las zonas volcánicas, abundando en nuestro país principalmente en el eje Neovolcánico; su uso más común es para rellenos de caminos de terracería y en la construcción de casas y edificios. (Salazar, 2010).

En un estudio realizado por Ortega *et al.* (2016) donde se evaluó el rendimiento de jitomate producido en sustrato de tezontle, fibra de coco y suelo, se encontró un mayor rendimiento en las plantas producidas en tezontle respecto a fibra de coco, lo que demuestra que el tezontle con un buen manejo, es susceptible de ser utilizado en cultivos hidropónicos, con un potencial de rendimiento por lo menos igual al encontrado con otros sustratos comerciales.

En general existen tres tipos de tezontle utilizados en horticultura, el tezontle negro, que se encuentra ligeramente erosionado y consiste en brechas piroclásticas; el amarillo, producto de la erosión del tezontle negro, y el rojo, que procede de otro tipo de erupción volcánica cuyo color es debido a la presencia

de hierro en forma férrica (Burés, 1997). Aunque es importante mencionar que el más utilizado en México como sustrato hidropónico es el tezontle rojo.

De acuerdo con Pérez y Castro (2011) cuando el tezontle se utiliza en sistemas hidropónicos en contenedor, el tamaño adecuado de partícula para emplearse en la parte superior debe ser en promedio de 0.1 a 0.2 cm de diámetro y el empleado para drenaje debe ser de 0.5 cm. Dicho diámetro se consigue cribando el tezontle directamente en las minas.

### **2.9.1. Propiedades físicas y químicas del tezontle**

Presenta características favorables como buena aireación, es estéril y económicamente accesible (Pérez y Castro, 2011); posee buen drenaje, su densidad aparente es de media a alta, baja capacidad amortiguadora de cambios de pH, baja capacidad de intercambio catiónico, porosidad del 65 a 75 %, pH entre 7.5 y 8.6 y generalmente libre de sustancias tóxicas (Burés, 1997).

De acuerdo con Burés (1997), el tezontle rojo puede liberar algunos nutrientes inicialmente (mg por litro de sustrato): N= 6, P= 9, K= 53, Ca= 330 y Mg= 25, aunque esto puede variar de un lote a otro.

### **2.10. Sistemas hidropónicos abiertos y cerrados**

Los sistemas hidropónicos se clasifican como abiertos o cerrados, de acuerdo al manejo que se le da a la solución nutritiva drenada del cultivo una vez que las plantas tomaron del medio el agua y los nutrientes necesario para su crecimiento y desarrollo (Durán, 2010).

En los sistemas abiertos se suministra la solución nutritiva y los excedentes aplicados, que generalmente son para lavados de sales y restauración de la concentración original de la solución nutritiva en la rizósfera, se desechan permitiendo su infiltración en el suelo o se confinan en depósitos, pero no se reutilizan en el cultivo. Benoit y Ceustermans (1995) citado por Gul (2011) señalan que en una ha anualmente se llegan a perder 2,900 m<sup>3</sup> de solución nutritiva como concepto de sobre riegos (15 a 25 %) aplicados al cultivo. Esto

hace que los sistemas abiertos sean ineficientes en el uso de agua y nutrientes, con desperdicio masivo en comparación a los sistemas con recirculación parcial o total de la solución drenada; sin embargo, junto con el uso de sustratos, los sistemas abiertos, por su facilidad de manejo, representan la técnica hidropónica más ampliamente utilizada en todo el mundo (Alarcón, 2006; Pardossi *et al.*, 2006; Sandoval *et al.*, 2012; Salazar *et al.*, 2014).

En los sistemas cerrados la solución nutritiva se recircula para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste del pH, CE y nutrientes, con lo cual se puede lograr ahorros entre 10 y 50 % de agua respecto a un sistema abierto (Salazar *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2014b). Además, se contribuye a solventar el problema medioambiental derivado de la lixiviación de fertilizantes generados en la horticultura intensiva que trae como consecuencia la contaminación de ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Marfá, 2000; Pardossi *et al.*, 2006; Nakano *et al.*, 2010). Dentro de los sistemas con recirculación de la solución nutritiva se pueden mencionar los que llevan intrínseca esta propiedad, como es el sistema Nutrient Film Technique (NFT) y New Growing System (NGS), aunque en la actualidad, se están utilizando también sustratos como perlita, lana de roca, fibra de coco, arenas, etc. (Urrestarazu y Salas, 2004).

Tunali *et al.* (2009) y Van Os (2009) mencionan que con el paso del tiempo en los sistemas cerrados ocurre un desbalance de la solución nutritiva drenada debido a la acumulación de iones menos consumidos por la planta como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , lo que rompe el equilibrio de nutrientes, y en la mayoría de las veces, junto con iones de cloro y sodio provenientes del agua de riego incrementan la CE en el drenaje. Zhang *et al.* (2016) reportan que el exceso de sales reduce la tasa de alargamiento y crecimiento lateral de la raíz, el contenido de clorofila en las hojas, la conductividad estomática, la actividad fotosintética y por ende el rendimiento final del cultivo. Bustomi *et al.* (2014) al evaluar diferentes niveles de CE en un cultivo de jitomate hidropónico indicaron que la calidad de los frutos (7.3 grados brix) en condiciones de salinidad se vio afectada positivamente a un

valor de 5 dS/m, aunque con dicho valor se obtuvo el menor rendimiento. El mayor rendimiento se reportó con el manejo de la CE igual a 3 dS/m.

Los aspectos más importantes a considerar en el manejo de sistemas cerrados se describen a continuación:

**Equilibrio en la solución nutritiva:** es muy conocida la necesidad de un equilibrio de nutrientes en la solución nutritiva para el correcto desarrollo y producción de las plantas. Por lo tanto, el ajuste de los nutrientes en la solución nutritiva es muy importante para evitar la acumulación de los diferentes iones como sulfatos, cloruros, sodio, y bicarbonatos. No obstante, mantener ajustada la solución nutritiva cuantitativa y cualitativamente a lo largo de un ciclo de cultivo no es tarea fácil, teniendo en cuenta una gran cantidad de factores que intervienen. A pesar de esto, las plantas poseen la capacidad de selectividad para absorber nutrientes de acuerdo con sus necesidades diarias, con lo que pueden solventar parcialmente el desequilibrio nutrimental presente en los sistemas cerrados (Urrestarazu y Salas, 2004).

**CE en la solución nutritiva:** la mayor absorción de agua respecto a sales, provoca que la CE de la solución drenante aumente de forma gradual. Para evitar la salinización del sustrato o de la solución nutritiva recirculada, en la práctica se ha utilizado la eliminación de una parte de la solución nutritiva. Una segunda práctica es aumentar el volumen de aporte de fertirriego, ya sea aumentando la dotación de cada riego o el número de riegos, es decir, trabajando un porcentaje de drenaje entre 25 y 45 %, mucho mayor que el habitual (Urrestarazu y Salas, 2004).

**Fitotoxicidad:** este problema está relacionado con la propia planta, ya que éstas excretan una gran cantidad de exudados radicales que son reincorporados mediante la recirculación de la solución nutritiva. Aunque muchos de éstos son degradados por bacterias saprófitas, algunos productos como el caso del ácido fenólico a concentraciones de 1 y 50  $\mu M$ , se han señalado como la causa de disminución del crecimiento radicular (Urrestarazu y Salas, 2004).

**Producción:** en general, parece que la producción en los sistemas cerrados presenta una disminución más o menos acentuada en función de factores como clima, calidad de las aguas de riego, tipo de sistema, etcétera; sin embargo, existen estudios en una y otra dirección con relación a una mayor o menor producción, relacionado al manejo correcto del sistema de recirculación (Urrestarazu y Salas, 2004).

Sánchez *et al.* (2014b) al evaluar diferentes sistemas hidropónicos abiertos y cerrados en jitomate a los 92 ddt no encontraron diferencias significativas para variables de rendimiento, peso seco de planta e índice de área foliar (IAF). Por su parte Hao y Papadopoulos (2002) en un experimento realizado en jitomate con lana de roca como sustrato compararon dos sistemas hidropónicos cerrados contra uno abierto. El primero con un manejo optimizado de la solución nutritiva y el segundo con manejo estándar, reportaron que en el sistema cerrado con nutrición optimizada se alcanzó rendimientos similares a los encontrados en el sistema abierto. Sin embargo, cuando se utilizó el manejo estándar de nutrición con sistema cerrado, el rendimiento se vio afectado en comparación al sistema abierto. Dichos autores concluyen que los sistemas cerrados con lana de roca como sustrato y con nutrición optimizada son métodos alternativos económica y ambientalmente racionales.

### **2.11. Eficiencia en el uso de agua y nutrientes**

El incremento en la demanda de agua y fertilizantes para la actividad agrícola, el alto costo y la disponibilidad limitada de estos recursos conllevan a que la agricultura debe ser cada vez más eficiente en su uso (Huang, 2009). Dicha eficiencia puede ser estimada en unidades de producción por unidad de agua o nutrimentos del agrosistema utilizados (litros por kg) (Urrestarazu y Salas, 2004). Fernández y Camacho (2005) definen la eficiencia como la relación que existe entre la biomasa total producida por unidad de agua utilizada y cuando se quiere enfocar meramente el aspecto económico, se sustituye el termino biomasa total por kg de producto de interés, en relación con el agua utilizada.

Los factores que afectan la tasa en que las plantas absorben agua y nutrientes varían de acuerdo con diversos factores como a la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire, la salinidad del sustrato, la temperatura del sustrato, la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente, las estaciones del año, el momento del día etc. (Salas y Urrestarazu, 2004).

De acuerdo con Salazar *et al.* (2014), para el cultivo de jitomate, en Israel y España son necesarios, en invernaderos sin calefacción, 30 a 40 litros de agua por kg de fruto producido. En Holanda la eficiencia es mayor, en condiciones de invernadero con control de los factores ambientales, hidroponía y enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, son utilizados 15 litros de agua por kg de fruto. Marfá (2000) reporta para un sistema con recirculación de solución nutritiva una eficiencia de 37.9 litros por kg de fruto de jitomate producido; el mismo autor menciona que, para un sistema abierto, el gasto asciende hasta 54.8 litros por kg. Aragón (2019) reportó 32 litros para producir un kg de fruto de jitomate en una formulación de solución nutritiva convencional al 80 %.

## **2.12. Sistema convencional y alternativo en la producción de jitomate**

El sistema de producción convencional de jitomate en invernadero más extendido en el mundo y que normalmente se practica en México, consiste en la utilización de variedades de hábito indeterminado, con un ciclo de cultivo que supera los 10 meses. Se emplean de 2 a 3 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero, lográndose densidades de población de hasta 30,000 plantas por ha. Se deja crecer el tallo hasta más de 7 m de largo para obtener cosechas que pueden llegar a superar los 20 racimos por planta en un único ciclo de cultivo anual, con lo cual, con un buen manejo se pueden lograr rendimientos de hasta 500 toneladas/ha/año (Ponce *et al.*, 2000; Heuvelink y Dorais, 2005; Resh, 2006).

La problemática de este sistema de producción es el requerimiento de tecnología, infraestructura y equipo muy sofisticado que hace difícil el manejo técnico y conlleva a muy altos costos de producción, justificándose, sólo mediante el acceso a mercados selectos que pueden pagar precios muy altos a cambio de la

calidad de los productos cosechados. Al ser el ciclo de cultivo muy largo, con un periodo de inicio a fin de cosecha de 5 a 7 meses, se tienen limitantes en la producción, relacionadas con el ataque de plagas y enfermedades. Además, las utilidades o pérdidas del productor quedan a merced de los oscilantes precios en el mercado (Heuvelink y Dorais, 2005; Sánchez *et al.*, 2014b).

En la universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema de producción de jitomate, alternativo al sistema convencional. Este sistema tiene como objetivo principal, reducir el ciclo de producción, de trasplante a fin de cosecha, a menos de 4 meses. Esto se logra realizando trasplantes tardíos (45 días después de la siembra) y despuntes tempranos (eliminación de la yema terminal) para dejar solo tres racimos por planta, con lo cual, la altura de la planta queda en aproximadamente 1 m.

Al reducir el número de racimo e indirectamente el área foliar del cultivo, se posibilita aumentar la densidad de población, logrando una densidad de 8 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero. A pesar de que el rendimiento por planta se ve disminuido al reducirse el número de racimos por planta, esta reducción es compensada debido a la mayor densidad de población que se utiliza. Aunado a esto, el número de ciclos de producción aumentan por el despunte temprano y los trasplantes tardíos, ya que las plantas pasan menos tiempo en el invernadero de producción y más en el área de semillero, con lo cual es posible lograr 3 y hasta 4 ciclos por año llegando a producciones a nivel comercial de hasta 600 toneladas/ha/año (Sánchez *et al.*, 2014a; Sánchez *et al.*, 2017).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del experimento

La presente investigación se llevó a cabo en un invernadero de 1,000 m<sup>2</sup> del Posgrado de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, localizado a 19°29'35" de latitud norte y 98°52'19" de longitud oeste y una altura de 2,250 m, con una precipitación anual de 636.5 mm y una temperatura media anual de 15.2 °C, correspondiente a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 1987).

#### 3.2. Establecimiento del experimento

El invernadero donde se estableció el experimento (Figura 1) es tipo cenital, de 45 m de largo por 22 m de ancho, de estructura metálica con cubierta de polietileno térmico y alta dispersión de luz. Tiene ventanas laterales de 2.4 m de altura y ventana cenital de 0.9 m de altura con protección de malla antiáfidos y cortinas retráctiles dispuestas a lo largo de las ventanas de ambos costados y cenitales. Está equipado con calefactores de gas LP, un sistema de enfriamiento con pared húmeda y extractores colocados en la pared opuesta con una capacidad de renovación de aire de una vez por minuto.



**Figura 1. Interior del invernadero donde se implementó el experimento.**

En el interior se tienen camas de 1 m de ancho por 20 m de largo y 0.25 m de profundidad, con costados de tabique y pasillos cementados de 50 cm de ancho entre camas. Las camas poseen 1 % de pendiente y están forradas en el fondo

con polietileno negro calibre 600 (Figura 2), a lo largo está colocada una tubería PVC grado sanitario de 4 cm de diámetro, ranurada en su base inferior a cada 50 cm para permitir la conducción de la solución nutritiva drenada hacia el extremo (Figura 2).



**Figura 2. Camas de cultivo forradas con polietileno negro y tubería de PVC ranurada para la conducción de la solución nutritiva drenada.**

Como material vegetal se utilizó jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Bullseye® tipo saladette de hábito de crecimiento semideterminado de la Compañía Seminis.

Las semillas fueron sembradas el 20 de julio de 2018 en charolas de poliestireno de 60 cavidades con un volumen de 250 ml por cavidad y una separación de 5 cm entre cavidades (Figura 3).



**Figura 3. Charolas de poliestireno de 60 cavidades con volumen de 250 ml por cavidad utilizadas para la producción de plántulas.**

Previo a la siembra, las charolas fueron lavadas con agua de la llave a presión, y posteriormente fueron desinfectadas sumergiéndolas durante 10 minutos en una

solución con agua de la llave y sales cuaternarias de amonio al 2 % para evitar problemas de contaminación por patógenos.

Como sustrato para la germinación en semillero se utilizó una mezcla de turba, perlita y arena de tezontle rojo a una proporción de 25, 25 y 50 %, respectivamente; en la superficie se colocó una capa de vermiculita para cubrir las semillas y evitar su deshidratación. Concluida la siembra, las charolas fueron colocadas individualmente sobre una estructura metálica elevándolas del suelo 50 cm.

A partir de los 5 días después de la siembra (dds) y hasta el trasplante (43 dds) se aplicaron uno o dos riegos diariamente con una solución nutritiva que contenía las siguientes concentraciones de nutrientes (mg por litros): Nitrógeno (N)= 100, fósforo (P)= 25, potasio(K)= 125, calcio (Ca)= 125, magnesio (Mg)= 20, azufre (S)= 75, hierro (Fe) = 2, manganeso (Mn)= 1, boro (B)= 0.5, cobre (Cu)= 0.2 y zinc (Zn)= 0.2. Como fuentes fertilizantes se utilizaron nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, ácido fosfórico al 85 %, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, sulfato de manganeso, ácido bórico, sulfato de cobre y sulfato de zinc. Además, el agua utilizada para la preparación de la solución nutritiva, presentó un pH= 6.9 y CE= 0.25 dS/m, asimismo contenía los siguientes iones (meq por litro):  $\text{HCO}_3^-$ = 2.38,  $\text{NO}_3^-$ = 0.01,  $\text{SO}_4^{2-}$ = 0.06,  $\text{Cl}^-$ = 0.08,  $\text{K}^+$ = 0.10,  $\text{Ca}^{2+}$ = 0.75,  $\text{Mg}^{2+}$ = 0.60 y  $\text{Na}^+$ = 1.21. Durante la etapa de plántula en semillero se siguió un protocolo de manejo para lograr plántulas con la mejor calidad posible (Figura 4).



**Figura 4. Plántula de jitomate en etapa de semillero lista para su trasplante.**

El trasplante se llevó a cabo en una disposición de tres hileras de plantas por cama, a una separación de 35 cm entre hileras y 25 cm entre plantas, lo que generó una densidad de población de 12 plantas por m<sup>2</sup> útil, equivalente a 8 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero (tomando en cuenta camas de 1 m de ancho y pasillos de 50 cm de ancho). Durante los primeros 27 días después del trasplante (ddt) se aplicó la misma solución nutritiva (mg por litro) para todos los tratamientos a excepción del tratamiento dos, que tuvo lugar 39 días después del trasplante, 12 días más que el resto de tratamientos. Los nutrientes aplicados fueron: N= 200, P= 50, K= 250, Ca= 250, Mg= 40, S= 150, Fe= 2, Mn= 1, B= 0.5, Cu= 0.2 y Zn= 0.2. Esto correspondió a una solución nutritiva al 100 %. Una vez que se inició con la recirculación de la solución nutritiva, se aplicaron los tratamientos que se describen en el siguiente apartado.

### **3.3. Tratamientos**

Se evaluaron tres métodos de recirculación de la solución nutritiva (sistemas cerrados) y un sistema abierto como testigo.

**Tratamiento 1:** en un tinaco color negro de 5,000 litros de capacidad, se preparó solución nutritiva al 100 % de concentración como se indicó anteriormente. Se aplicó el riego procurando 20 % de drenaje y cada vez que el tinaco se vació, se preparó nuevamente un 80 % del volumen inicial (4,000 litros) con solución nutritiva completa; el 20 % (1,000 litros) faltante, fue complementado con la solución drenada, colectada en un tinaco color negro de 1,000 litros y desinfectada, sin que se realizaran correcciones de pH, CE o de alguno de los nutrientes.

**Tratamiento 2:** en un tinaco color negro de 5,000 litros de capacidad, se preparó solución nutritiva al 100 % de concentración. Se aplicó el riego procurando 20 % de drenaje y cada vez que el tinaco se vació, se preparó nuevamente un 80 % del volumen inicial (4,000 litros) con solución nutritiva ajustada selectivamente por elemento nutritivo (N, P, K, Ca, Mg y S) con base en análisis químicos del drenaje que se realizaba cada 15 días; el 20 % (1,000 litros) faltante fue

completado con la solución nutritiva drenada, colectada en un tinaco color negro de 1,000 litros y desinfectada con anterioridad. Con los datos obtenidos se hicieron todos los ajustes pertinentes a la solución nutritiva antes de volverla a aplicar.

**Tratamiento 3:** en un tinaco color negro de 5,000 litros de capacidad, se preparó solución nutritiva al 100 % de concentración. Se aplicó el riego procurando 20 % de drenaje y cada vez que el tinaco se vació, se preparó nuevamente un 80 % del volumen inicial (4,000 litros) con una solución nutritiva ajustada selectivamente considerando una estimación de las tasas de absorción de cada elemento nutritivo (90 % para N, P y K y 50 % para Ca, Mg y S), respecto a la solución nutritiva inicial; el 20 % (1,000 litros) faltante fue complementado con la solución drenada, colectada en un tinaco color negro de 1,000 litros y desinfectada, sin correcciones de pH y CE.

**Tratamiento 4 (testigo):** en un tinaco color negro de 5,000 litros de capacidad, se preparó solución nutritiva al 100 % de concentración. Se aplicó el riego procurando 20 % de drenaje y cada vez que el tinaco se vació, se preparó nuevamente el 100 % del volumen inicial (5,000 litros) con la solución nutritiva completa, manejándose todo el ciclo de cultivo un sistema sin recirculación de solución nutritiva (sistema abierto).

Los tinacos de 5,000 litros utilizados para la preparación de la solución nutritiva de los cuatro tratamientos se muestran en la Figura 5.



**Figura 5. Tinacos de 5,000 litros utilizados para preparar solución nutritiva.**

### 3.4. Conducción del experimento

La solución nutritiva fue aplicada a través de cintillas de goteo que corrían a lo largo de la cama. La frecuencia de los riegos y la cantidad de solución nutritiva a aplicar se definió diariamente procurando 20 % de drenaje de solución nutritiva en cada tratamiento; esto se logró al aplicar entre 3 y 6 riegos diariamente dependiendo de las condiciones climáticas y etapa fenológica del cultivo.

El drenaje de cada tratamiento fue colectado y almacenado temporalmente en tinacos de 1,000 litros antes de recircularlo, devolviéndolo cada cuarto a séptimo día al tinaco de 5,000 litros que le correspondía según el tratamiento (Figura 6). Para desinfectar la solución drenada, previo a la recirculación se aplicó agua oxigenada (peróxido de hidrógeno al 50 %) a razón de 50 ml de producto comercial por cada tinaco de 1,000 litros (60 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en solución).



**Figura 6. Tinacos de 1,000 litros utilizados para la colecta de la solución drenada.**

Se manejó un sistema de tutoreo en el cual se sujetó cada planta con un anillo de plástico y rafia amarrada a un alambre que corría por la estructura del invernadero paralelo a las hileras de plantas.

Las plantas fueron despuntadas (remoción de la yema terminal del tallo principal) a los 81 dds, dejando dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia formada (Figura 7). Todos los brotes laterales fueron eliminados conforme aparecieron, conduciendo el cultivo a un solo tallo por planta.



**Figura 7. Plantas de jitomate despuntadas al tercer racimo y en alta densidad de población.**

Se siguió un control preventivo en el manejo de plagas y enfermedades. Dos días antes del trasplante el invernadero fue desinfectado con agua de la llave y sales cuaternarias al 2 %.

Previo al trasplante se aplicó Confidor® (Imidacloprid al 20 %) a las plántulas, a razón de 1 ml por litro de agua y Previcur® Energy (Fosetil -al 27.68 % + Propamocarb 47.32 %) a una dosis de 1 ml por litro de agua; las raíces de las plantas se sumergieron en una solución con ambos productos durante un minuto. Posterior al trasplante se realizaron 2 aplicaciones al follaje con Mastercop® (sulfato de cobre pentahidratado al 5.34 %) para prevenir enfermedades fungosas y bacterianas (1.5 ml por litro). Al final del ciclo de cultivo se presentó cenicilla (*Leveillula taurica*), no obstante, dicha enfermedad no afectó al fruto, debido al ciclo corto de producción y a que en esa fase ya se estaba finalizando la cosecha, por lo cual no requirió de algún control.

La cosecha comenzó a los 80 días después del trasplante (ddt), cuando los primeros frutos alcanzaron una coloración roja; posteriormente se hicieron cortes sucesivos cada vez que los frutos se tornaban de un color naranja a rojo, esto durante un mes más, de manera que la cosecha se concluyó a los 110 ddt.

### 3.5. Variables morfológicas

Las variables morfológicas fueron evaluadas en tres plantas por tratamiento y repetición a los 59 ddt.

**Índice de área foliar ( $m^2$  de hoja por  $m^2$  de área cubierta):** para determinar esta variable se utilizó un integrador de área foliar Licor 3100 (Licor Inc., Lincoln Nebraska, EUA).

**Diámetro de tallo (mm):** esta variable se determinó con un vernier electrónico, tomando la medición en el entrenudo ubicado inmediatamente arriba de la segunda inflorescencia.

**Altura de planta (cm):** dicha variable fue determinada con un flexómetro, midiendo a partir de la base del tallo hasta el ápice de crecimiento.

### 3.6. Variables de peso seco

A las mismas plantas a las que se les midió las variables morfológicas, también se les determinó las siguientes variables de peso seco:

**Peso seco de hoja por planta (g):** se hizo una separación de las hojas del tallo y para su secado se utilizó una estufa a 70 °C hasta lograr peso constante; el peso se determinó con el apoyo de una balanza analítica.

**Peso seco de tallo por planta (g):** los tallos fueron secados en una estufa a 70 °C hasta peso constante, y el peso se determinó con la ayuda de una balanza analítica.

**Peso seco de frutos por planta (g):** una vez separados los frutos de las plantas, se secaron en una estufa a 70 °C hasta que llegaron a peso constante, y con la ayuda de una balanza analítica se determinó su peso seco.

**Peso seco de raíz por planta (g):** con una muestra de diez plantas de todo el experimento, se determinó la relación entre el peso seco de raíz y la parte aérea de la planta, misma que resultó en un 10 % de peso de raíz.

**Peso seco total por planta (g):** se obtuvo sumando el peso seco de raíz, tallo, hojas y frutos de las plantas de cada unidad experimental.

### **3.7. Variables del rendimiento y sus componentes**

Las variables del rendimiento fueron evaluadas en 240 plantas (20 m<sup>2</sup>) por tratamiento y repetición.

**Número de frutos (frutos por m<sup>2</sup> de invernadero):** se sumaron todos los frutos cosechados en cada corte para cada unidad experimental.

**Peso medio de frutos (fruto por m<sup>2</sup> de invernadero):** para obtener esta variable se dividió el peso total de frutos cosechados entre el número de frutos totales en cada unidad experimental.

**Rendimiento (kg por m<sup>2</sup> de invernadero):** se obtuvo con la suma del peso total de frutos cosechados por m<sup>2</sup> de invernadero.

**Índice de cosecha (IC):** se obtuvo dividiendo el peso seco de fruto entre el peso seco total de la planta.

### **3.8. Variables del balance nutrimental (N, P, K, Ca, Mg y S)**

Las plantas a las que se les midieron las variables morfológicas y de peso seco, también se les determinaron las siguientes variables del balance nutrimental:

**Macronutrientes aportados con la solución nutritiva (g):** se determinó con base en la concentración (mg por litro) de los nutrientes con la que se preparó la solución nutritiva y la cantidad (litros) aplicada a lo largo del ciclo de cultivo desde trasplante hasta fin de cosecha.

**Macronutrientes absorbidos por las plantas (g):** a los 101 ddt se realizó un análisis de contenido nutrimental en tejido vegetal (en toda la planta) tomando en cuenta tres plantas por unidad experimental; el procedimiento fue el siguiente:

Con las tres plantas se hizo una muestra compuesta, la cual se secó en una estufa a 70 °C. Utilizando un molino WILEY modelo 4 de 110 VAC, se molieron y

luego se almacenaron en frascos de vidrio transparentes para su posterior digestión. En un matraz Kjeldahl se colocó 0.5 g de muestra molida, a la que se le agregaron 4 ml de una mezcla de ácidos (ácido sulfúrico y ácido perclórico a relación 4:1) más 1 ml de agua oxigenada al 30 %, dando una mezcla de color negro. Luego se colocó el matraz sobre una plancha caliente hasta que el extracto hirvió y cambió a un color claro. Después se dejó enfriar por una hora y entonces se procedió a aforar a 50 ml con agua destilada. A partir de la solución obtenida, se realizaron las determinaciones de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, y magnesio (Alcántar y Sandoval, 1999). Para la determinación de azufre, se llevó a cabo una digestión alterna similar, pero en este caso se utilizó ácido nítrico en vez de ácido sulfúrico (ácido nítrico y ácido perclórico en proporción 2:1).

La determinación de nitrógeno se realizó por el método de microkjeldahl (Figura 8). Para fósforo se empleó el método de Vanadato-molibdato, leyendo en un espectrofotómetro GENESYS 10 UV con una absorbancia de 420 nm. El potasio fue determinado con un flamómetro JENWAY (Chapman y Pratt, 1973).

Para calcio y magnesio se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Pye Unicam SP 9 de Phillips. El S fue determinado por el método turbidimétrico con cloruro de bario (Chesnin y Yien, 1951).



**Figura 8. Método de microkjeldahl para la determinación de nitrógeno.**

**Macronutrientes solubles contenidos en los drenajes (g):** a partir de los 30 ddt, cada 15 días se hicieron muestreos de los drenajes obtenidos en cada tratamiento de recirculación, en total se hicieron cinco muestreos durante todo el

ciclo de cultivo. La muestra fue de 500 ml de solución de los drenajes colectándola en frascos color ámbar para su análisis posterior (determinación de N, P, K, Ca, Mg y S); los métodos utilizados para dichos análisis fueron los mismos usados para las determinaciones de macronutrientes absorbidos por las plantas. Con los resultados de estos análisis y conociendo la cantidad de litros de solución drenada en todo el ciclo de cultivo, se estimó la cantidad de cada uno de los macronutrientes drenados.

**Macronutrientes resolubilizados del sustrato (g):** para determinar esta variable, una semana antes de concluir el ciclo de cultivo, se tomaron 2 muestras de tezontle rojo en cada unidad experimental; la primera a una profundidad de 0 a 10 cm en la cual se colectó un kg y la otra de 10 a 20 cm de profundidad en la que se colectó también un kg.

Las muestras fueron secadas en una estufa a 70 °C, hasta llegar a un peso constante, el cual se cuantificó con una balanza analítica. Posteriormente se pesaron 400 g de cada muestra, las cuales fueron colocadas en un embudo de cerámica con extractor (Figura 9) donde se saturó con 150 ml de agua destilada y desionizada, dejando que reposara durante dos horas, posteriormente se extrajo la solución drenada para cuantificar el contenido de N, P, K, Ca, Mg y S. La cuantificación de nutrientes fue realizada con los métodos empleados para macronutrientes absorbidos por las plantas; con estos datos se estimó la cantidad de macronutrientes resolubilizados del sustrato.



**Figura 9. Embudos de cerámica y extractor para digestión de muestras en el laboratorio.**

**Balance total del sistema:** es la distribución de los macronutrientes contenidos en la planta, solubles en el drenaje, retenidos en el sustrato y resolubilizados, respecto a los nutrientes aportados.

**Eficiencia de uso de agua y nutrientes:** se estimó con base en la cantidad de nutrientes y agua requerida para producir un kg de fruto de jitomate para cada uno de los métodos evaluados.

### **3.9. Diseño experimental y tratamientos**

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro tratamientos, con cuatro repeticiones para variables morfológicas y de peso seco, y siete repeticiones para las variables del rendimiento y sus componentes. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y comparaciones de medias con la prueba de Tukey con una  $P= 0.05$ , para lo cual se utilizó el programa estadístico SAS (2002) versión 9.0.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Variables morfológicas

Los resultados del análisis de varianza para variables morfológicas medidas a los 59 ddt, mostraron que hubo diferencias estadísticas entre tratamientos, altamente significativa para altura de planta y significativa para diámetro de tallo; no así para índice de área foliar (Cuadro 1).

El análisis de comparaciones de medias (Cuadro 2) muestra que, para altura de planta, el tratamiento con 20 % de recirculación sin análisis químico de la solución drenada (T1), fue de mayor altura respecto a los otros dos tratamientos de recirculación (T2 y T3) y que el testigo (T4).

No hay una razón especial para este resultado, posiblemente el sector que le correspondió a este tratamiento dentro del invernadero estuviera ligeramente más sombreado y eso contribuyó a su elongación.

En cuanto al diámetro de tallo, el tratamiento con 20 % de recirculación y análisis de los drenajes (T2) superó al testigo, pero entre los otros tratamientos el diámetro fue similar. Posiblemente esto fue debido a que en los tratamientos con recirculación se aplicaba un mayor porcentaje de sobre-riego, lo que contribuyó a una menor concentración de sales en la rizósfera.

**Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística de caracteres morfológicos de jitomate a los 59 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Fuentes de variación | GL | Altura de Planta | Diámetro de Tallo | Índice de área foliar |
|----------------------|----|------------------|-------------------|-----------------------|
| Tratamiento          | 3  | 188.74**         | 4.19*             | 0.42                  |
| Repetición           | 3  | 72.04            | 1.69              | 0.17                  |
| Error                | 9  | 13.88            | 1.08              | 0.31                  |
| Total                | 15 |                  |                   |                       |
| CV (%)               |    | 3.51             | 8.24              | 11.14                 |

\*: Significativo (P= 0.05). \*\*: Altamente significativo (P= 0.01). GL: Grados de libertad. CV: Coeficiente de variación.

**Cuadro 2. Comparación de medias de caracteres morfológicos de jitomate a los 59 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>Altura de planta (cm)</b> | <b>Diámetro de tallo (mm)</b> | <b>Índice de área foliar (m<sup>2</sup> de hoja por m<sup>2</sup> de área cubierta)</b> |
|--|------------------------------|-------------------------------|---|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 114.91 a                     | 12.25 ab                      | 5.15 a  |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 104.16 b                     | 13.83 a                       | 5.33 a  |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 106.00 b                     | 12.91 ab                      | 4.99 a  |
| T4 (testigo, sistema abierto)                      | 98.33 b                      | 11.41 b                       | 4.56 a  |
| DMS  | 8.22                         | 2.29                          | 1.23  |

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P= 0.05). DMS: Diferencia mínima significativa.

En índice de área foliar (IAF), todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales, el cual osciló entre 4.5 y 5.3. Estos valores posiblemente sean altos para una óptima fotosíntesis neta, ya que de acuerdo con Heuvelink y Dorais (2005) y Sánchez y Moreno (2017), los valores óptimos de IAF para una mayor acumulación de materia seca diaria en jitomate se ubican entre 3 y 4.

#### **4.2. Variables de peso seco**

En cuanto a las variables de peso seco total, por planta y por órgano (raíz, tallo, hojas y fruto), tanto el análisis de varianza (Cuadro 3) como el de comparaciones de medias (Cuadro 4), mostraron que no hubo diferencias significativas entre los cuatro tratamientos evaluados, resultado que coincide con Sánchez *et al.* (2014b), quienes evaluaron diferentes sistemas de recirculación de la solución nutritiva en jitomate, y reportaron que no encontraron diferencia alguna entre los distintos sistemas.

Esto indica que cualquiera de los sistemas de recirculación aquí propuestos no afecta negativamente el crecimiento de las plantas respecto a un sistema abierto. En cambio, varios autores (Zekki *et al.*, 1996; Tunali *et al.*, 2009; Massa *et al.*, 2010) reportan disminuciones en el crecimiento o rendimiento al manejar sistemas con recirculación, y ello generalmente es debido a que los ciclos de

producción convencionales son tan largos que, con el paso del tiempo, ocasionan desequilibrios importantes en la solución nutritiva o promueven la aparición de enfermedades que poco a poco se diseminan en todo el cultivo (Sánchez *et al.*, 2014b).

**Cuadro 3. Cuadrados medios y significancia estadística de variables de peso seco por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Fuentes de variación | GL | Hojas  | Tallo | Raíz  | Fruto  | Total  | IC    |
|----------------------|----|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Tratamiento          | 3  | 94.31  | 1.11  | 2.73  | 116.13 | 330.80 | 0.001 |
| Repetición           | 3  | 176.54 | 7.95  | 0.41  | 138.44 | 50.45  | 0.007 |
| Error                | 9  | 62.62  | 4.27  | 3.54  | 206.22 | 429.53 | 0.002 |
| Total                | 15 |        |       |       |        |        |       |
| CV (%)               |    | 19.71  | 11.74 | 15.88 | 23.57  | 15.88  | 10.18 |

GL: Grados de libertad. CV: Coeficiente de variación.

En todos los tratamientos, la mayor distribución de peso seco se tuvo en los frutos, seguido de las hojas y tallo, y en menor proporción en la raíz, resultando en un índice de cosecha de 47, 45, 48 y 44 % en los tratamientos 1 a 4, respectivamente (Cuadro 4), sin diferencias estadísticas entre éstos.

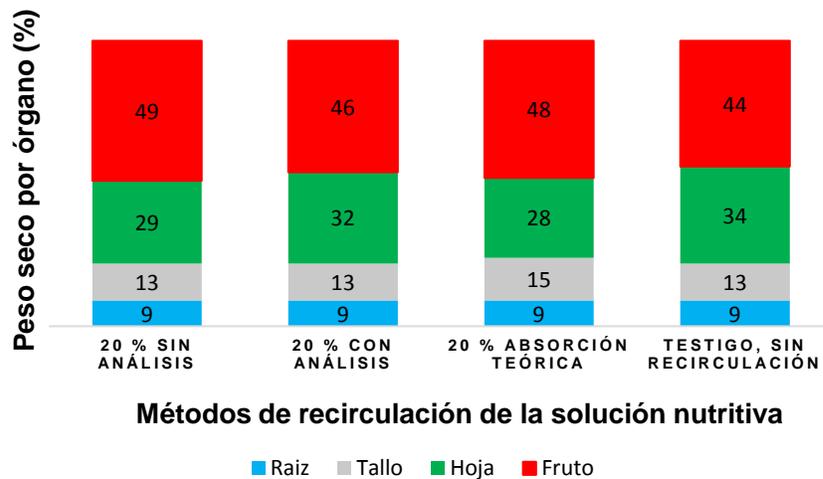
**Cuadro 4. Comparación de medias de variables de peso seco (g) por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Hoja   | Tallo  | Raíz   | Fruto  | Total   | IC     |
|--|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 40.7 a | 18.3 a | 12.7 a | 68.7 a | 140.4 a | 0.47 a |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 42.4 a | 17.3 a | 12.0 a | 60.2 a | 132.0 a | 0.45 a |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 33.1 a | 17.6 a | 10.7 a | 56.8 a | 118.4 a | 0.48 a |
| T4 (testigo, sistema abierto)                      | 44.2 a | 17.0 a | 11.9 a | 57.8 a | 131.0 a | 0.44 a |
| DMS  | 17.4   | 4.5    | 4.1    | 31.7   | 45.7    | 0.10   |

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia mínima significativa.

En la Figura 10, también se presenta la distribución de peso seco promedio para cada uno de los tratamientos evaluados, observándose los siguientes porcentajes: 47, 31, 13 y 9 % en fruto, hojas, tallo y raíz, respectivamente. Resultados semejantes fueron reportados por Aragón (2019) al señalar que, del

peso seco total de la planta, 50.6 % correspondía a peso de fruto; 32.9, 12.7 y 3.8 % a hoja, tallo y raíz, respectivamente. Nuñez-Ramírez *et al.* (2012) en jitomate a los 180 ddt, encontraron que 54 % de la materia seca se tuvo en frutos y 46 % en hojas y tallos. Vargas-Canales *et al.* (2014) para jitomate cultivado en mezclas (v/v) de tezontle con aserrín nuevo y aserrín reciclado, encontraron 60 % del peso en frutos y flores, 30 % en hojas y menos de 10 % en tallos.



**Figura 10. Distribución de peso seco por órgano (%) en planta de jitomate a los 101 días después del trasplante para diferentes métodos de recirculación de solución nutritiva.**

#### 4.3. Variables del rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza (Cuadro 5) y las comparaciones de medias (Cuadro 6), muestran que no hubo efectos significativos entre tratamientos para rendimiento y sus componentes ni entre métodos de recirculación de la solución nutritiva, ni con respecto al testigo. El rendimiento osciló entre 11.13 y 12.71 kg por m<sup>2</sup> de invernadero, en un periodo de 110 días de trasplante a fin de cosecha, lo que da la oportunidad de obtener tres ciclos por año. Poniendo como ejemplo el tratamiento T3, que rindió 11.6 kg por m<sup>2</sup>, se tendría potencialmente un rendimiento anual de 348 toneladas por ha, que es similar e incluso ligeramente mayor a lo que en promedio se logra producir en un sistema de manejo convencional (Castellanos y Borbón, 2009). De acuerdo con otras

investigaciones similares (Sánchez *et al.*, 2014b; Aragón, 2019), se esperaba un rendimiento mayor a lo obtenido (al menos 15 kg por m<sup>2</sup> en un ciclo de cuatro meses de trasplante a fin de cosecha); sin embargo, el rendimiento relativamente bajo que se obtuvo, posiblemente fue por el alto índice de área foliar formado (alrededor de 5) lo que provocó sombreado entre las plantas y mayor tasa de respiración de mantenimiento afectándose la fotosíntesis neta diaria (Sánchez y Moreno, 2017).

De cualquier manera, con los resultados obtenidos se puede señalar que, cualquiera de los tratamientos de recirculación de la solución nutritiva evaluado, es susceptible de ser implementado en el sistema de producción de jitomate en ciclos cortos, sin menoscabo del rendimiento, con ventajas en ahorro de agua y fertilizantes con relación al tratamiento testigo, sin recirculación.

De lo anterior también se puede señalar que:

El tratamiento con 20 % de recirculación sin análisis de los drenajes (T1), además de presentar ahorros en agua y fertilizantes, es el más sencillo de llevarse a la práctica por los productores, ya que sólo se debe seguir el procedimiento de recircular el 20 % del agua drenada y preparar el 80 % de la solución nutritiva inicial.

El tratamiento con 20 % de recirculación con análisis de los drenajes (T2) tiene por la recirculación, un ahorro de 20 % en agua, y dependiendo del contenido nutrimental en dicha agua drenada, puede haber ahorros adicionales en fertilizantes, no obstante, su implementación resulta técnicamente más difícil y costosa para el productor.

El tratamiento con 20 % de recirculación con base en la absorción teórica de las plantas de cultivo (T3), posee la ventaja de que, además del ahorro de 20 % de agua, se tendría teóricamente un ahorro adicional de 50 % en calcio, magnesio y azufre, así como de un 10 % en nitrógeno, fósforo y potasio, que lo hace muy atractivo desde el punto de vista económico por el mayor ahorro en fertilizantes,

pero sus principal desventajas son el alto costo, la dificultad técnica y la tardanza de dichos análisis.

Finalmente, con el tratamiento testigo que es sin recirculación de la solución nutritiva (T4), no se tiene la posibilidad de tener ningún ahorro de agua ni de fertilizantes.

**Cuadro 5. Cuadrados medios y significancia estadística de variables de rendimiento en jitomate con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Fuente de variación</b> | <b>GL</b> | <b>Número de frutos</b> | <b>Peso medio de frutos</b> | <b>Rendimiento</b> |
|----------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Tratamiento                | 3         | 106.53                  | 122.31                      | 3.08               |
| Repetición                 | 6         | 32.92                   | 126.58                      | 0.68               |
| Error                      | 18        | 78.48                   | 47.42                       | 1.10               |
| Total                      | 27        |                         |                             |                    |
| CV (%)                     |           | 8.38                    | 6.15                        | 8.88               |

GL: Grados de libertad. CV: Coeficiente de variación.

**Cuadro 6. Comparación de medias de variables de rendimiento en jitomate con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>Número de frutos (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso medio de frutos (g)</b> | <b>Rendimiento (kg por m<sup>2</sup>)</b> |
|--|---|---------------------------------|---|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 100.58 a                                | 110.48 a                        | 11.13 a                                   |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 107.98 a                                | 118.09 a                        | 12.71 a                                   |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 104.68 a                                | 110.76 a                        | 11.60 a                                   |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 109.34 a                                | 108.61 a                        | 11.79 a                                   |
| DMS  | 13.38                                   | 10.41                           | 1.58                                      |

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia mínima significativa.

#### **4.4. Variables relacionadas con el consumo de agua y balance nutrimental**

##### **4.4.1. Gasto en agua y macronutrientes durante el ciclo de cultivo**

En el Cuadro 7 se puede observar que el volumen de agua aplicada por planta durante el periodo de trasplante a fin de cosecha (110 días) fue de 54.7 litros (437.6 litros por m<sup>2</sup> de invernadero) para cada uno de los tratamientos con

recirculación de solución nutritiva, mientras que para el tratamiento testigo sin recirculación (T4), el gasto ascendió a 68.4 litros por planta (547.2 litros por m<sup>2</sup> de invernadero). Esta diferencia de 14 litros por planta se debió a que, en los primeros tres tratamientos, se recirculó la solución drenada, la cual correspondió a un 20 % de lo aplicado. Extrapolando estos datos a una ha de invernadero y con el establecimiento de tres ciclos de cultivo al año, que es posible en el sistema de tres racimos por planta, se obtendría un ahorro aproximado de 3,288 m<sup>3</sup> de agua por el hecho de recircular la solución nutritiva drenada, lo que representa una considerable disminución en el uso de este recurso. Al respecto, Benoit y Ceustermans (1995) citados por Gul (2011) señalan que, para cultivos sin suelo, con 15 a 25 % de sobre-riego de la solución nutritiva, se pierden aproximadamente 2,900 m<sup>3</sup> por año. Sánchez *et al.* (2014b) en un estudio similar reportaron ahorros de 32.6 % en agua al comparar un sistema con recirculación de solución nutritiva respecto a uno sin recirculación en el cultivo de jitomate cultivado en camas rellenas con sustrato de tezontle.

En el tratamiento con recirculación de la solución nutritiva sin análisis (T1), se esperaba un ahorro de 20 % de nutrientes respecto al testigo; sin embargo, sólo se ahorró 16.5 % debido a que por un mes después del trasplante todos los tratamientos recibieron solución nutritiva completa. En el Cuadro 7 también se observa que en el tratamiento T1, fue con el que se aplicó menos nitrógeno, fósforo y potasio (11.4, 2.8 y 14.5 g por planta, respectivamente).

En el caso del tratamiento con recirculación según la absorción teórica establecida (T3), se aplicó menor calcio y azufre en la solución nutritiva, con ahorros en comparación al testigo (T4) de 38.9, 35.1, y 41.3 % en calcio, magnesio y azufre, respectivamente. Aunque en la preparación de la solución nutritiva en este método para estos tres elementos se suministró solamente el 50 % de lo aplicado en la solución completa, el ahorro no fue de esa magnitud en virtud de que la recirculación de la solución nutritiva en este tratamiento también se inició un mes después del trasplante.

Aportes parecidos fueron reportados por Aragón (2019) en un cultivo de jitomate en el que se evaluaron diferentes fuentes de fertilizantes y concentraciones de solución nutritiva.

Sánchez *et al.* (2014b) en un experimento con recirculación de solución nutritiva exhibieron aportes de macronutrientes por planta en jitomate de 9.8, 5.1, 22.5, 15.5 para nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, respectivamente.

**Cuadro 7. Gasto de agua en litros y macronutrientes en g aplicados por planta y (m<sup>2</sup>) de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>Agua</b>     | <b>N</b>        | <b>P</b>      | <b>K</b>        | <b>Ca</b>       | <b>Mg</b>      | <b>S</b>       |
|--|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 54.7<br>(437.6) | 11.4<br>(91.3)  | 2.8<br>(22.4) | 14.5<br>(116.0) | 15.1<br>(120.8) | 2.6<br>(20.8)  | 8.5<br>(68.0)  |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 54.7<br>(437.6) | 12.2<br>(97.6)  | 3.3<br>(26.4) | 16.6<br>(132.8) | 14.5<br>(116.0) | 2.0<br>(16)    | 8.3<br>(66.4)  |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 54.7<br>(437.6) | 12.5<br>(100.0) | 3.1<br>(24.8) | 15.9<br>(127.2) | 11.0<br>(88.0)  | 2.1<br>(16.80) | 6.0<br>(48.0)  |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 68.4<br>(547.6) | 13.6<br>(108.8) | 3.4<br>(27.2) | 17.3<br>(138.4) | 18.1<br>(145.8) | 3.2<br>(25.6)  | 10.2<br>(81.6) |

Tomando en cuenta el tratamiento T1 que fue en el que más ahorro hubo de nitrógeno, fósforo y potasio, y considerando una densidad de población de 80,000 plantas por ha y tres ciclos anuales de producción, los ahorros con relación al testigo (T4) serían en el orden de 528, 144, 672, 720, 144 y 408 kg de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre por ha, respectivamente.

#### **4.4.2. Macronutrientes absorbidos por la planta**

El análisis de varianza (Cuadro 8) y de comparaciones de medias (Cuadro 9) muestran que entre tratamientos no hay diferencias significativas para ninguno de los nutrientes determinados en tejido vegetal.

El aporte de macronutrientes fue diferente para cada método de recirculación evaluado (Cuadro 7), por lo que, el hecho de que no haya diferencia entre tratamientos, sugiere que las plantas absorbieron la misma proporción de nutrientes independientemente de la cantidad que se les haya aportado. Con los resultados obtenidos podemos señalar que con el manejo de jitomate en ciclos cortos se pueden lograr ahorros considerables en fertilizantes con cualquiera de los métodos de recirculación probados, sin que se afecte la tasa de absorción de nutrientes por las plantas.

De manera general, las plantas absorbieron mayor cantidad de potasio, seguido de nitrógeno y calcio, y en menor proporción fósforo, magnesio y azufre, resultados que concuerdan con Quesada y Bertsch (2013), Vargas-Canales (2014) y Aragón (2019) en estudios similares con jitomate. Cabe señalar que los porcentajes de macronutrientes absorbidos por las plantas estuvieron dentro de los rangos de suficiencia reportados por Guardiola y García (1990) y Sánchez (2004) para un crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas.

La mayor absorción de potasio, nitrógeno y calcio respecto a los otros nutrientes posiblemente se debe a sus numerosas funciones fisiológicas. El potasio participa en el equilibrio eléctrico en el citoplasma y la regulación de la apertura estomática; además, juega un papel importante en la activación de reacciones enzimáticas en la fotosíntesis y respiración. El nitrógeno es utilizado para sintetizar aminoácidos, formar clorofila, proteínas, enzimas, nucleótidos, ácidos nucleicos y ácidos orgánicos esenciales. El calcio participa en la estabilidad de la pared celular al formar pectatos de calcio, además, tiene el papel de regulación y permeabilidad de la membrana y la integridad estructural de la célula (León, 2001; Mia, 2015).

De acuerdo con Alcántar *et al.* (2016) la porción mineral presente en la materia seca del tejido vegetal debe estar entre 2 y 10 %; en esta investigación, dicho porcentaje fue de al menos 10 %, lo que confirma que las plantas tuvieron disponibles los elementos necesarios para su crecimiento y desarrollo.

**Cuadro 8. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes absorbidos por planta de jitomate a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Fuente de variación | GL | N     | P     | K     | Ca    | Mg    | S     |
|---------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |    |       |       |       | 0.61  |       |       |
| Tratamiento         | 3  | 0.46  | 0.04  | 1.12  |       | 0.24  | 0.15  |
| Repetición          | 3  | 0.06  | 0.02  | 0.79  | 0.10  | 0.02  | 0.00  |
| Error               | 9  | 0.62  | 0.01  | 0.52  | 0.42  | 0.07  | 0.06  |
| Total               | 15 |       |       |       |       |       |       |
| CV (%)              |    | 26.20 | 16.07 | 12.57 | 22.75 | 34.66 | 36.31 |

GL: Grados de libertad. CV: Coeficiente de variación.

**Cuadro 9. Macronutrientes absorbidos por planta de jitomate en g y (%) en tejido vegetal a los 101 días después del trasplante con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | N                | P                | K                | Ca               | Mg               | S                |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 3.47 a<br>(2.45) | 0.93 a<br>(0.66) | 6.38 a<br>(4.60) | 3.20 a<br>(2.27) | 1.14 a<br>(0.80) | 0.94 a<br>(0.65) |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 3.09 a<br>(2.32) | 0.87 a<br>(0.66) | 5.94 a<br>(4.50) | 2.91 a<br>(2.20) | 0.66 a<br>(0.50) | 0.68 a<br>(0.51) |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 2.74 a<br>(2.30) | 0.70 a<br>(0.59) | 5.13 a<br>(4.17) | 2.29 a<br>(1.95) | 0.61 a<br>(0.52) | 0.64 a<br>(0.54) |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 2.77 a<br>(2.12) | 0.92 a<br>(0.71) | 5.58 a<br>(4.30) | 3.00 a<br>(2.27) | 0.65 a<br>(0.50) | 0.46 a<br>(0.35) |
| DMS  | 1.74             | 0.30             | 1.60             | 1.43             | 0.58             | 0.54             |

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia mínima significativa.

#### 4.4.3. Macronutrientes solubles contenidos en los drenajes

Los análisis del laboratorio (Cuadro 10) muestran que la cantidad de macronutrientes lixiviados, solubles en el drenaje, fue semejante en todos los tratamientos con recirculación. El nutriente que más se lixivió fue calcio, seguido de azufre, nitrógeno y magnesio, y en menor cantidad potasio.

Para el caso particular del fósforo, las determinaciones en el laboratorio mostraron que dicho elemento no existía en la solución drenada. Esto posiblemente por una alta precipitación del fósforo en el sustrato y en la misma

solución drenada, ocasionado por un pH elevado (Baca *et al.*, 2016), que en promedio fue de 7.9.

Desafortunadamente no se tuvieron datos de macronutrientes drenados del tratamiento testigo para su comparación entre el sistema abierto y los sistemas cerrados que fueron evaluados.

**Cuadro 10. Macronutrientes solubles drenados (g por planta de jitomate) durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>N</b> | <b>P</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> | <b>S</b> |
|--|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 1.31     | 0.01     | 0.74     | 3.00      | 1.08      | 1.40     |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 1.39     | 0.00     | 0.67     | 3.20      | 1.15      | 1.52     |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 1.18     | 0.00     | 0.48     | 3.02      | 1.16      | 1.53     |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | -        | -        | -        | -         | -         | -        |

Extrapolando los datos de macronutrientes drenados por planta a una ha de invernadero en un ciclo de producción de 110 días de trasplante a fin de cosecha, y considerando una densidad de población de 8 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero, las pérdidas aproximadas para el caso del tratamiento con 20 % de recirculación y análisis de los drenajes (que fue en el que más cantidad de nutrientes se encontró), serían del orden de 111.2 kg de nitrógeno, 53.6 kg de potasio, 256 kg de calcio, 92 kg de magnesio y 121.6 kg de azufre por ciclo de cultivo. En el caso de que se establecieran tres ciclos de cultivo al año, entonces las pérdidas anuales serían de 333.6, 160.8, 768, 276 y 364.8 kg de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y azufre, respectivamente, lo que representa 11, 4, 22, 57.5 y 18 % del total aplicado para cada nutriente durante todo el ciclo de cultivo.

Según Hansson (2003) citado por Bergstrand (2010) en un sistema hidropónico abierto de un ciclo de cultivo al año, se tienen pérdidas promedio de 850 kg de nitrógeno, 80 kg de fósforo y 850 kg de potasio por ha. Por lo tanto, el hacer recirculación de la solución nutritiva disminuye el costo de producción, lográndose ahorros económicos importantes para el productor.

#### 4.4.4. Macronutrientes resolubilizados del sustrato

El análisis de varianza (Cuadro 11) de los macronutrientes precipitados en el sustrato que fueron posteriormente resolubilizados, muestra que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos solamente para nitrógeno.

En el análisis de comparación de medias (Cuadro 12) se puede observar que el contenido de nitrógeno en el tratamiento con 20 % de recirculación y análisis de los drenajes (T2) fue superior al tratamiento con 20 % de recirculación basado en la absorción teórica (T3), pero estadísticamente igual a los otros dos tratamientos.

El nitrógeno fue el nutriente que más se resolubilizó, seguido con proporciones similares de magnesio y azufre, y en menor cantidad potasio y calcio. El fósforo no se logró resolubilizar mediante el método empleado, posiblemente debido a que el agua utilizada poseía un pH cercano a la neutralidad como lo señalan Baca *et al.* (2016) o bien porque es fijado fuertemente en las partículas de tezontle como lo mencionan Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008), razón por la que tampoco se encontró fósforo en la solución drenada.

**Cuadro 11. Cuadrados medios y significancia estadística de macronutrientes resolubilizados del sustrato por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Fuente de variación | GL | N      | P | K     | Ca    | Mg    | S     |
|---------------------|----|--------|---|-------|-------|-------|-------|
| Tratamiento         | 3  | 0.43** | - | 0.08  | 0.04  | 0.00  | 0.12  |
| Repetición          | 6  | 0.11   | - | 0.01  | 0.00  | 0.13  | 0.04  |
| Error               | 18 | 0.09   | - | 0.05  | 0.01  | 0.15  | 0.04  |
| Total               | 27 |        |   |       |       |       |       |
| CV (%)              |    | 23.40  | - | 32.74 | 26.67 | 41.73 | 24.36 |

\*\* : Altamente significativo (P= 0.01). GL: Grados de libertad. CV: Coeficiente de variación.

Cabe señalar que la alta rugosidad del tezontle da por resultado una alta superficie expuesta a la evaporación, misma que provoca la precipitación de sales. Algunas de las cuales pueden resolubilizarse al hidratarlas nuevamente, pero la mayoría generalmente quedan precipitadas.

**Cuadro 12. Macronutrientes resolubilizados del sustrato (g por planta de jitomate) durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>N</b> | <b>P</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> | <b>S</b> |
|--|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 1.27 ab  | 0        | 0.60 a   | 0.56 a    | 0.94 a    | 0.80 a   |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 1.57 a   | 0        | 0.67 a   | 0.52 a    | 0.96 a    | 0.74 a   |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 1.01 b   | 0        | 0.83 a   | 0.38 a    | 0.88 a    | 0.92 a   |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 1.47 ab  | 0        | 0.81 a   | 0.52 a    | 0.95 a    | 1.04 a   |
| DMS  | 0.47     | -        | 0.36     | 0.20      | 0.59      | 0.32     |

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, P=0.05). DMS: Diferencia mínima significativa.

De acuerdo con los valores obtenidos de macronutrientes resolubilizados del sustrato, para una ha de invernadero en un ciclo de producción de 110 días de trasplante a fin de cosecha y considerando una densidad de población de 8 plantas por m<sup>2</sup> de invernadero, las pérdidas por retención de nutrientes en el sustrato para el tratamiento con análisis de los drenajes (T2), serían alrededor de 125.6 kg de nitrógeno, 53.6 kg de potasio, 41.6 kg de calcio, 76.8 kg de magnesio y 59.2 kg de azufre por ciclo de cultivo. Con excepción del nitrógeno, los resultados obtenidos son menores a los reportados por Aragón (2019) para jitomate, quien encontró 52.1 kg de nitrógeno, 4.2 kg de fósforo, 257 kg de potasio, 321 kg de calcio y 98.5 kg de magnesio resolubilizados del sustrato por ha en un ciclo de cultivo de 85 días de trasplante a fin de cosecha.

#### **4.5. Balance final de macronutrientes en el sistema**

En este apartado se muestran los macronutrientes aportados con la solución nutritiva, absorbidos por la planta, lixiviados como iones solubles en el drenaje, resolubilizados del sustrato, así como la porción que no se logró determinar y que pudo haberse precipitado o fijado en el sustrato, o bien volatilizado.

#### 4.5.1. Balance final de nitrógeno

En general, entre los tratamientos estudiados no existen diferencias importantes en la distribución del nitrógeno suministrado en el sistema. Del total de nitrógeno aportado al cultivo, entre 20 a 30 % fue absorbido por las plantas, alrededor de 9 a 11 % drenó como iones solubles y el 6 a 10 % fue resolubilizado del sustrato; el resto que corresponde entre el 49 y 62 %, pudo haberse volatilizado, o quedado precipitado o fijado en el sustrato (Cuadro 13).

El nitrógeno se aplicó principalmente en forma de nitrato, y de acuerdo con Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008) esta forma posee una alta solubilidad y baja afinidad por las superficies cargadas positivamente en el sustrato, en comparación con otros nutrientes como fosfatos y sulfatos, con lo que se espera poca precipitación o fijación de dicho elemento en el sustrato, por lo que es posible que una alta proporción de nitrógeno se haya perdido por volatilización al convertirse el nitrógeno en forma gaseosa, ya sea como  $N_2$  o  $N_2O$ , o bien por la conversión del amonio a amoníaco, tal como lo mencionan Mengel y Kirkby (2001) y Alcántar *et al.* (2016).

Por su parte, Barker y Bryson (2006) señalan que las plantas absorben una alta cantidad del nitrógeno que se aplica, aunque también se dan procesos de lixiviación, desnitrificación, volatilización y fijación del mismo. Brown (2008) indica que normalmente alrededor del 75 % de nitrato aplicado al cultivo puede llegar a ser consumido por la planta.

Resultados similares a esta investigación fueron encontrados por Aragón (2019) en un estudio en jitomate para una formulación de solución nutritiva convencional al 80 %. En dicho estudio del total de nitrógeno aplicado, el 30 % fue absorbido por las plantas, 7.4 % fue lixiviado en el drenaje, 2.6 % se resolubilizó del sustrato y el 60 % restante no se logró determinar su ubicación. Sin embargo, Pineda *et al.* (2011) en jitomate reportaron resultados diferentes al presente estudio; encontraron que a los 74 días después del trasplante el 80 % del nitrógeno total

aplicado había sido absorbido por las plantas, almacenado por el sustrato 1.9 % y perdido en el drenaje solamente 18 %. La mayor eficiencia de utilización se atribuye a la dosis menor aplicada en ese estudio.

**Cuadro 13. Balance de nitrógeno en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento                                      | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)          | 11.4<br>(100)  | 3.47<br>(30)            | 1.31<br>(11)                   | 1.27<br>(11)   | 5.35<br>(47)             |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)          | 12.2<br>(100)  | 3.09<br>(25)            | 1.39<br>(11)                   | 1.57<br>(13)   | 6.15<br>(50)             |
| T3 (20 % de recirculación con absorción teórica) | 12.5<br>(100)  | 2.74<br>(22)            | 1.18<br>(9)                    | 1.01<br>(8)    | 7.57<br>(61)             |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                    | 13.6<br>(100)  | 2.77<br>(20)            | -                              | 1.47<br>(11)   | 9.36*<br>(69)            |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

#### 4.5.2. Balance final de fósforo

Del total de fósforo aportado, entre 23 y 33 % fue absorbido por las plantas (Cuadro 14). No se encontró fósforo en los drenajes ni en lo resolubilizado del sustrato con la metodología manejada, por lo que se asume que entre 66 y 77 % quedó ya sea fijado en el sustrato o en forma precipitada en el mismo o como sales no disueltas como fosfato de calcio en la fracción drenada. Pineda *et al.* (2011) encontraron 54.8 % de fósforo almacenado en el sustrato, 38.3 % absorbido por las plantas y 6.8 lixiviado.

Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008) señalan que la concentración de fósforo en una solución nutritiva disminuye continuamente después de su aplicación, a través de dos mecanismos. El primero tiene que ver con la afinidad del fósforo para ser adsorbido por las partículas del sustrato, y que sucede en cuestión de minutos. El segundo mecanismo es mediante la

formación de nuevos compuestos de fósforo con calcio y magnesio a pH alcalino y que se lleva a cabo en cuestión de horas o días. Posiblemente el fósforo tenga afinidad con el tezontle y sea fijado en poco tiempo, por lo cual se explicaría que no se encontró fósforo en la solución drenada.

**Cuadro 14. Balance de fósforo en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 2.8<br>(100)   | 0.93<br>(33)            | 0.01<br>(0.4)                  | 0.00<br>(0)    | 1.86<br>(66)             |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 3.3<br>(100)   | 0.87<br>(26)            | 0.00<br>(0)                    | 0.00<br>(0)    | 2.43<br>(74)             |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 3.1<br>(100)   | 0.70<br>(23)            | 0.00<br>(0)                    | 0.00<br>(0)    | 2.4<br>(77)              |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 3.4<br>(100)   | 0.92<br>(27)            | -                              | 0.00<br>(0)    | 2.48*<br>(73)            |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

Al respecto, Baca *et al.* (2016) mencionan que el fósforo es afectado por el pH de la solución nutritiva en su forma química y en consecuencia en su concentración. Cuando la solución nutritiva se encuentra en un pH de 5 casi todo el fósforo está en forma de ortofosfato monobásico ( $H_2PO_4^-$ ), pero cuando el pH se eleva a 7.2, sólo el 50 % se encuentra en esta forma y el resto en forma de ortofosfato dibásico ( $HPO_4^{2-}$ ), que tiende a formar ortofosfato dibásico de calcio ( $CaHPO_4$ ) al asociarse con el ion calcio, y como esta sal es muy poco soluble, basta una cantidad pequeña en la solución para que precipite, lo que pudo haber ocurrido en el presente trabajo, ya que en promedio el pH encontrado en la solución drenada fue de 7.9, la CE fue de 2.7 y los análisis de laboratorio mostraron que prácticamente no había fosforo presente.

### 4.5.3. Balance final de potasio

El porcentaje de potasio absorbido por la planta estuvo entre 32 y 44 % respecto al total aplicado, 3 a 5 % se lixivió como iones solubles en el drenaje y 4 a 5 % fue resolubilizado, quedando entre 47 y 59 % precipitado o fijado en el sustrato o una parte de ésta precipitado en el drenaje (Cuadro 15). Aragón (2019) registró 47, 15, 12 y 26 % de potasio absorbido por la planta, lixiviado, resolubilizado del sustrato y posiblemente precipitado o fijado en el sustrato, respectivamente. Por su parte, Pineda et al. (2011) registraron 39.3 % absorbido por la planta, 35.1 % retenido en el sustrato y 25.5 % perdido en el drenaje.

Los resultados de absorción por la planta coinciden parcialmente con los autores arriba mencionados; sin embargo, lo precipitado o fijado en el sustrato fue mayor. Brown (2008) señala que el potasio es muy soluble en agua, pero no se lixivias fácilmente. Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008) mencionan que el potasio no está involucrado en las reacciones de precipitación a un valor apreciable, por lo que es muy probable que en esta investigación la proporción de potasio faltante haya quedado fijado en el sustrato.

**Cuadro 15. Balance de potasio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 14.5<br>(100)  | 6.38<br>(44)            | 0.74<br>(5)                    | 0.60<br>(4)    | 6.78<br>(47)             |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 16.6<br>(100)  | 5.94<br>(36)            | 0.67<br>(4)                    | 0.67<br>(4)    | 9.32<br>(56)             |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 15.9<br>(100)  | 5.13<br>(32)            | 0.48<br>(3)                    | 0.83<br>(5)    | 9.46<br>(59)             |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 17.3<br>(100)  | 5.58<br>(32)            | -                              | 0.81<br>(5)    | 10.91<br>(63)            |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

#### 4.5.4. Balance final de calcio

Del total de calcio aportado, 17 a 21 % fue absorbido por la planta, 20 a 27 % fue drenado como iones solubles, 3 a 4 % resolubilizado y en el 48 a 55 % restante muy probablemente una parte drenó y precipitó como fosfato de calcio en la solución drenada, y quizá otra parte se haya fijado o precipitado en el sustrato (Cuadro 16) tal como lo mencionan Baca *et al.* (2016).

Resultados similares en el porcentaje de absorción de calcio por las plantas fueron encontrados por Aragón (2019), quien reporta que del total de calcio aplicado el 20 % fue absorbido por la planta, 32 % lixiviado en el drenaje y 12 % fue resolubilizado del sustrato; el 36 % restante lo adjudicó a posible precipitación o absorción por el sustrato. Pineda *et al.* (2011) registraron 24.3 % absorbido por la planta, 38.8 % retenido en el sustrato y 36.8 % perdido en el drenaje. Así mismo, Sánchez *et al.* (2014b) encontraron que, en un sistema abierto en camas con sustrato de tezontle y plantas de jitomate, el 56 % del total de calcio aplicado fue absorbido por la planta y el 44 % restante fue considerado como desechado.

**Cuadro 16. Balance de calcio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 15.1<br>(100)  | 3.20<br>(21)            | 3.00<br>(20)                   | 0.56<br>(4)    | 834<br>(55)              |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 14.5<br>(100)  | 2.91<br>(20)            | 3.20<br>(22)                   | 0.52<br>(4)    | 7.87<br>(54)             |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 11.0<br>(100)  | 2.29<br>(21)            | 3.02<br>(27)                   | 0.38<br>(3)    | 5.31<br>(48)             |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 18.1<br>(100)  | 3.00<br>(17)            | -                              | 0.52<br>(3)    | 14.58*<br>(80)           |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

#### 4.5.5. Balance final de magnesio

El porcentaje de magnesio absorbido por la planta respecto al total aportado fue 20 a 44 %; 41.5 a 57.5 % se perdió como iones solubles en el drenaje y 30 a 48 % se resolubilizó del sustrato (Cuadro 17). La suma del magnesio absorbido más lo drenado más lo resolubilizado, resultó en promedio 28 % mayor a lo aportado con la solución nutritiva, lo que indica que el tezontle liberó este elemento, pues en una prueba preliminar se encontró que el tezontle contenía 36 mg por kg de sustrato (0.8 g por planta), es decir, 30.7, 40, 38 y 25 % del total aportado en el riego para el T1, T2, T3 y T4 respectivamente.

De acuerdo con Burés (1997) la arena de tezontle rojo posee entre otros nutrientes, alrededor de 25 ppm de magnesio que podrían haber influenciado en los resultados obtenidos. En un estudio similar, Aragón (2019), también reportó 24 % de más magnesio, en relación a lo aportado.

**Cuadro 17. Balance de magnesio en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 2.6<br>(100)   | 1.14<br>(44)            | 1.08<br>(41.5)                 | 0.94<br>(36)   | -0.56<br>(+21.5)         |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 2.0<br>(100)   | 0.66<br>(33)            | 1.15<br>(57.5)                 | 0.96<br>(48)   | -0.77<br>(+38.5)         |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 2.1<br>(100)   | 0.61<br>(29)            | 1.16<br>(55)                   | 0.88<br>(42)   | -0.55<br>(+26)           |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 3.2<br>(100)   | 0.65<br>(20)            | -                              | 0.95<br>(30)   | 1.6*<br>(50)             |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

#### 4.5.6. Balance final de azufre

El azufre absorbido por la planta se encontró entre 4 y 11 % del total aplicado, entre el 16 y 25.5 % lixivió en el drenaje y 9 a 15 % fue resolubilizado; el 48.5 a 65 % restante posiblemente tuvo reacciones de precipitación o fijación en el sustrato o precipitación en la solución drenada ya que el calcio al combinarse con el azufre forma sulfato de calcio, que es muy poco soluble como lo menciona Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008), e incluso es posible que una parte del azufre se haya perdido por volatilización (Claros, 2012).

**Cuadro 18. Balance de azufre en g (%) respecto al total aplicado por planta de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Total aportado | Absorbido por la planta | Iones solubles en el lixiviado | Resolubilizado | Fracción no cuantificada |
|--|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 8.5<br>(100)   | 0.94<br>(11)            | 1.40<br>(16)                   | 0.80<br>(9)    | 5.36<br>(63)             |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 8.3<br>(100)   | 0.68<br>(8)             | 1.52<br>(18)                   | 0.74<br>(9)    | 5.36<br>(65)             |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 6.0<br>(100)   | 0.64<br>(11)            | 1.53<br>(25.5)                 | 0.92<br>(15)   | 2.91<br>(48.5)           |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 10.2<br>(100)  | 0.46<br>(4)             | -                              | 1.04<br>(10)   | 8.70*<br>(85)            |

\*: Fracción no cuantificada + iones solubles en el lixiviado.

De manera general, se observa que con el tratamiento de recirculación sin análisis de los drenajes (T1) hubo una tendencia de mayor absorción de los distintos nutrientes. También se observa que, en todos los tratamientos evaluados, más del 50 % de los macronutrientes se encuentran precipitados, fijados o volatilizados en la fracción no cuantificada. Sin embargo, es importante resaltar que, a pesar de estas pérdidas, el análisis de absorción nutrimental en el tejido vegetal, mostró que todos los macronutrientes se encontraban dentro de

los rangos de suficiencia que se han reportado para el cultivo de jitomate (Sánchez, 2004), por lo que esto no afectó el rendimiento final.

Sería interesante conocer hasta cuánto pudiera disminuirse la concentración de nutrientes en la solución nutritiva aplicada para bajar costos sin que se afecte el rendimiento, pues al parecer, con el sistema de manejo del jitomate en ciclos cortos utilizando tezontle rojo como sustrato, esto es factible, pero se requieren nuevas investigaciones. También sería interesante estudiar a profundidad el porqué de tan altos porcentajes de precipitación y/o fijación de nutrientes y si es posible, con técnicas que eviten la evaporación en la superficie del tezontle, como el acolchado, disminuir de manera importante estas pérdidas.

#### **4.6. Eficiencia en el uso de agua y nutrientes**

La posibilidad de ahorro en agua y nutrimentos, sin disminuir el rendimiento, es muy importante para los productores, ya que se pueden reducir los costos de producción, además de aminorar la acumulación de fertilizantes en el manto freático.

##### **Eficiencia del uso de agua en los métodos evaluados:**

En el Cuadro 19 se muestra la eficiencia alcanzada en el uso del agua para producir un kg de fruto de jitomate con los diferentes métodos de aplicación de solución nutritiva. Definida la eficiencia del uso de agua como la cantidad de agua requerida para producir un kg de fruto, el tratamiento con 20 % de recirculación de solución nutritiva y análisis de los drenajes (T2) fue el método más eficiente con una eficiencia de 34.7 litros por kg de fruto producido; 25.5 % más eficiente respecto al testigo, que ocupó 46.5 litros para producir un kg de fruto. Estos resultados coinciden con Marfá (2000), quien reporta para un sistema con recirculación de solución nutritiva una eficiencia de 37.9 litros por kg de fruto de jitomate producido; el mismo autor menciona que, para un sistema abierto, el gasto asciende hasta 54.8 litros por kg. Aragón (2019) reportó 32 litros para producir un kg de fruto de jitomate. Según Salazar *et al.* (2014) en España en condiciones de invernadero, son necesarios 30 a 40 litros de agua por kg de fruto

producido. En Holanda con un mayor control de las condiciones ambientales el gasto de agua es de solamente 15 litros por kg.

**Cuadro 19. Eficiencia del sistema en el uso de agua para producir un kg de fruto de jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| Tratamiento  | Agua aplicada<br>(litros por planta) | Rendimiento        |                               |
|--|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
|  |                                      | (kg por<br>planta) | Eficiencia<br>(litros por kg) |
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 54.7                                 | 1.39               | 39.3                          |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 54.7                                 | 1.58               | 34.6                          |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 54.7                                 | 1.45               | 37.7                          |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 68.4                                 | 1.47               | 46.5                          |

#### **Eficiencia en el uso de nutrientes en los métodos evaluados:**

##### **Eficiencia (litros por kg)**

En cuanto a la eficiencia del uso de nutrientes en los diferentes métodos evaluados, se observa que los sistemas de recirculación utilizados fueron más eficientes que el testigo sin recirculación (Cuadro 20). En el método con recirculación con base en análisis de los drenajes (T2) se aplicó menos nitrógeno y magnesio para producir un kg de jitomate, mientras que en el método con recirculación con base a la absorción teórica de nutrientes por las plantas (T3) se aplicó menos calcio y azufre. En cuanto al potasio y fósforo, en los tres tratamientos con recirculación se requirieron en cantidades similares; alrededor de 10.5 g de potasio y 2 g de fósforo por kg producido. En el tratamiento testigo se usó una mayor cantidad de todos los nutrientes.

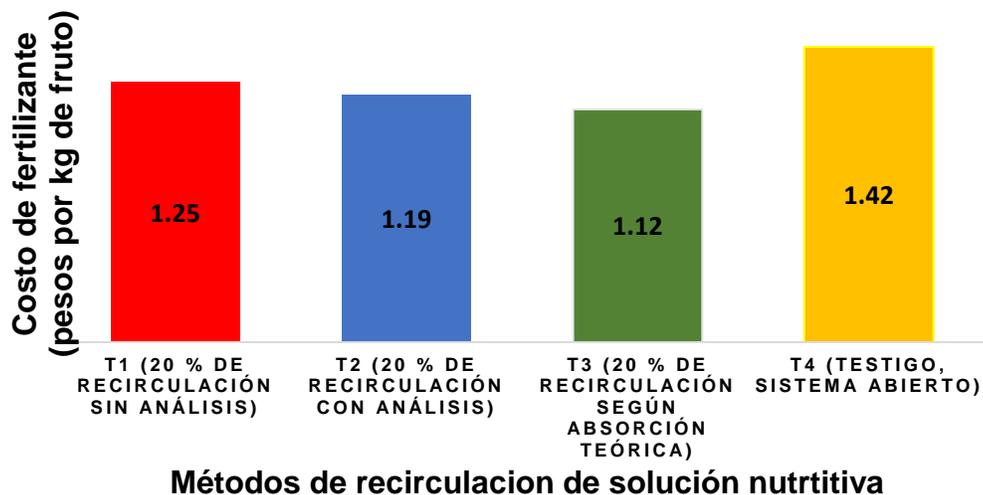
Considerando todos los tratamientos, en promedio para producir un kg de jitomate en peso fresco se aplicaron 8.4 g de nitrógeno, 2.1 g de fósforo, 10.8 g de potasio, 9.9 g de calcio, 1.6 g de magnesio y 5.5 g de azufre.

**Cuadro 20. Eficiencia del sistema en el uso de macronutrientes (g aplicados en la producción de un kg de fruto) en jitomate durante 110 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.**

| <b>Tratamiento</b>                                 | <b>N</b> | <b>P</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> | <b>S</b> |
|--|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| T1 (20 % de recirculación sin análisis)            | 8.2      | 2.0      | 10.4     | 10.8      | 1.8       | 6.1      |
| T2 (20 % de recirculación con análisis)            | 7.7      | 2.0      | 10.5     | 9.1       | 1.2       | 5.2      |
| T3 (20 % de recirculación según absorción teórica) | 8.6      | 2.1      | 10.9     | 7.5       | 1.4       | 4.1      |
| T4 (Testigo, sistema abierto)                      | 9.2      | 2.3      | 11.7     | 12.3      | 2.1       | 6.9      |

#### 4.7. Análisis económico

De acuerdo con los resultados obtenidos de esta investigación, el tratamiento con 20 % de recirculación según la absorción teórica (T3), fue en el que se invirtió menos capital en fertilizantes por kg de jitomate producido, 21 % menos respecto al testigo (T4), seguido de los tratamientos T2 (20 % de recirculación con análisis de los drenajes) y T1 (20 % de recirculación sin análisis de los drenajes).



**Figura 11. Costo de fertilizante (pesos por kg de fruto) en diferentes métodos de recirculación de solución nutritiva para producir un kg de fruto de jitomate manejado a 110 días de trasplante a fin de cosecha.**

Con un rendimiento promedio de 118 toneladas por ha por ciclo de cultivo obtenido en el presente experimento, durante 110 días de trasplante a fin de cosecha y extrapolándolo a tres ciclos de producción anual que resultaría en 354 toneladas/ha/año, la inversión por concepto de fertilizantes sería de \$442,500 para el tratamiento T1; \$421,260 para el tratamiento T2; \$396,480 en el tratamiento T3 y \$502,680 con el testigo (T4). Considerando los costos adicionales de la implementación de los sistemas con recirculación de la solución nutritiva, el ahorro en pesos/ha/año respecto al testigo serían del orden de \$18,130 para el tratamiento T1; \$27,370 para el tratamiento T2 y \$64,150 pesos anuales para el tratamiento T3.

Aunque el ahorro económico que se logró con la recirculación de la solución nutritiva no es tan alto, el mayor beneficio real que se tiene es que se reduce la contaminación por sales en el manto freático y es más aplicable para zonas en donde el agua resulta ser un recurso escaso, sin que se afecte el rendimiento final del cultivo.

## V. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que derivan de la presente investigación, en las condiciones en que se llevó a cabo el estudio, son las siguientes:

1. El manejo de ciclos tan cortos de producción de jitomate como 110 días de trasplante a fin de cosecha, hacen factible el utilizar sistemas simples de recirculación de la solución nutritiva sin menoscabo en el crecimiento y rendimiento de las plantas, ahorrando agua y fertilizantes, haciendo más sostenible la producción e incluso con cierto ahorro económico.
2. Con el manejo de las plantas de jitomate en alta densidad de población y despunte para cosechar solamente tres racimos, en un ciclo de 110 días, es posible utilizar cualquiera de los tres métodos de recirculación de solución nutritiva sin que se presenten desbalances nutricionales, de manera que, al comparar estos métodos con un sistema abierto, no se modificaron las variables de peso seco, índice de área foliar y tampoco se afectó el rendimiento.
3. Con la recirculación de la solución nutritiva, se obtuvieron ahorros del 20 % de agua, hasta 16.5 % de nitrógeno, fósforo y potasio, así como 38.9, 35.1 y 41.3 % de calcio, magnesio y azufre, respectivamente, comparado con el sistema sin recirculación.
4. La mayor eficiencia en el uso de agua para producir un kg de fruto de jitomate, se logró cuando la recirculación se hizo considerando el contenido de nutrientes en la solución drenada, requiriéndose 34.6 litros de agua para producir un kg de fruto, 12 litros menos que con el sistema cerrado.
5. La eficiencia en el uso de nutrientes para producir un kg de fruto de jitomate varió con el método de recirculación utilizado; para nitrógeno y magnesio la mayor eficiencia se obtuvo cuando la recirculación se realizó haciendo análisis de los drenajes, 16 y 43 % más eficiencia respecto al testigo; para calcio y azufre dicha eficiencia fue mayor cuando la recirculación se realizó tomando en cuenta las diferentes tasas teóricas de

absorción de nutrientes (90 % de nitrógeno, fósforo y potasio y 50 % calcio, magnesio y azufre), 39 % más eficiencia en calcio y 41 % más en azufre.

6. Aunque los sistemas de recirculación utilizados no mostraron beneficios económicos importantes, su uso puede justificarse desde un punto de vista ambiental y para zonas donde el agua es un factor limitante para la producción.

## VI. LITERATURA CITADA

- Abad, B. M. 2001. Sustratos para el cultivo sin suelo. En Nuez, F. (Ed.), El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. España. pp: 131-166.
- Abad, B. M., Noguera, M. P. y Carrión, B. C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), Tratado de cultivo sin suelo. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 113-158.
- Abad, B. M., Noguera, M. P. y Carrión, B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En Cadahía, L. C. (Ed.), Fertirrigación cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 299-354.
- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su comparación, elección y factores medioambientales a considerar. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), Tratado de cultivo sin suelo. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 239-262.
- Alarcón, V. A. 2006. Proyectos en cultivo sin suelo ¿Cómo empezar?. En Alarcón, V. A. (Ed.), Cultivos sin suelo. Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura, S. L. Reus. España. pp: 11-21.
- Alcántar, G. G. y Sandoval, V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 156 p.
- Alcántar, G. G., Trejo-Téllez, L. I., Fernández, P. L. y Rodríguez, M. M. de las N. 2016. Elementos esenciales. En Alcántar, G. G., Trejo-Téllez, L. I. y Gómez, M. F. C. (Eds.), Nutrición de cultivos. Editorial BBA. Texcoco, México. pp: 21-55.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Bilbao, España. 172 p.
- Aragón, R. L. A. 2019. Efecto agronómico e impacto económico de fuentes fertilizantes, concentraciones nutrimentales y acolchado plástico sobre un cultivo hidropónico de jitomate. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 120 p.
- Baca, C. G. A. de J., Rodríguez, C. E. y Quevedo, N. A. 2016. La solución nutritiva en hidroponía. Editado por los Autores. Texcoco, Edo. de México. 208 p.
- Baixauli, S. C. y Aguilar, O. J. M. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valenciana. Valencia, España. pp: 15-26.

- Barker, A. V. and Bryson, G. M. 2006. Nitrogen. In Barker, A. V. and Pilbeam, D. J. (Eds.), Handbook of plant nutrition. CRC Taylor & Francis Group. Boca Raton. pp 21-50.
- Bergstrand, K. J. 2010. Approaches for mitigating the environmental impact of greenhouse horticulture. Doctoral Thesis. Acta Universitatis Agriculturae. Swedish University of Agricultural Sciences, Sueciae. 55 p.
- Bidwell, R. G. S. 2002. Fisiología vegetal. AGT Editor. Distrito Federal, México. pp: 265-292.
- Blancard, D. 2011. Enfermedades del tomate identificar, conocer, controlar. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 679 p.
- Brown, L. 2008. Applied principles of horticultural science. 3<sup>a</sup> edition. Butterworth Heinemann. pp: 224-253.
- Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hyman Ltd., London. 309 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotecnicas. Madrid, España. 342 p.
- Bustomi, R. R. A., Masateru, S., Diding, S. and Ahmad, T. 2014. The effect of EC levels of nutrient solution on the growth, yield, and quality of tomatoes (*Solanum lycopersicum*) under the hydroponic system. *Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology*, 2: 7-12.
- Canovas, M. F. 2003. Cultivos sin suelo. En Camacho, F. F. (Ed.), Técnicas de producción en cultivos protegidos. Instituto Cajamar. Almería, España. pp: 409-453.
- Carbone, A. 2015. Nutrición mineral. En Beltrano, J. y Gimenez, D. O. (Eds.), Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad de la Plata. Buenos Aires, Argentina. pp: 62-72.
- Carravedo, F. M. 2006. Variedades autóctonas de tomates de Aragón. Centro de Investigación de Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Zaragoza, Gobierno de Aragón. pp: 17-18.
- Castellanos, J. Z. y Borbón, C. M. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México. En Castellanos, J. Z. (Ed.), Manual de producción de tomate en Invernadero. Intagri. Guanajuato, México. pp: 1-18.
- Castellanos, J. Z. y Ojodeagua, J. L. 2009. Formulación de la solución nutritiva. En Castellanos, J. Z. (Ed.), Manual de producción de tomate en invernadero. Intagri. Guanajuato, México. pp: 131-156.
- Cepeda, S. M. 2009. El tomate rojo cultivo y control parasitológico. Editorial Trillas. Distrito Federal, México. 222 p.

- Chamarro, L. J. 2001. Anatomía y fisiología de la planta. En Nuez, F. (Ed.), El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Bilbao, España. pp: 43-91.
- Chapman H. D. y P. E. Pratt. 1973. Métodos de análisis de suelos, plantas y agua. Traducido al español por Contin, A. Editorial Trillas. México, D.F. 195 p.
- Chesnin, L. and Yien, C. H. 1951. Turbidimetric determination of available sulphur. Proceedings of Soil Science Society of America. pp: 149-151.
- Claros, B. J. A. 2012. Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València, Valencia. p 254.
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, Á., Bugarín-Montoya, R., Pineda-Pineda, J., Flores-Canales, R., Juárez-López, P. y Alejo-Santiago, G. 2014. Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37: 289-295.
- Durán, R. F. 2010. Manual de cultivos hidropónicos. Grupo Latino Editores. Colombia. 424 p.
- Fageria, N. K. 2009. The use of nutrients in crop plants. CRC Taylor & Francis Group. Boca Raton. pp: 91-130.
- Fernández, R. E. y Camacho, F. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros*. Universidad de Almería en España, pp: 86-89.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2017. Panorama agroalimentario, tomate rojo. México.
- Flores, V. J. y Ojeda, B. W. 2016. Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México. Instituto Mexicano Tecnológico del Agua. México. 179 p.
- Flórez, L. E., González, G., Pulido, S. P., Wyckhuys, K., Escobar, H., Salamanca, C., Zamudio, A., Jiménez, J., Gil, R., Fuentes, L. S., Niño, N., Fuentes, L. y Bojacá, C. 2012. Tomate (*Solanum lycopersicum* L.). En Pinzón R. H. (Ed.), Manual para el cultivo de hortalizas. Editorial Produmedios. Bogotá, Colombia. pp: 498-528.
- Folquer, F. 1979. El tomate estudio de la planta y su producción comercial. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp: 8-14.
- García E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta Edición. Offset Larrios. México. 217 p.
- Gil, M. F. 1995. Elementos de fisiología vegetal. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1147 p.

- Guardiola, B. J. y García, L. G. 1990. Fisiología vegetal I: Nutrición y transporte. Editorial Síntesis. España. 440 p.
- Gul, A., Tuzel, Y., Tuzel, I. H., Irget, M. E., Kidoglu, F. and Tepecik, M. 2011. Effects of nutrition and irrigation on sweet pepper production in volcanic tuff. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9: 221-229.
- Hao, X. and Papadopoulos, A. P. 2002. Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open or closed rockwool systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 82: 771-780.
- Heuvelink, E. and Dorais, M. 2005. Crop growth and yield. In Heuvelink, E. (Ed.), *Tomatoes*. CABI Publishing. Wageningen University, The Netherlands. pp: 85-144.
- Huang, W. Y. 2009. Factors contributing to the recent increase in U.S. fertilizer prices, 2002-08. Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC. 21 p.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Riviere, L. M. and Charpentier, S. 1989. Cultures en pots et conteneurs. INRA- PHM Revue Horticole, Paris-Limoges. 184 p.
- León, G. H. M. 2001. Manual para el cultivo de tomate en invernadero. Gobierno de Chihuahua. Chihuahua, México. 239 p.
- Marfá, O. 2000. Recirculación en cultivos sin suelo. Ediciones de Horticultura, S. L. Reus. España. 177 p.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C. A. y Pardossi A. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 97: 971-980.
- Mengel, A. and Kirkby, K. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers. 5ª edition. Netherlands. 849 p.
- Mia, B. M. A. 2015. Nutrition of crop plants. Nova Publishers. Nueva York, E.U.A. 187 p.
- Moreno, R. A., Aguilar, D. J. y Luévano, G. A. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29: 763-774.
- Muñoz, R. J. J. 2011. Manejo del cultivo de tomate en Invernadero. En Castellanos, J. Z. (Ed.), Manual de producción de tomate en invernadero. Intagri. Guanajuato, México. pp: 45-92.
- Muñoz-Ramos, J. J. 2003. Formulación de la solución nutritiva. En Castellanos, J. Z. (Ed.), Manual de producción hortícola en invernadero. Intagri. México. pp: 151-180.

- Nakano, Y., Sasaki, H., Nakano, A., Suzuki, K. and Takaichi, M. 2010. Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79: 47-55.
- Nuñez-Ramírez, F., Grijalva-Contreras, R. L., Macías-Duarte, R., Robles-Contreras, F. y Ceceña-Duran, C. 2012. Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en tomate de invernadero. *Biotechnia*, 14: 25-31.
- Ortega, M. L. D., Martínez, V. C., Ocampo, M. J., Sandoval, C. E. y Pérez, A. B. 2016. Eficiencia de sustratos en el sistema hidropónico y de suelo para la producción de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7: 643-653.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Díaz-Ruiz, R. y Ocampo-Mendoza, J. 2010. Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* MILL). *Ra Ximhai*, 6: 365-372.
- Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Carmassi, G., Maggini, R., Massa, D. and Tognoni, F. 2006. Simplified models for the water relations of soilless cultures: what they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. *Acta Horticulturae*, 718: 425-434.
- Penningsfeld, F. y Kurzmann, P. 1983. Cultivos hidropónicos y en turba. 2ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 343 p.
- Pérez, G. M. y Castro, B. R. 2011. Jitomate en invernadero. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco Edo. México. 132 p.
- Pineda J., A. Ramírez-Arias, F. Sánchez del Castillo, A. M. Castillo-González, L. A. Valdez-Aguilar and J. M. Vargas-Canales. 2011. Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 893: 997-1005.
- Ponce, O. J., Sánchez, del C. F., Contreras, M. E. y Corona, S. T. 2000. Efecto de modificaciones al ambiente en la floración y fructificación de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Fitotecnia Mexicana*, 23: 87-97.
- Quesada-Roldán, G. y Bertsch-Hernández, F. 2013. Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, 31: 1-7.
- Raviv, M. and Lieth, H. J. 2008. Soilless culture theory and practice. Editorial Elsevier. 587 p.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. 5ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 558 p.

- Rodríguez, R. R., Tabares, R. J. M. y Medina, S. J. J. A. 1997. Cultivo moderno del tomate. 2ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 15-23.
- Salas, S. M. del C. y Urrestarazu, G. M. 2004. Métodos de riego y fertirrigación en cultivo sin suelo. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), Tratado de cultivo sin suelo. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 161-237.
- Salazar, M. R., Rojano, A. A. y López, C. I. L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2: 177-183.
- Salazar, S. I. 2010. Elección de variedades de jitomate para invernadero. En Bautista, M. N., Chavarín, P. C. y Valenzuela, E. F. (Eds.), Jitomate tecnología para su producción en invernadero. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo, Texcoco, Edo. México. pp: 95-112.
- Salisbury, F. B. y Ross, C. W. 2000. Fisiología de las plantas 1 células: agua, soluciones y superficies. Paraninfo. Madrid, España. 305 p.
- Samarakoon, U. C., Weerasinghe, P. A. and Weerakkody, A. P. (2006). Effect of electrical conductivity [EC] of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture. *Tropical Agricultural Research*, 18: 13-21.
- Sánchez, del C. F. y Escalante, R. E. 1988. Hidroponia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sánchez, del C. F. y Moreno, P. E. del C. 2017. Diseño agronómico y manejo de invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. México. 405 p.
- Sánchez, del C. F., Bastida, C. O. A., Moreno, P. E. del C., Contreras, M. E. y Sahagún, C. J. 2014a. Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20: 239-251.
- Sánchez, del C. F., Moreno, P. E. del C., Pastor, Z. O. A. y Contreras, M. E. 2017. Disposición de plantas de tomate en doseles en forma de escalera bajo dos densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40: 333-340.
- Sánchez, del C. F., Moreno, P. E. del C., Pineda, P. J., Osuna, J. M., Rodríguez, P. J. E. y Osuna E. T. 2014b. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48: 185-197.
- Sánchez, P. A. 2004. Análisis y diagnóstico nutricional en los cultivos sin suelo. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), Tratado de cultivo sin suelo. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. pp: 49-79.

- Sandoval, V. M., Sánchez, G. P. y Alcántar, G. G. 2012. Principios de la hidroponía y del fertirriego. En Alcántar, G. G y Trejo-Téllez, L. I. (Eds.), Nutrición de cultivos. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo, Texcoco, Edo. México. pp: 373-438.
- Schubert, M. 1981. Manual práctico de hidrocultivo. Ediciones Omega. Barcelona, España. p: 77-78.
- Schwarz, M. 1995. Soilless culture management. Springer-Verlag. pp: 9-11.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2018. Atlas Agroalimentario. Ciudad de México, México: SAGARPA.
- Tunali, U., Tüzel, I. H., Tüzel, Y. and Öztekin, G. B. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae*, 807: 457-461.
- Urrestarazu, G. M. y Salas, S. M. del C. 2004. Sistemas con sustrato y recirculación de la disolución nutritiva. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), Tratado de cultivo sin suelo. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 369-421.
- Van Os, E. 2009. Comparison of some chemical and non-chemical treatments to disinfect a recirculating nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 843: 229-234.
- Vargas-Canales J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A. y Avitia-García, E. 2014. Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20: 71-88.
- Velasco, H. E., Nieto, Á. R. y Navarro, L. E. R. 2012. Cultivo del tomate en hidroponía e invernadero. Tercera edición, Primera reimpresión. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 126 p.
- Wiedenhoeft, A. C. 2006. Plant nutrition. Chelsea House Publishers. New York, E.U.A. pp: 23-25.
- Zekki, H., Gauthier, L. and Gosselin, A. 1996. Growth, productivity and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 121: 1082-1088.
- Zhang, P., Senge, M. and Dai, Y. 2016. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science*, 4: 46-55.