



# Universidad de Guadalajara

---

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

**“Caracterización física, absorción de potasio y  
producción de tomate (*Lycopersicon esculentum*) por  
efecto del reúso del tezontle y perlita”**

**Tesis**

**Que para obtener el grado de:**

**Doctor en Ciencias en Biosistemática, Ecología y  
Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas**

**Presenta**

**Eduardo Rodríguez Díaz**

Zapopan, Jalisco

30 de Enero de 2014



# Universidad de Guadalajara

---

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

## **“Caracterización física, absorción de potasio y producción de tomate (*Lycopersicon esculentum*) por efecto del reúso del tezontle y perlita”**

**Tesis**

**Que para obtener el grado de:**

**Doctor en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas**

**Presenta**

**Eduardo Rodríguez Díaz**

**DIRECTOR**

**Dr. Eduardo Salcedo Pérez**



# Universidad de Guadalajara

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

**“Caracterización física, absorción de potasio y producción de tomate (*Lycopersicon esculentum*) por efecto del reúso del tezontle y perlita”**

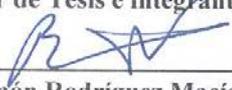
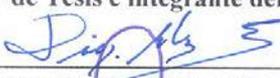
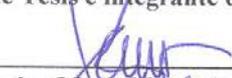
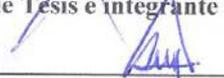
Por

**Eduardo Rodríguez Díaz**

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Aprobada por:

 _____ Dr. Eduardo Salcedo Pérez Director de Tesis e integrante del Jurado	<u>10 ENERO 2014</u> Fecha
 _____ Dr. Ramón Rodríguez Macías Asesor de Tesis e integrante del Jurado	<u>13- Enero - 2014</u> Fecha
 _____ Dr. Diego Raymundo González Eguiarte Asesor de Tesis e integrante del Jurado	<u>13/Enero/2014</u> Fecha
 _____ Dr. Salvador Mena Munguía Asesor de Tesis e integrante del Jurado	<u>14   ENERO   2014</u> Fecha
 _____ Dr. Marcos Rafael Crespo González Integrante del Jurado	<u>14/Enero/2014</u> Fecha
 _____ Dr. Diego Raymundo González Eguiarte Coordinador de la Orientación en Ciencias Agrícolas	<u>13/Enero/2014</u> Fecha

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guadalajara y al Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias por las facilidades otorgadas para realizar los estudios de doctorado.

Al Departamento de Madera Celulosa y Papel del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería por las facilidades otorgadas para usar equipo y laboratorios en la realización de pruebas y análisis físicos y químicos de los materiales de la investigación.

Al Dr. Eduardo Salcedo Pérez, un invaluable guía académico con un valor científico en la dirección y culminación del trabajo de investigación dando un producto que fortalece mi actuar profesional. Finalmente un gran amigo.

Al Dr. Ramón Rodríguez Macías, por su amistad y valiosa asesoría durante el proceso de mi formación doctoral

Al Dr. Diego R. González Eguiarte, por ser un soporte en la culminación de este nuevo proyecto de vida profesional.

Al Dr. Salvador Mena Munguía, por su amistad y apoyo en la asesoría brindada para la realización de los estudios doctorales.

Al Dr. Hugo Moreno García, por su amistad y calidad humana en su apoyo para la realización e interpretación de los análisis estadísticos producto de la investigación.

Al Dr. Enrique Pimienta Barrios, por su amistad y disponibilidad para otorgarme todas las facilidades en el transcurso de los estudios doctorales.

Dr. Salvador Antonio Hurtado de la Peña, por su calidad humana y consejos para concluir mi preparación académica doctoral.

A la Dra. Patricia Zarazúa Villaseñor, por su amistad y calidad humana en las orientaciones recibidas.

Al M.C. Javier Vázquez Navarro y al M.C. José Pablo Torres Moran, por su asesoría en el manejo estadístico de la información producto de la investigación.

Al Dr. José Luis Martínez Ramírez, por su amistad, asesoría y apoyo en la orientación en el área de fitopatología

Al M. C. Jaime Santillán Santana, por su apoyo en las traducciones realizadas.

Al Dr. Rubén Bugarín Montoya, al Dr. Diego García Paredes, al Dr. Gelacio Alejo Santiago, a la Dra. Elia Cruz Crespo y a la Dra. Cecilia Rocío Juárez Rosete de la Universidad Autónoma de Nayarit por las facilidades otorgadas en la realización de mi estancia académica.

A la Biol. Nancy Díaz Echavarría, al Ing. Químico Isaías Pedroza Rangel y al Ing. Iván Lizaola, por su amistad y apoyo en la preparación de muestras y análisis químicos realizados durante la investigación

Al Ing. Carlos Hernández Aguirre y al Ing. David Vaca Vaca, por su amistad, apoyo y dedicación en el manejo del cultivo y toma de datos durante el desarrollo de la fase experimental de la investigación.

A mis compañeros y amigos del posgrado BEMARENA por su amistad.

## **DEDICATORIAS**

A Dios, que siempre estuvo a mi lado en mis horas felices y de angustia; y que finalmente me ayudo a sobrellevar los momentos difíciles.

Con amor y respeto a mi padre Alfonso Rodríguez Álvarez (que Dios lo tenga a su lado). Un hombre de gran fortaleza que siempre se esforzó por orientarme y apoyarme a ser un hombre de bien. Gracias Padre.

A mi madre, Celsa Díaz Valdivia. Gracias.

A mis hijos, Edgar Eduardo y Alejandra. Gracias por su gran amor y cariño, que siempre han estado a mi lado en los momentos difíciles. Los Quiero.

A Miriam del Rocío Salazar Altamirano, que en sus momentos me dio apoyo. Gracias.

A mis hermanos Alfonso, José Luis, Leobardo y Carmen. Un ejemplo en mi vida.

A mis nietos, Vanessa, Andrea Lizbeth, Emiliano e Isabella. Por ser una nueva luz en mi vida.

A todos aquellos que me brindaron su amistad y apoyo y que influyeron en mi desarrollo profesional y personal.

## INDICE

Agradecimientos.....	i
Dedicatorias.....	iii
Indice.....	iv
Indice de cuadros..	vi
Indice de figuras.....	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	xi
1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS E HPÓTESIS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
2.3 Hipótesis.....	3
3. REVISION DE LITERATURA.....	4
3.1 Panorama general de la agricultura protegida en México y en el mundo.	4
3.2 Los Sustratos.....	6
3.2.1 Clasificación de los sustratos.....	7
3.2.2 Descripción de los principales materiales utilizados como sustratos.....	9
3.2.3 Características de los sustratos.....	13
3.2.4 Función del sustrato en el sistema de producción hidropónico....	21
3.2.5 Los nutrimentos y el sustrato.....	23
3.3 Uso de las soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos.....	26
3.3.1 La solución nutritiva Steiner.....	26
3.4 El potasio y su relación con la agricultura protegida.....	27
4. MATERIALES Y METODOS.....	31
4.1 Localización del sitio experimental.....	31
4.2 Clima.....	32
4.3 Materiales físicos.....	33
4.4 Material vegetal.....	34
4.5 Diseño experimental.....	34
4.6 Preparación de los sustratos.....	34
4.7 Colecta de muestras.....	35
4.8 Conducción del experimento y manejo del cultivo.....	36
4.8.1 Tratamientos.....	36
4.8.2 Obtención de la plántula y trasplante.....	36
4.8.3 Riegos.....	37
4.8.4 Solución nutritiva.....	38
4.8.5 Podas y tutorio.....	40
4.8.6 Plagas y enfermedades.....	40
4.8.7 Variables evaluadas en la planta.....	41
4.8.8 Variables evaluadas en sustrato.....	42
4.8.9 Toma de muestra de hoja.....	44
4.8.10 El análisis foliar.....	44
4.8.11 Análisis estadístico.....	45
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	46
5.1 Caracterización física de los materiales evaluados.....	46
5.1.1 Sustrato tezontle.....	46
5.1.1.1 Distribución del tamaño de partículas.....	46
5.1.1.2 Efecto del reúso del tezontle en la producción de tomate.....	49
5.1.2 Sustrato perlita.....	53
5.1.2.1 Distribución del tamaño de partículas.....	53

5.1.2.2 Efecto del reúso de la perlita en la producción de tomate.....	56
5.2 Contenido de potasio en hoja.....	58
6. CONCLUSIONES.....	61
7. LITERATURA CITADA.....	63
8. APENDICE.....	71

## INDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Características físicas y químicas de la fibra de coco.....</i>	<i>10</i>
<i>Cuadro 2. Características físicas y químicas de la lana de roca.....</i>	<i>12</i>
<i>Cuadro 3. Características de la Perlita (B-12).....</i>	<i>12</i>
<i>Cuadro 4. Características del tezontle (escoria volcánica).....</i>	<i>13</i>
<i>Cuadro 5. Niveles óptimos para las características físicas de sustratos de cultivos.....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 6. Características químicas de algunos materiales utilizados como sustrato.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 7. Variación del tamaño de partículas de perlita por tiempo de uso.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 8. Variación en las propiedades físicas de la perlita por tiempo de uso.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 9. Relación mutua entre aniones y cationes de diferentes soluciones nutritivas.....</i>	<i>26</i>
<i>Cuadro 10. Relación de cationes y aniones usados en la preparación de la solución nutritiva universal de Steiner.....</i>	<i>27</i>
<i>Cuadro 11. Principales propiedades físicas y químicas iniciales del tezontle.....</i>	<i>33</i>
<i>Cuadro 12. Descripción del uso y reúso del tezontle utilizado como tratamiento.....</i>	<i>36</i>
<i>Cuadro 13. Descripción del uso y reúso de la perlita utilizada como tratamiento.....</i>	<i>36</i>
<i>Cuadro 14. Frecuencia y volumen de riego aplicado por planta.....</i>	<i>38</i>
<i>Cuadro 15. Solución nutritiva Steiner, contenidos del agua de riego y aportes realizados.....</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 16. Fertilizantes utilizados en la nutrición y distribución por etapa durante el ciclo.....</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 17. Elementos menores incorporados a la solución nutritiva.....</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 18. Programa preventivo fitosanitario.....</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 19. Distribución del tamaño de partículas del sustrato en su primer tamizado.....</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 20. Distribución del tamaño de partículas del sustrato en su segundo tamizado.....</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 21. Características físicas del sustrato en su primer tamizado.....</i>	<i>49</i>
<i>Cuadro 22. Efecto del sustrato en el peso promedio de fruto.....</i>	<i>49</i>
<i>Cuadro 23. Efecto del sustrato en la altura de planta (cm) y diámetro de tallo (mm).....</i>	<i>51</i>
<i>Cuadro 24. Efecto del sustrato en grados Brix de fruto.....</i>	<i>52</i>
<i>Cuadro 25. Costos de tezontle y ahorro por reúso por hectárea.....</i>	<i>53</i>
<i>Cuadro 26. Distribución del tamaño de partículas de perlita en tamices de 6 mm e inferiores. Primer tamizado.....</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 27. Distribución del tamaño de partículas de perlita en tamices de 5 mm e inferiores. Segundo tamizado.....</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 28. Características físicas de la perlita.....</i>	<i>55</i>
<i>Cuadro 29. Efecto del sustrato en el peso promedio de fruto.....</i>	<i>56</i>
<i>Cuadro 30. Efecto del sustrato en la altura de planta (cm) y diámetro de tallo (mm).....</i>	<i>57</i>
<i>Cuadro 31. Efecto del sustrato en grados Brix de fruto.....</i>	<i>57</i>
<i>Cuadro 32. Costos de perlita y ahorro por reúso por hectárea.....</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 33. Contenido de Potasio en hoja (%) por tipo de sustrato y racimo.....</i>	<i>59</i>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Niveles de tensión medidos en sustratos.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2. Curvas de tensión de agua en sustratos.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de aireación de seis muestras de tezontle.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de retención de humedad de seis muestras de tezontle.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5. Ubicación del invernadero.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6. Temperatura promedio (°C) en interior del invernadero. 2009.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7. Humedad relativa promedio (%) en interior del invernadero. 2009.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Temperatura promedio (°C) en interior del invernadero. 2010.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Humedad relativa promedio (%) en interior del invernadero. 2010.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10. Agregados de partículas de perlita formados en el primer reúso (P1) derivadas de P0.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 11. Fragmentación de los agregados en el segundo reúso (P2).....</i>	<i>55</i>

## RESUMEN

México es el principal país productor y exportador de hortalizas en América, a nivel mundial ocupa el cuarto lugar, debido a su riqueza en climas y ecosistemas puede producir hortalizas durante todo el año, lo que le da una importante ventaja en relación a otros países. Actualmente los sistemas intensivos de producción de hortalizas demanda una gran cantidad de sustratos. Las características de los sustratos empleados en estos sistemas productivos variarán considerando la especie hortícola de interés, además de acuerdo al propósito de su uso (enraizamiento, producción de plántulas, producción de frutos o producción de flores); lo que obliga a utilizar y desechar una gran cantidad de los materiales inmediatamente después de su uso. Por lo tanto, la finalidad del presente trabajo fue evaluar y determinar las posibilidades de su reúso y las cualidades que conserve para la producción hidropónica, no solo favorece su aprovechamiento de manera sustentable, sino que también implica un impacto económico positivo, debido a la reducción en sus costos de producción. El tezontle y la perlita son minerales naturales que regularmente son utilizados en hidroponía, sin ningún tipo de tratamiento ni adición complementaria; por lo que tienen un potencial de ser completamente reciclables.

En esta investigación, se estudiaron los cambios en las propiedades físicas del Tezontle y la Perlita utilizados como sustrato para el cultivo de tomate por efecto de su reúso (primer uso T0 y P0, primer reúso T1 y P1, y segundo reúso T2 y P2), así como la influencia de dichos cambios en el desarrollo del cultivo y la producción. La investigación se desarrolló en un invernadero de 500 m<sup>2</sup> en el poblado de Buena Vista municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. Las evaluaciones se realizaron en dos ensayos (Tezontle y Perlita) de Agosto de 2009 a Septiembre de 2010 estableciéndose tres ciclos de cultivo consecutivos (Agosto 2009, Enero 2010 y Junio 2010). El diseño experimental fue completamente al azar y se evaluaron las propiedades físicas de los sustratos (granulometría, densidad aparente, retención de humedad y aireación) al inicio y al final de cada ciclo de cultivo; asimismo la redistribución del tamaño de partículas, algunas variables de respuesta del cultivo (peso de fruto, grados Brix, altura de planta y diámetro de tallo), así como la absorción de Potasio por influencia del uso y reúso de los sustratos.

En tezontle se observó un aumento en la capacidad de retención de humedad de 43% en T0 a 46% en T1 y 48% en T2, una disminución de la capacidad de aireación de 12% en T0 a 9% en T1 y 8% en T2, debido a cambios en la distribución del tamaño de partícula

por el reúso; dichos cambios no afectaron agrónomicamente las variables de peso de fruto y grados Brix; las diferencias estadísticas, solo fueron significativas en altura de planta y diámetro de tallo. En la perlita la densidad aparente, la capacidad de retención de humedad y la porosidad total se incrementa (esta última considerablemente, pasando de 37% en P0 a 50% en P2) disminuyendo la capacidad de aireación (pasando de 34% en P0 a 20% en P2); estos cambios para el segundo reúso fueron influyentes en los grados Brix y en el peso de fruto.

Al comparar los sustratos y los cambios físicos originados por el uso y reúso, el tezontle presenta una influencia mayor que la perlita en la concentración de potasio en hoja, pero al comparar los reusos, el segundo reúso de tezontle (T2) es más influyente en la proporción de potasio en hoja que el segundo reúso de perlita (P2), sin embargo en ambos sustratos los segundos reusos (T2 y P2) son determinantes en el contenido de potasio.

Los resultados demostraron que el tezontle como sustrato puede utilizarse durante tres ciclos consecutivos de cultivo de tomate hidropónico sin demeritar su productividad, permitiendo un ahorro aproximado de ciento sesenta mil pesos por hectárea por cada reúso. La perlita se recomienda podrá utilizarse por dos ciclos de cultivo, un uso y un reúso para la producción de tomate bajo el sistema hidropónico, lo que representará un ahorro por hectárea de ciento cincuenta mil pesos aproximadamente en un reúso.

## ABSTRACT

Mexico is the main producer and exporter country of vegetables in America, worldwide it ranks the fourth position, due to its richness in climates and ecosystems it can grow vegetables throughout the year, giving it a significant advantage in relation to other countries. Currently the intensive production systems demand a large number of substrates. The characteristics of the substrates used in these production systems vary whereas the horticultural species of interest, as well as the purpose of its use (rooting, seedling production, production of fruit or flower production); which forces to use and dispose of a large amount of materials immediately after their use. Therefore the purpose of this study was to evaluate and determine its reuse possibilities and the qualities that they keep to hydroponic production, not only favors its use in a sustainable manner, but that it also implies a positive economic impact, due to the reduction in production costs. tezontle and perlite are natural minerals which are regularly used in hydroponics, without any treatment or complementary addition; so they have a potential to be fully recyclable.

In this investigation, changes in the physical properties of tezontle and perlite used as substrates for tomato cultivation due to its reuse (first use T0 and P0, first reuse T1 and P1, and second reuse T2 and P2) were studied, as well as the influence of these changes in the development of the crop and the production. The research was developed in a greenhouse of 500 m<sup>2</sup> in the town of Buena Vista municipality of Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. The evaluations were performed in two trials (Tezontle and perlite) from August 2009 to September 2010 establishing three consecutive crop seasons (August 2009, January 2010 and June 2010). The experimental design was completely randomized and evaluated the physical properties of the substrates (particle size, bulk density, moisture and aeration retention) at the beginning and at the end of each growing season; also the redistribution of the particles size, some variables of crop response (weight of fruit, Brix degrees, plant height and stem diameter), as well as the absorption of potassium by influence of the use and reuse of the substrates.

In Tezontle an increase was observed in the capacity of moisture retention of 43 % in T0 to 46 % in T1 and 48 % in T2, a decreased ability of aeration from 12 % in T0 to 9 % in T1 and 8 % in T2, due to changes in the distribution of particle size by reuse; These changes did not affect agronomically the variables of fruit weight and Brix degrees; statistical differences were only significant in plant height and stem diameter.

In perlite the bulk density, retention of moisture capacity, and total porosity were increased (the latter considerably, from 37 % in P0 to 50 % in P2) decreasing the ability of aeration (from 34 % in P0 to 20 % in P2); these changes to the second reuse were influential in Brix degrees and the weight of fruit.

Comparing substrates and physical changes caused by the use and reuse, tezontle presents a greater influence than perlite in the potassium concentration in leaf, but comparing the reuses, the second reuse of tezontle (T2) is more influential in the proportion of potassium in leaf than that of the second reuse of Perlite (P2), however on both substrates, the second reuses (T2 and P2) are determinant in potassium content.

The results showed that tezontle as substrate can be used for three consecutive cycles of hydroponic tomato crop without diminishing their productivity, allowing an estimated savings of one hundred sixty thousand pesos per hectare for each reuse. Perlite is recommended to be used by two cycles of cultivation, one use and a reuse to tomato production under the hydroponic system, what will represent a saving of one hundred fifty thousand pesos per hectare approximately in a reuse.

# 1. INTRODUCCIÓN

México es el principal productor y exportador de hortalizas en América, y a nivel mundial, se ubica en cuarto lugar debido a su riqueza en climas y ecosistemas, ya que puede producir hortalizas durante todo el año, lo que le da una importante ventaja en relación a otros países productores. El resto de los exportadores en el mundo se ubican en los Países Bajos, España, China, Francia, Bélgica y Canadá; el 70% de la producción de hortalizas en el mundo recae en 10 países productores.

El tomate (*Lycopersicon esculentum*) es el cultivo más extendido en México. Su trascendencia en el contexto económico reside en su importante aportación de divisas y en la generación de empleos en todas y cada una de las fases de la cadena agroalimentaria. A lo largo del documento se utiliza el término “tomate” para referirse al fruto de la especie *Lycopersicon esculentum*, pues es el término más comúnmente utilizado entre los productores e industrializadores de este cultivo. No se utiliza el término “jitomate”, pues parece menos adecuado aun cuando sea utilizado entre los consumidores del centro del país para diferenciarlo del tomate verde de cáscara, conocido en el norte del país como “tomatillo”, el cual pertenece al género *Physalis spp.*

Las técnicas utilizadas en la producción de plantas y hortalizas han evolucionado rápidamente en los últimos años en América y más aún en México. Esta evolución está originada en gran medida por la necesidad de controlar los factores de producción, lo que permite tener la posibilidad de diversificar las plantas, su productividad y la calidad de las mismas. Dentro de estos factores que intervienen en el éxito de estos sistemas está el sustrato o medio de crecimiento pues es en el que se desarrollan las raíces e influyen en el crecimiento y en que las plantas expresen su potencial productivo.

Las características del sustrato a utilizar variarán en función de la especie vegetal a establecer, si se usará para enraizamiento, producción de plántulas para trasplante, producción de frutos o producción de flores. Así como si se dispone de sistemas de control del riego y aplicación de solución nutritiva; y otros aspectos en el control de factores climáticos. Los requerimientos particulares de la especie vegetal y el sistema de producción los podrá proporcionar un solo material o la combinación de dos o más sustratos. El tezontle presenta cualidades que puede proporcionar mejores características físicas para estos sistemas de producción hidropónica.

El Tezontle es una roca ígnea extrusiva porosa de origen volcánico, constituida principalmente por bióxido de hierro; tiene diferentes usos, tanto en la construcción, jardinería como en la agricultura protegida. La perlita agrícola es 100% inorgánica y su procesamiento a altas temperaturas la convierte en un elemento químicamente inerte; es de origen volcánico es un mineral natural del grupo de las riolitas, cuya composición se basa en la de un silicato aluminico. El tezontle y la perlita cada día toman más importancia en la producción hidropónica de especies vegetales.

En la actualidad, la utilización de sustratos minerales en hidroponía, como es el caso del tezontle, requiere de una especial atención para el cultivo de plantas; ya que más que su aplicación en la agricultura, el principal uso de este material en México se encuentra en la industria de la construcción (SCyT, 2010). Evaluar y determinar las posibilidades de su reutilización y las cualidades que conserve para la producción hidropónica, no solo favorece su conservación, sino que también significa un mayor impacto en la reducción de los costos de producción.

Tanto el tezontle como la perlita expandida son minerales naturales sin ningún tipo de tratamientos ni aditivos, es decir, durante su transformación o adecuación no se generan residuos, ni se incorporan elementos indeseables. Una vez usados pueden ser completamente reciclables en vista de que su excepcional consistencia le confiere una notable durabilidad, lo cual representa una gran ventaja comparativa sobre otros materiales. Con ello, se contribuiría de manera importante a la reducción de desechos generados por la actividad agrícola para evitar el impacto al medio ambiente.

Referente a la absorción de los elementos minerales en un medio controlado, es conveniente señalar que el contacto que deben tener los elementos minerales con la raíz facilitará la absorción de los mismos. Esta se puede producir de tres formas:

a) Por **intercepción**, en donde las raíces al crecer se encuentran con los minerales disueltos, absorbiendo un bajo porcentaje en forma directa. b) Por **difusión** y c) **flujo de masa**, en donde un gran porcentaje de minerales se mueve en el medio de cultivo antes de ser tomado por las raíces. La difusión se presenta al formarse un gradiente de concentración entre el medio de cultivo y la raíz, el resultado de este gradiente es el movimiento de los minerales disueltos en el agua hacia las raíces por difusión, consecuencia de la transpiración de la planta.

Con respecto a la aireación del medio de cultivo, es de vital importancia para la nutrición de las plantas proporcionar oxígeno a las raíces para la respiración celular como fuente de energía metabólica para el transporte de nutrientes a través de las membranas. La concentración de oxígeno en la zona de la raíz modifica la proporción en la absorción de los minerales, en otras palabras, las concentraciones inferiores a 3% reducen considerablemente la capacidad de absorción de las raíces de varios cultivos. El tamaño de las partículas del medio de cultivo y su acomodo, el riego y el drenaje son factores que pueden alterar la aireación del mismo limitando la absorción nutrimental.

Particularmente, el potasio es un elemento que influye en la calidad de los frutos de varias especies vegetales; facilita el transporte de azúcares, mantiene la turgencia de las plantas evitando su deshidratación, participa en la tolerancia de las plantas a las enfermedades, entre otras características. Así mismo, el tamaño de los frutos, la coloración, serosidad, sabor y peso es determinante por los aportes de potasio (Melgar *et al.*, 2012).

En vista de lo anteriormente expuesto, el principal objetivo del presente trabajo fue estudiar su comportamiento en la absorción por el uso y reúso del tezontle y la perlita; así como la influencia que tiene la modificación de las características físicas de este sustrato a través de tres ciclos de cultivo de tomate, principalmente la granulometría, retención de humedad y aireación en la asimilación del potasio, ya que con ello se podrán establecer las posibilidades de dicho reúso sin afectar significativamente la producción hortícola de cultivos hidropónicos.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 Objetivo general**

Caracterizar físicamente el tezontle y la perlita por efecto de su uso y reúso como sustrato; así como su efecto sobre algunas variables agronómicas y de producción del tomate saladet.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Cuantificar los cambios de las propiedades físicas del tezontle y perlita por efecto del uso y reúso como sustrato en la producción del tomate saladet bajo condiciones hidropónicas.
- Evaluar la respuesta del cultivo en la absorción de potasio por efecto de los cambios en las propiedades físicas de los sustratos debido a su uso y reúso.
- Determinar el efecto del uso y reúso de los sustratos sobre el desarrollo de las plantas y las variables de producción en el cultivo hidropónico de tomate saladet.
- Establecer la implicación económica en el sistema de producción hidropónico de tomate saladet debido al reúso del tezontle y la perlita como sustrato.

### **2.3 Hipótesis**

El uso y reúso del tezontle y la perlita originan cambios en sus propiedades físicas que influyen en la absorción de potasio, en el desarrollo de las plantas y en la producción de tomate saladet cultivado en condiciones hidropónicas, los cuales no son significativos para el primer reúso.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 Panorama general de la agricultura protegida en México y en el mundo**

La agricultura protegida es un sistema de producción que se establece bajo diversas estructuras, minimizando las restricciones y efectos que generan los fenómenos climáticos. La agricultura, por su naturaleza, está asociada al riesgo, de ahí que este sistema tenga como característica básica la protección contra los riesgos inherentes a esta actividad. Los riesgos pueden ser: climatológicos, económicos (rentabilidad, mercado) o de limitaciones de recursos productivos (agua o de superficie). Adicionalmente, se establece que este sistema ha modificado las formas de producir alimentos y genera múltiples ventajas para los productores. Entre otras ventajas, permite el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo normal y en menor tiempo, enfrenta con éxito plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, sanos y con un mejor precio en los mercados. Todo lo anterior contribuye a generar, evidentemente, un mejor ingreso para los productores (FAO-SAGARPA, 2007).

A nivel internacional, teniendo en cuenta la superficie terrestre, los invernaderos están concentrados en dos áreas geográficas: el 80% en el Extremo Oriente (China, Japón y Corea), y en la cuenca mediterránea cerca del 15%. Cabe destacar China, que ha pasado de tener 4,200 hectáreas en 1981 a 1,250,000 hectáreas en 2002 (30% por año). Excluyendo China, la superficie mundial de invernaderos se puede calcular en 350,000 hectáreas. (COTEC, 2009).

México es el principal productor y exportador de hortalizas en América, a nivel mundial se ubica en cuarto lugar. El resto de los exportadores en el mundo se ubican en los Países Bajos, España, China, Francia, Bélgica y Canadá; el 70% de la producción de hortalizas en el mundo recae en 10 países productores. (COTEC, 2009).

Por otro lado, los grandes importadores de hortalizas son la Unión Europea y los Estados Unidos que acumulan el 50% del valor mundial de las importaciones de hortalizas; y en menor porcentaje Canadá, China y Japón. (COTEC, 2009).

La superficie cubierta de invernaderos en México en el 2010 llegaba ya a 11,759 ha (SAGARPA, 2012; AMPHAC, 2010 y García, 2011) con una clara tendencia a crecer en los próximos años. De acuerdo a la SAGARPA, el 50% de la superficie con agricultura protegida se concentra en 4 estados: 22% en Sinaloa, Baja California Norte

14%, Baja California Sur 12% y Jalisco 10%. Los principales cultivos que se producen en este sistema de producción son el tomate (70%), pimiento (16%) y pepino (10%). (SAGARPA, 2012). Como consecuencia existe una creciente demanda de sustratos de calidad y se debe a que son un componente clave en la producción de horticultura protegida.

### **3.2 Los sustratos**

El concepto “sustrato” se utiliza para denominar a todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que sea diferente al suelo *in situ*, que al ser depositado en un contenedor, solo o mezclado, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando un papel de soporte para las plantas (Abad *et al.*, 2005; Abad *et al.*, 2004; Terés, 2001). El sustrato, por sí solo, puede intervenir o no en el proceso de nutrición mineral de la planta, por lo que se pueden clasificar como químicamente activos (turberas, corteza de pino, fibra o polvo de coco, etc.) o químicamente inertes (perlita, lana de roca, roca volcánica, etc.) (Cadañá, 2005; Urrestarazu, 2004; Terés, 2001; Pastor, 1999).

Cabrera (2004) define el sustrato como medio de crecimiento y anclaje radicular que no están basados en un suelo mineral (de campo). Por su parte, Rodríguez (2004) menciona que el sustrato es aquel material sólido diferente del suelo, ya sea natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico. Si se coloca en un contenedor solo o mezclado tiene la función de anclaje del sistema radicular de la planta y que al ser un soporte para la misma, interviene en los procesos de nutrición y de intercambio.

De una manera simple pero objetiva, Gallardo (s/f) define el sustrato como aquel material, puro o en mezcla, es empleado para reemplazar el suelo en el cultivo de plantas en contenedores (macetas, bandejas multiceldas, sacos, etc.).

La producción de plantas en hidroponía requiere condiciones especiales y medios de cultivo apropiados para lograr un incremento en la producción. Uno de los principales elementos que pueden llevar al éxito o al fracaso en sistemas hidropónicos es el medio de crecimiento o sustrato. La determinación de las características físicas y químicas de los sustratos es primordial para su buen uso; en gran medida el sustrato condiciona el potencial productivo de las especies vegetales, pues en él se desarrollará la masa

radicular que tendrá influencia en la expresión de las plantas. (Cabrera, 1999; Pastor, 1999).

De acuerdo a Díaz (2004), el estudio de los sustratos integra una serie de conocimientos que permiten manejar las tres fases que son consideradas en procesos edáficos y que son de gran importancia también para materiales diferentes al suelo y a continuación se describen:

- La fase sólida que permite el anclaje del sistema radicular y la estabilidad de la planta.
- La fase líquida que conforma el conjunto de suministro de agua y nutrientes para las plantas.
- La fase gaseosa que facilita el intercambio de oxígeno y CO<sub>2</sub> entre las raíces y el ambiente externo.

### **3.2.1 Clasificación de los sustratos**

La clasificación de los materiales utilizados como sustratos se basa en el origen de los mismos, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación y otras características. Sin embargo, es común clasificarlos en orgánicos e inorgánicos (Abad, 1995; Burés, 1998; Abad y Noguera, 2000).

Todo material orgánico, mineral o artificial puede utilizarse como medio de cultivo, siempre y cuando cumpla con las funciones mencionadas anteriormente. El aspecto fundamental a manejar en los sustratos es facilitar la producción de biomasa de las partes aéreas en un volumen limitado de desarrollo del sistema radicular.

En la actualidad existe una gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados para la elaboración de sustratos y su elección dependerá de la especie vegetal a propagar, tipo de propágulo, época, sistema de propagación, costo, disponibilidad y características propias del sustrato (Hartmann y Kester, 2002). Sin embargo, desde el punto de vista medioambiental los criterios más importantes para la elección de un material como sustrato en cultivos sin suelo son: su durabilidad y capacidad para ser reciclado posteriormente (Abad y Noguera, 2000).

## De origen orgánico

- **Natural.** Estos materiales se caracterizan por su obtención en procesos de descomposición biológica, tal es el caso de las turbas, compostas, etc. (Bunt, 1988; Hitchon *et al.*, 1990).
- **Sintéticos.** Se caracterizan por ser polímeros orgánicos no-biodegradables provenientes, generalmente, de los plásticos y que se obtienen mediante síntesis química como la espuma de poliuretano, poliestireno, espumas de resina fenólica, polietileno, entre otros. (Bunt, 1988; Hitchon *et al.*, 1990).
- **Subproductos.** Estos materiales requieren un manejo para su maduración o estabilización para ser utilizados como sustrato; entre ellos encontramos: corteza de árboles, aserrín, viruta de madera, residuos sólidos urbanos, estiércoles, cascarilla de arroz, paja de cereales, fibra y polvo de coco, entre otros (Chong y Cline, 1993; Beeson, 1996; Tripepi *et al.*, 1996; Burés, 1997). Recientemente se ha reconocido un potencial para uso de sustratos los materiales derivados de procesos industriales, como los procedentes de la industria azucarera y tequilera Rodríguez *et al.* (2010).

## De origen inorgánico

- **Naturales.** Se obtienen de rocas o minerales de diverso origen (ígneas, metamórficas o sedimentarias). Entre ellos encontramos: arena, grava, roca volcánica (tezontle) y zeolita.
- **Transformados.** Son materiales que se obtienen de rocas o minerales, a los cuales se les da un proceso químico o físico, para obtener sustratos ligeros y porosos. Entre ellos se encuentra: Perlita, lana de roca, vermiculita y arcillas expandidas (Bunt, 1988; Hitchon *et al.*, 1990).
- **Residuos y subproductos industriales.** Se obtienen de las actividades de la industria que genera residuos en sus procesos de combustión: minería, escoria de hornos, escorias de carbón, entre otros (Burés, 1997).

### 3.2.2 Descripción de los principales materiales utilizados como sustratos

Algunos autores describen los materiales utilizados como sustrato en cultivos hidropónicos de la siguiente manera:

**Turba.** Se obtiene de la descomposición parcial de plantas acuáticas, de pantanos o ciénagas. La composición química depende de la naturaleza de los materiales que le dan origen y la etapa de descomposición (Lara, 1999). De la misma manera Baixauli y Aguilar (2002) mencionan que la turba es un sustrato orgánico de origen natural, compuesta de vegetales fosilizados. Así mismo, afirman que existen distintos tipos de turbas y que por su grado de descomposición se pueden encontrar las rubias, que están ligeramente descompuestas, de color más claro y de un mayor contenido en materia orgánica. Presenta excelentes propiedades físicas y químicas, con una estructura mullida, alta porosidad, alta capacidad de retención de agua, aceptable contenido de aire, baja densidad aparente, alta capacidad de intercambio catiónico y baja salinidad. Por otra parte existe también la turba negra, la cual es de color oscuro y está fuertemente descompuesta. Es de calidad inferior a la turba rubia.

**Compostas.** Dentro de los sustratos orgánicos, sobresalen la composta y la vermicomposta, debido a que sus procesos de elaboración son métodos biológicos que transforman restos orgánicos de distintos materiales en un producto relativamente estable (Claassen y Carey, 2004). Dentro de sus principales propiedades, además de mejorar las características físicas del medio de cultivo en cuanto a porosidad, retención de humedad y aireación, Márquez *et al.* (2008); Heeb *et al.* (2005); Rosen and Bierman (2005), mencionan que de los principales elementos nutritivos presentes en la composta, de 70–80% de fósforo y de 80–90% de potasio están disponibles el primer año, mientras que el nitrógeno (N), todo es orgánico, es decir, debe mineralizarse para ser absorbido por las plantas, no obstante, en el primer año, sólo se mineraliza el 11%, generándose una deficiencia de este elemento, si no es reabastecido apropiadamente.

**Fibra de coco.** Es un material vegetal procedente de los desechos de la industria del coco, tras la extracción de las fibras más largas del mesocarpio que son utilizadas para la fabricación de cuerdas, cepillos, etc., se aprovechan las fibras cortas y el polvo de tejido medular en proporciones variables como sustrato (Baixauli y Aguilar, 2002), cuyas características se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Características físicas y químicas de la fibra de coco.**

	Da gcm <sup>-3</sup>	Porosidad total (%)	Agua fácilmente disponible (%)	Agua de reserva (%)	Capacidad de aireación (%)	Reacción	C.I.C. (meq/100 g)
I	0.020-0.094	93.8-98.7	0.7-36.8	0.1-7.8	22.2-90.5	Acida	31.97
M	0.059	96.1	19.9	3.5	44.9	Acida	61

I= Fibra Intervalo (Larga). M= Fibra Mediana (Corta)

**Bagazo de agave.** Entre las alternativas que presentan mejores posibilidades de utilización se encuentra la biotransformación a partir de los procesos de compostaje y vermicompostaje del bagazo, con las ventajas de disminución del volumen y humedad facilitando su transporte, la obtención de materiales con características apropiadas para ser usados en enmiendas agrícolas como mejoradores de suelo y, sobre todo, como sustrato para la producción de plántulas y como base o medio de crecimiento para el cultivo en vivero e invernadero (Rodríguez *et al.*, 2010).

**Espuma de poliuretano.** La espuma de poliuretano puede existir en diferentes formas, sus propiedades dependen de la composición química y de su estructura física. Se ha encontrado que este tipo de espuma de poliuretano es particularmente muy adecuada para usar como un sustrato de cultivo para plantas en hidroponía. De este modo, la espuma no es tóxica; es suficientemente blanda y porosa para que las raíces sean capaces de crecer en su interior; aunque es suficientemente dura para sostener el tallo en crecimiento y las hojas de encima; y puede mantener el equilibrio correcto de la solución acuosa de nutrientes y aire necesario para soportar el crecimiento de la planta. Es una ventaja adicional de la espuma de poliuretano que pueda ser reutilizada o desechada fácilmente. El rápido crecimiento de la industria de los plásticos ha facilitado el uso como sustratos de algunos materiales orgánicos sintéticos, como el poliuretano expandido reciclado. Se obtiene a partir de los residuos de la industria de la espuma de poliuretano y presenta una gran durabilidad en condiciones de cultivo en campo, hasta 10 años. Es inerte y no plantea problemas debido a los cambios repentinos en la CE o humedad (Benoit y Ceustermans, 1995).

**Poliestireno.** La espuma de poliestireno expandido se utiliza como material de relleno con el fin de aligerar el peso de otros sustratos y de los recipientes (Calderón, 2001).

**Espumas de resina fenólica.** Las espumas fenólicas, de uso general en florería están siendo utilizadas para el enraizamiento de esquejes de pompón y clavel aunque son de baja utilización por su elevado costo. Han dado excelente resultado en el cultivo de anturios y otras especies de raíces aéreas que requieren una gran aireación del sistema radicular como las orquídeas (Calderón, 2001).

**Lana de roca.** Está constituida por 5 % de minerales en forma de fibras, 95 % de su espacio poroso lo ocupan el agua (80%) y el aire (15%). Este material es producido a partir de rocas volcánicas, piedra caliza y carbón mineral, fundidos a 1800 °C. No se

degrada químicamente y es biológicamente inofensivo, Lara (1999); en el Cuadro 2 se muestran las características físicas y químicas de este sustrato. En otro contexto Baixauli y Aguilar (2002) indican que la lana de roca se obtiene por la fundición de un 60% de diabasa, 20% de piedra caliza y 20% de carbón de coque, que se introduce en un horno a una temperatura de 1,600 °C. La masa fundida pasa por unas ruedas giratorias, de donde sale en forma de fibras de aproximadamente 0.005 mm. de grosor. En el proceso se añaden estabilizantes (resina fenólica bakelita) y humectantes. Posteriormente la lana se comprime a una temperatura de 260 °C y adquiere su forma, en donde se corta en tablas, para ser embolsadas con un plástico opaco, generalmente blanco en la cara exterior y embaladas. Las planchas se convierten en lo que se denomina tablas, tacos y bloques, en donde se cultivan las plantas o se realizan los semilleros respectivamente.

**Cuadro 2. Características físicas y químicas de la lana de roca.**

Da gcm <sup>-3</sup>	Porosidad total (%)	Agua fácilmente disponible (%)	Agua difícilmente disponible (%)	Agua de reserva (%)	Capacidad de aireación (%)	Reacción	C.I.C. (meq/100 g)
0.08	96	30	0	0.9	35-45	Alcalina	0

**Perlita.** Mineral de origen volcánico, al calentarla a 760 °C la humedad que tiene atrapada en sus partículas es transformada a vapor, en este proceso se expanden, su peso específico es de 0.08 a 0.13 g cm<sup>-3</sup>; diámetro de 2 a 4 mm, la capacidad de retención de agua es de tres a cuatro veces su peso, no tiene capacidad para amortiguar el pH, Lara (1999). Al describir el proceso de obtención Baixauli y Aguilar (2002) mencionan que la perlita es un silicato de aluminio de origen volcánico. El material recién sacado se muele y es transformado industrialmente mediante un tratamiento térmico con precalentado a 300-400 °C y depositado en hornos a 1,000 °C. A estas temperaturas se evapora el agua contenida en sus partículas, obteniendo un material muy ligero con una alta porosidad, obteniendo un material de 128 kg m<sup>-3</sup> de densidad. Las características físicas y químicas del sustrato se indican en el Cuadro 3. En México se conoce también con el nombre de agrolita.

**Cuadro 3. Características de la perlita (B-12).**

Da gcm <sup>-3</sup>	Porosidad total (%)	Agua fácilmente disponible (%)	Agua difícilmente disponible (%)	Agua de reserva (%)	Capacidad de aireación (%)	Reacción	C.I.C. (meq/100 g)
0.143	85.9	24.6	25.2	7.0	29.1	Neutra a ligeramente alcalina	1.5-2.5

**Vermiculita.** Es un mineral con estructura en micas, el cual es expandido cuando se calienta a 1,000 °C debido a que pierde el agua que tiene atrapada entre sus láminas formando pequeños poros, es estéril, ligera (0.1 a 0.2 g cm<sup>-3</sup>), insoluble en agua, pH neutro, capacidad para amortiguar el pH, y relativamente alta capacidad de intercambio de cationes (Lara,1999).

**Grava.** La grava facilita la renovación de aire para las raíces, al no ser absorbente, las partículas de grava se secan rápidamente, por lo que se debe regar frecuentemente (tres o más veces por día), o en forma automatizada, por lo cual este sustrato se recomienda para cultivos de producción elevada, empleando un equipo eficiente de bombas y un buen sistema de drenaje, recirculando la solución nutritiva.

**Escoria volcánica (tezontle).** Es un mineral de aluminosilicato de origen volcánico, se utiliza en forma natural y es muy utilizado en México debido a su disponibilidad (Lara,1999). Baixauli y Aguilar (2002) indican que es un sustrato natural granular, de forma irregular, con superficie rugosa y poros en su interior, es de origen volcánico, con tamaño de partícula inferior a 16 mm. Se pueden encontrar dos tipos de tezontle: el negro y el rojo, éste último es más antiguo y degradado. El tezontle presenta una alta heterogeneidad en sus características; se extrae de canteras a cielo abierto y posteriormente se clasifica por tamaños.

El tezontle es buen sustrato con características en un punto medio respecto a los otros materiales, mismas que se muestran en el Cuadro 4; molido de tal forma que las partículas mayores sean de unos 6 mm para lograr una proporción sustancial de partículas gruesas y polvo.

**Cuadro 4. Características del tezontle (escoria volcánica).**

Da gcm <sup>-3</sup>	Porosidad total (%)	Agua fácilmente disponible (%)	Agua dificilmente disponible (%)	Agua de reserva (%)	Capacidad de aireación (%)	Reacción	C.I.C. (meq/100 g)
0.7-0.8	50-60	10-15	5-7	< 2	30-40	Alcalina	5

El tezontle se caracteriza por su alta porosidad y área superficial (Raviv *et al.*, 2002 y Wallach, 1992). Existen varios tipos de tezontle que se diferencian entre sí por su viscosidad, color y contenido de Fe, Mn, Ca y Mg, estas diferencias se relacionan con el contenido de sílice presente en la roca y la temperatura de erupción, por lo que sus características físicas son determinadas principalmente por su composición mineralógica (Raviv *et al.*, 2002).

### 3.2.3 Características de los sustratos

Según Abad *et al.* (2004), las características del sustrato han de ser distintas según la finalidad con que vaya ser utilizado. Así variarán dependiendo de su uso:

- a) **Semilleros.** Para la germinación de las semillas se requiere un sustrato de fácil preparación y manejo, con el mínimo de perturbación para las raíces, de textura fina, con estructura estable y fluida, con elevada capacidad de retención de agua, que mantenga la humedad constantemente, con escasa capacidad de nutrición, y con bajo nivel de salinidad.
- b) **Crecimiento y desarrollo.** El crecimiento y desarrollo de las plantas exigen sustratos de textura media a gruesa, con una mayor capacidad de aireación, un buen drenaje, un nivel óptimo de fertilizantes y una moderada capacidad tampón y de intercambio catiónico, con objeto de tener un control de pH y mantener su capacidad de nutrición.
- c) **Enraizamiento de estacas.** El medio de enraizamiento desempeña tres funciones: i) Mantener la estaca en su lugar durante el período de enraizamiento, ii) proporcionar humedad a la estaca, y iii) permitir la penetración de aire a la base de la estaca. El medio de enraizamiento ideal debe, por tanto, proporcionar suficiente porosidad y tener una alta capacidad de retención de agua, junto con un buen drenaje, para permitir una aireación adecuada.

Las principales características físicas que se deben determinar en un sustrato antes de su uso, son: densidad aparente, densidad real, distribución del tamaño de partículas, porosidad total, porosidad de aireación, porosidad de retención de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible. Las propiedades físicas en un sustrato son fundamentales; si un sustrato no cumple con las propiedades físicas deseables para un determinado cultivo, se deben modificar antes de que se establezca la planta en el contenedor con el sustrato, ya que posteriormente será sumamente difícil cambiar esas propiedades del sustrato (Abad *et al.*, 2004).

Las partículas de diámetros pequeños, inferiores a 0.25 mm, permiten una retención de humedad excesiva, originando problemas de aireación en el medio de cultivo, pudiendo además ser determinante en la compactación. Sin embargo es importante considerar que

cada sustrato se comporta de manera diferente en la retención de humedad, aunque algunos valores de densidad aparente y porosidad sean similares (Abad *et al.*, 2004).

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de gran importancia (Raviv *et al.*, 1986; Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998). Esto es debido al hecho de que una vez que el sustrato está en el contenedor y la planta creciendo en él, la capacidad del usuario para intervenir en la modificación de las propiedades físicas es prácticamente nula. Esto contrasta con el *status* químico de los sustratos, que puede ser modificado mediante técnicas de cultivo apropiadas.

Resh (1992) cita que la capacidad de retención del agua por un medio se determina a partir del tamaño de las partículas, de su forma y porosidad.

Describiendo las propiedades físicas de los sustratos, Cadahía (1998) menciona que las curvas de retención de agua de los suelos agrícolas se miden usualmente en un amplio intervalo de succiones (0-1.5 MPa). Por lo contrario, las plantas cultivadas en contenedor no pueden someterse a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del medio en que crecen y se desarrollan. Es por esto que, en la determinación de las curvas de liberación de agua de los sustratos, mismas que se observan en las Figuras 1 y 2, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0-100 cm de tensión de columna de agua).

De la misma forma Lemaire *et al.* (1989), al referirse al espacio poroso total, indica que la caracterización del volumen poroso muestra que la porosidad puede ser *intraparticular*, cuando se refiere a los poros situados 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 los fluidos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinto, según que esta porosidad sea abierta o cerrada (ocluida). En el caso de la porosidad cerrada, no existe comunicación posible entre los poros del interior de las partículas y los que están en el exterior, entre dichas partículas. En consecuencia, aquellos poros internos no influirán sobre la distribución del agua y el aire en el sustrato (solo proporcionan ligereza al sustrato). Por el contrario, si la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas, participando en la nutrición hídrica de la planta.

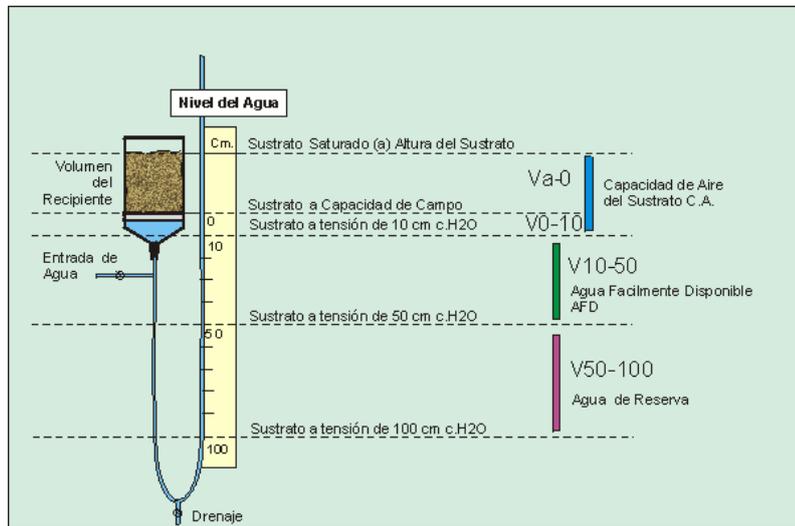
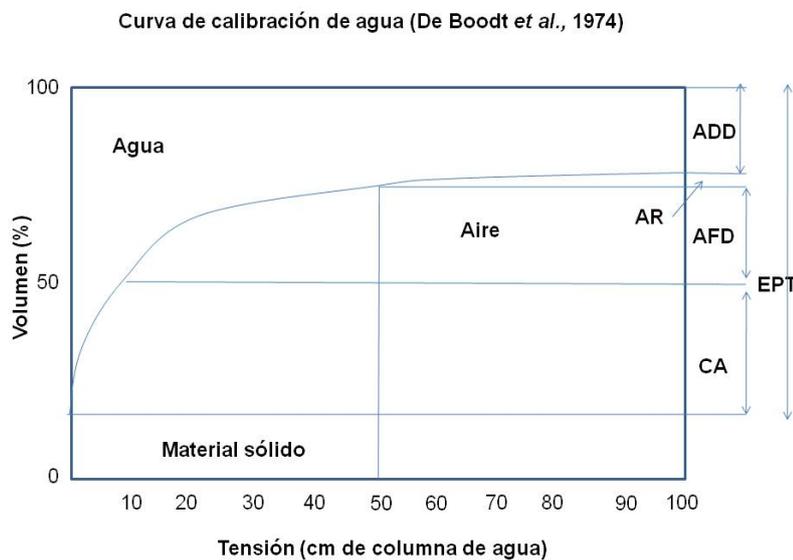


Figura 1. Niveles de tensión medidos en sustratos.



ADD=Agua difícilmente disponible. AFD=Agua fácilmente disponible. CA=Capacidad de Aireación.  
AR=Agua de reserva. EPT= Espacio poroso total.

Figura 2. Curvas de tensión de agua en sustratos.

Las propiedades físicas de los sustratos son importantes para el correcto desarrollo de las plantas, ya que una vez depositado en el contenedor es prácticamente imposible modificar sus parámetros físicos iniciales. Por lo tanto debe contemplarse con cautela todo lo referente a los parámetros físicos, en especial el binomio “retención de agua-aireación”. Condición responsable del éxito o fracaso de la utilización de un determinado material como sustrato de cultivo (Pastor, 1999).

De la misma forma, De Boodt *et al.* (1974), definen esas propiedades físicas de la siguiente manera:

**Agua fácilmente disponible (AFD).** La cantidad de agua (% en vol) que se libera al aplicar una tensión al sustrato entre 10 y 50 cm de columna de agua. Valor óptimo de 20 a 30%.

**Agua de reserva (AR).** La cantidad de agua (% en vol) que se libera al aplicar una tensión al sustrato entre 50 y 100 cm de columna de agua. Valor óptimo de 4 a 10%.

**Agua difícilmente disponible (ADD).** Es el agua (% en vol) que queda retenida en el sustrato después de aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua.

**Capacidad de aireación (CA).** La proporción de volumen del sustrato que contiene aire después que dicho sustrato ha sido llevado a saturación y dejado drenar (normalmente a 10 cm de columna de agua). El valor óptimo se produce cuando se dan valores entre 10 y 30%.

**Espacio poroso total (EPT).** Es el volumen total del sustrato que no está ocupado por partículas orgánicas o minerales. Este dato se determina a partir de la densidad real y aparente. Su valor óptimo se produce cuando alcanza niveles superiores a 85%.

En el Cuadro 5 se indican las características físicas óptimas de los sustratos propuestas por diferentes autores.

**Cuadro 5. Niveles óptimos para las características físicas de sustratos de cultivos.**

Parámetro	De Boodt y Verdonck (1972)	Bunt (1988)	Handreck y Black (1991)	Abad <i>et. al.</i> (1993)
Tamaño de partícula (mm)				0.25-2.5
Densidad aparente gr·cm <sup>-3</sup>				<0.4
Espacio poroso total (%)	85	75-85	60-80	>85
Capacidad de aireación (%)	20-30	10-20	7-50	10-30
Agua fácilmente disponible (%)	20-30		>20	20-30
Agua total disponible (%)		>30		24-40
pH				5.2-6.3
C.E. ds m <sup>-1</sup>				0.75-3.49

Adaptado de: Ortega (2010).

Algunos autores indican que el tamaño de las partículas está relacionado con las propiedades físicas y químicas de los sustratos. Según Abad *et al.* (1993) y Ansorena (1994), el tamaño óptimo de partículas para sustratos hortícolas está entre 0.25 y 2.5 mm. Las partículas de tamaño uniforme mejoran el suministro de oxígeno a las raíces, en relación con mezclas de partículas de diferentes tamaños (Steiner, 1968; Biran y Eliassaf, 1980; Gislerød, 1997). El estudio de las propiedades físicas y químicas de los sustratos es indispensable para evaluar su desempeño en cultivos hidropónicos. Además, es necesario evaluar directamente la respuesta de la planta, de la cual dependerá su manejo adecuado (Luque, 1981).

Las propiedades físicas como aireación, drenaje, retención de agua y densidad aparente, son consideradas como las más importantes para un sustrato debido a que si la estructura física es inadecuada, difícilmente se podrá mejorar una vez que se ha establecido el cultivo. Los niveles óptimos de estas propiedades son: capacidad de aireación, 10 a 20%; retención de agua, 55 a 70%; granulometría, 0.25 a 2.25 mm; densidad aparente, < 0.4 g cm<sup>-3</sup>; agua fácilmente disponible, de 20 a 30% y espacio poroso total, 70 a 85% (Bunt, 1988; Cabrera, 1999).

Villanueva *et al.* (1998), al evaluar el efecto de reguladores de crecimiento y tipo de sustrato en el enraizamiento de *Kalanchoe*, indican que el tezontle es un sustrato con pH moderadamente alcalino, con efectos de salinidad (CE) casi nulos, una alta CIC, muy pobre en materia orgánica, nula relación C/N; extremadamente pobre en N, K, Ca y Mg bajo en P; lo que facilita su uso en la nutrición vegetal al ser un material casi inerte ya que sus contenidos no son influyentes en la oferta de nutrientes, en comparación con los sustratos orgánicos (Cuadro 6).

**Cuadro 6. Características químicas de algunos materiales utilizados como sustrato.**

Sustrato	pH	CE	CIC	MO	C/N	N	P	K	Ca	Mg
		mmho.cm <sup>-1</sup>	meq/100g	%				ppm		
Cachaza	4.5	0.32	36.18	83.1	34.3:1	16400	4678	15.02	33.6	17.76
Turba	3.9	0.26	60.40	50.9	26.0:1	43800	1196	46.40	56.4	22.08
Tezontle	8.1	0.29	30.00	0	0	300	3.93	14.9	11.6	0.24

Cachaza=Derivado del aprovechamiento industrial de la caña de azúcar.

La perlita es un mineral de origen volcánico que tras su extracción y molienda es expandido al ser sometido a altas temperaturas. En ese proceso se obtienen partículas porosas de baja densidad y de diferente tamaño que dan lugar a distintas mezclas comerciales que suponen diferentes propiedades físicas. Sobre todo las que hacen referencia a la mayor o menor capacidad de retención de agua. Generalmente en granulometrías de 0-5 mm. (Astiz, *et al.*, 2010). Así mismo, los autores indican que es un sustrato inerte y estable en el tiempo, es decir, no interacciona con la solución nutritiva aportada al cultivo, ni se ven afectadas en gran medida sus propiedades físicas.

Martínez *et al.* (2006) reportaron las características físicas e hidráulicas de la perlita usada como sustrato único en un cultivo bajo cubierta de rosas (*Rosa hybrida* L.) para corte, así como su comportamiento durante el cultivo en muestras con 0, 28 y 39 meses de uso extraídas de la zona radicular del cultivo (Cuadros 7 y 8).

**Cuadro 7. Variación del tamaño de partículas de perlita por tiempo de uso.**

Tamiz (mm)	Tiempo (meses)	
	0 meses promedio (%)	39 meses promedio (%)
4.75	11.4 a	9.5 b
3.35	22.0 a	20.5 b
2.0	23.4 a	19.8 b
1.0	21.2 a	27.7 b
0.5	8.6 a	10.2 a
0.25	4.9 a	3.5 a
0.125	5.1 a	4.4 a
0.05	3.4 a	4.4 a

**Cuadro 8. Variación en las propiedades físicas de la perlita por tiempo de uso.**

Propiedad	Tiempo (meses)		
	0	28	39
Da (kg m <sup>-3</sup> )	110a	120a	120a
DRI (kg m <sup>-3</sup> )	540a	710b	920c
DRP(kg m <sup>-3</sup> )	1700a	1800a	1800a
PT (% v/v)	93,5a	93,3a	93,3a
PE (% v/v)	79,6a	83,3b	87,0c
CA (% v/v)	47,2a	60,6b	56,4 b
AF (% v/v)	11,2a	8,4a	6,8 a
AR (% v/v)	7,0a	6,5a	4,9a
Ks (m/s)	0,0089a	0,011a	0,0085a

Da= Densidad aparente. DRI= Densidad real de partículas intactas. DRP= Densidad real de partículas pulverizadas. PT= Porosidad total. PE= Porosidad efectiva. CA= Capacidad de aire. AF= Agua fácilmente disponible. AR= Agua de reserva. Ks= Conductividad hidráulica.

Dichos autores concluyen que el tiempo de cultivo modifica las clases de granos superiores a 1 mm, no observándose alteraciones en granos de menor tamaño. Así mismo, se cuantifica un aumento de la porosidad efectiva a expensas de una pérdida de porosidad intrapartícula y de las fracciones de capacidad de aire, manteniéndose los valores de agua fácilmente asimilable y agua de reserva. Además, disminuye la conductividad hidráulica no saturada de la perlita con 39 meses de unas 10 veces respecto del sustrato virgen en la zona de agua fácilmente disponible. Comparando las clases de tamaño de granos entre muestras sin y con uso se observan que las de 1 mm–2 mm; 2 mm–3.35 mm; 3.35 mm–4.75 mm y superiores a 4.75 mm registran variaciones de 31%; 15%; 7 % y 17%, respectivamente.

Al evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México, Vargas *et al.* (2008), tamizaron el tezontle en fracciones de < 0.125, 0.125-0.25, 0.25-0.50, 0.50-0.71, 0.71-1.0, 1.0-2.0, 2.0-4.0, 4.0-6.5, 6.5-8.5 y 8.5-12.6 mm de diámetro. A cada fracción granulométrica se le determinó: densidad aparente, densidad real, espacio poroso total, porosidad ocluida, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad. Encontraron que los valores de densidad aparente y densidad real aumentaron a medida que disminuyó el

tamaño de partícula. La capacidad de aireación se redujo significativamente a medida que el diámetro de partícula disminuyó de 0.50 a 0.25 mm. La capacidad de retención de humedad aumentó a partir de la fracción 0.71-0.50 mm, con valor máximo entre 0.25-0.50 mm de diámetro y el espacio poroso total y porosidad ocluida se incrementaron a medida que aumentó el tamaño de partícula, valores que se pueden apreciar en las Figuras 3 y 4. Se observó una relación inversa significativa ( $p < 0.01$ ) entre la capacidad de aireación y la capacidad de retención de agua.

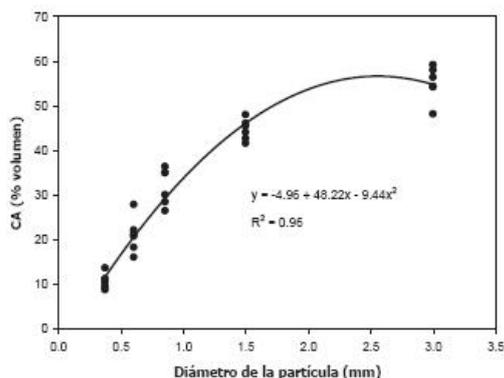


Figura 3. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de aireación de seis muestras de tezontle.

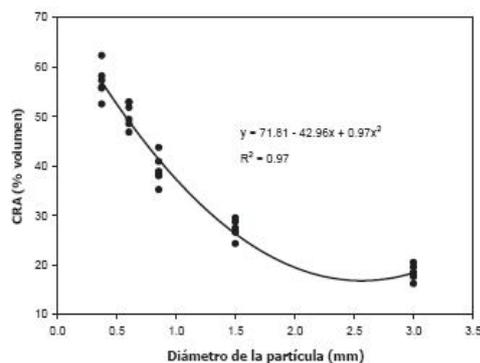


Figura 4. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de retención de humedad de seis muestras de tezontle.

El fenómeno de adsorción se aplica a los sistemas químicos, físicos, biológicos y los sustratos sólidos adsorbentes normalmente utilizados son tales como el carbón activado, las resinas sintéticas, los polímeros, entre otros; para diversas aplicaciones de separación y purificación. La adsorción física es causada principalmente por las fuerzas de van der Waals y fuerzas electrostáticas entre las moléculas adsorbidas y los átomos que componen la superficie o sustrato adsorbente. De modo tal que los adsorbentes son caracterizados por las propiedades superficiales tales como “el área o superficie específica” y la “polaridad”. De esta forma cuanto mayor superficie específica tenga el sustrato adsorbente, mayor será su capacidad de adsorción. De allí la importancia de la capacidad de formación de áreas superficiales interconectadas internas (micro poros o micro cavernas intercomunicadas), la homogeneidad del tamaño y la distribución interna de estos micro poros son las propiedades que más resaltan en importancia a la hora de definir el adsorbente (Vargas *et al.*, 2008)

### 3.2.4 Función del sustrato en el sistema de producción hidropónico

Cánovas (1992) señala que cada planta tiene un potencial productivo dependiente de su dotación genética. La función está condicionada por múltiples factores o parámetros. La raíz suministra a la planta agua y los nutrientes minerales que ella necesita. Para un menor gasto de energía deberá extraerlos en un entorno fácilmente disponible. La energía necesaria la obtendrá por oxidación de los compuestos energéticos que le llegan sintetizados de las hojas, para lo que necesitará del oxígeno del aire, que debe encontrarse en su entorno (radical y dosel) en cantidad suficiente.

Al ser el oxígeno fundamental para la actividad metabólica y crecimiento de las raíces, éste es transferido hacia las raíces (mediante difusión) a través de la lámina de agua que la rodea. La velocidad de difusión del oxígeno en el agua es  $10^4$  veces más pequeña que en el aire. Así pues, el espesor de la lámina de agua alrededor de las raíces es de marcada importancia. Si la textura y la estructura del sustrato son tales que la mayoría de los poros permanecen llenos de agua después del riego, el suministro de oxígeno se verá reducido de modo severo, el  $\text{CO}_2$  se acumulará, se producirá una liberación de etileno, todo lo cual resultará en una inhibición del crecimiento, y a veces, en el marchitamiento de la planta (Raviv *et al.*, 1986).

Mojarro y Moreno (1995), reportaron al analizar promedios obtenidos en la producción de chile jalapeño (*Capsicum annum* L.) que los promedios obtenidos del peso de fruto y número de frutos por tipo de sustrato tienden a incrementar el rendimiento conforme disminuye la proporción de polvillo de coco; de la misma manera se observa un incremento de rendimiento conforme se aumenta la proporción de tezontle. Lo anterior hace suponer que la granulometría del sustrato tiene una influencia en las variables analizadas.

López *et al.* (2005), en sus resultados de investigación en la selección de un sustrato para el crecimiento de fresa hidropónica, encontraron que al evaluar el efecto de cuatro mezclas de fibra de coco y tezontle y el sustrato comercial vermiculita, sobre el crecimiento de dos genotipos de fresa (“Chadler” y “Oso grande”) en un experimento bajo invernadero con sistema hidropónico, encontraron que las mezclas influyeron en el peso seco y fresco de corona, pecíolo y hojas, así como en la altura de plantas y área foliar. La mezcla de 75% tezontle y 25% fibra de coco (vol/vol) produjo las mayores

respuestas de las variables evaluadas que las demás mezclas y la vermiculita. Así mismo, observan una tendencia negativa del crecimiento de plantas conforme se incrementa la proporción de fibra de coco, lo cual permite suponer que debido a la mayor retención de humedad por la fibra de coco se redujo la aireación a nivel de la rizósfera lo que causó una disminución en el crecimiento de la planta.

Magdaleno *et al.* (2006), al evaluar el efecto de tres sustratos y dos colores de plástico en el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot) encontraron que el índice de velocidad de emergencia y el porcentaje de emergencia en turba y la fibra de coco fueron mejores sustratos que la vermicomposta, debido a las propiedades físicas de cada uno de ellos; en donde la densidad aparente fue de 0.17, 0.18 y 0.57  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para la fibra de coco, turba y vermicomposta, respectivamente; en este caso, la elevada Da en la vermicomposta impidió que la germinación y emergencia fueran adecuadas, ya que además de la compactación del sustrato, la aireación no fue la más favorable; la aireación adecuada debe ser considerada para una germinación óptima por lo cual el sustrato empleado debe tener las propiedades físicas que le permitan a la semilla el máximo nivel de aireación y a la vez una cantidad suficiente de humedad (Verdonck *et al.*, 1981; Cantliffe, 1998). La inadecuada aireación genera la producción de niveles tóxicos de amonio en los sustratos e impide una germinación y emergencia normales, situación que probablemente ocurrió en los tratamientos donde se empleó vermicomposta (Willumsen, 1997).

### **3.2.5 Los nutrimentos y el sustrato**

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal es importante mencionar que los tratamientos tradicionales en la fertilización N-P-K sistematizadas para todas las regiones y de una especie vegetal, con las investigaciones desarrolladas, ya no se utilizan en cultivos de alto rendimiento, principalmente de agricultura protegida, ahora con la efectividad del análisis vegetal como herramienta de diagnóstico (Alcántar *et al.*, 2007) y a las técnicas de caracterización de suelos o sustratos con las que se cuentan (Abad *et al.*, 2005), se pueden determinar aquellas que en el medio de la raíz son las idóneas para una nutrición eficiente de las plantas y se pueda suministrar al cultivo un abasto continuo y adecuado de nutrimentos minerales esenciales y complementarios que con base en su fisiología y metabolismo expresen su máximo potencial productivo y que se relaciona con la precocidad, altos rendimientos y buena calidad en las cosechas.

Rojas (1981) menciona que sólo una fracción total del elemento en el suelo es activa y se busca en la solución de equilibrio, es decir la fase líquida en los poros de 1 a 10 nm. La cantidad total del elemento en el suelo le da una presión de disolución que interacciona con otros factores de solubilidad en el suelo (estructura, textura, etc.). De la misma manera indica que el potasio varía mucho en su concentración en el suelo. El contenido total de potasio no indica disponibilidad, pero sí el de la solución de equilibrio, siendo también disponible el potasio intercambiable.

En este sentido, Juárez (1995), al realizar un trabajo experimental en fresa (*Fragaria spp*) con diferentes sustratos en cultivo hidropónico, encontró que la mayor concentración de nitrógeno en el follaje madre fue 2.4%, en el estolón primario 2.32% y en la raíz 2.14% fue en la arena de cuarzo; por el contrario las menores concentraciones 2%, 1.9% y 1.62% de nitrógeno de las mismas variables se presentaron en el tezontle rojo. Indicando que el factor que pudo influir en estos resultados es la granulometría. Para el caso del potasio no se presentaron efectos significativos, sin embargo el valor más alto para la primera variable fue dado por el tezontle rojo con 3.3 % de potasio.

Por su parte Cabrera (2004) menciona que la premisa principal de un sistema hidropónico es la nutrición mineral de la planta y el ambiente químico de la zona radicular son manipulados y manejados completamente a través de la solución nutritiva.

Marschner (1995) indica que tanto la forma química como la carga eléctrica del nitrógeno tienen efectos muy importantes en cuanto a su retención en el sustrato, absorción por las plantas y efectos en el pH de la solución nutritiva del sustrato.

Porcelli y Porcelli (2004), al analizar 75 muestras de sustratos indican que una de las causas principales de incertidumbre para desarrollar planes de fertilización, acorde con las características de cada cultivo, lo constituye la gran variedad de sustratos que se utilizan localmente. Lavado (2005) menciona que en Argentina no existe una estandarización de los sustratos, se utilizan numerosos componentes, que a su vez son extremadamente variables en su composición. Este problema afecta a productores, técnicos y empresas.

Lazcan (2000) indica que el potasio juega un papel muy importante como catalizador dentro del metabolismo de las plantas y generalmente se encuentra donde existe transferencia de energía dentro de la planta. El potasio participa en la formación y neutralización de ácidos orgánicos. Además, juega un papel muy importante en el balance entre la formación, acumulación, transporte y consumo de azúcares por la planta durante el desarrollo vegetativo. En condiciones de baja disponibilidad de oxígeno en la zona radical, por exceso de agua, compactación, la asimilación del potasio se verá disminuido, afectando el metabolismo de la planta.

Quirino *et al.* (2005), al evaluar diferentes sustratos y frecuencias de riego para la producción de tomate en hileras a diferentes alturas de plantación, encontraron que las plantas en arena de tezontle rindieron 42% más que las cultivadas con perlita. La distribución de la solución nutritiva en cuatro riegos al día produjo un rendimiento por planta significativamente mayor que en dos riegos (21% más). Las plantas ubicadas en la hilera superior rindieron significativamente más (54 y 99%), tuvieron más frutos (25 y 30%) y de mayor peso (23 y 78%) que las plantas ubicadas en las hileras intermedia e inferior, respectivamente. El rendimiento de las plantas en arena de tezontle equivale a  $34 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  en un periodo que de trasplante a cosecha puede ser de sólo tres meses.

Juárez *et al.* (2007), encontraron que los resultados de producción y calidad postcosecha indican que es posible cultivar fresas en el sistema de película nutritiva con solución Steiner a 50%, obteniendo mayor rendimiento de frutos de la Clasificación 1 y con calidad postcosecha aceptable. Esto se obtuvo al evaluar tres sistemas para la producción de fresa en invernadero: película nutritiva, riego por goteo en tezontle y riego por goteo en suelo, combinados con tres concentraciones porcentuales de la solución nutritiva Steiner: 50, 100 y 150%, con la finalidad de determinar en qué condiciones las plantas de fresa cv. Chandler se desarrollan mejor, producen mayor rendimiento y mejor calidad postcosecha, El número de hojas, flores y frutos, los cuales dependieron de la disponibilidad de nutrimentos, fue mayor para el sistema de película nutritiva, en comparación con el riego por goteo en suelo. La calidad del fruto no fue afectada por los sistemas de producción ni por la concentración de la solución nutritiva y los valores se encontraron dentro de la norma oficial USDA (1997).

Villegas *et al.* (2001), al evaluar el potencial de la miel de abeja en la nutrición de plántulas de tomate utilizando tezontle y composta como sustrato, encontraron que las

plantas desarrolladas en tezontle que se les aplicó miel de abeja al follaje (2%), el incremento en altura de planta fue más del doble (138.54%) en relación con aquellas que sólo recibieron el riego con solución Steiner. Cuando se utilizó como sustrato la composta, el incremento fue sólo del 40% con relación al testigo. Además, el diámetro de tallo varió desde 0.37 cm en las plántulas desarrolladas en tezontle y regadas solo con solución Steiner, hasta 0.8 cm en plantas que crecieron en tezontle con la aplicación de miel de abeja en la solución nutritiva y en el follaje. Así mismo, el área foliar y la longitud de la raíz también mostraron respuesta, tanto para la aplicación foliar de miel de abeja como por el sustrato (diferencias altamente significativas entre tratamientos  $\alpha=0.05$ ). En las plántulas que crecieron en tezontle, la aplicación de miel de abeja foliar y combinada con el riego incrementó el área foliar hasta ocho veces más que el testigo, sin embargo, no se observó la misma respuesta en las plántulas que crecieron en composta. Concluyen que las interacciones indican que el incremento en el vigor de las plántulas se presenta por efecto del sustrato, del riego y la interacción entre ambos. Para el diámetro de tallo se presentaron diferencias altamente significativas en la interacción sustrato y aplicación de miel vía foliar.

### **3.3 Uso de soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos**

La hidroponía es un sistema de producción para desarrollar plantas con apoyo de soluciones nutritivas, con o sin el uso de un medio artificial (arena, grava, escoria volcánica o tezontle, perlita, vermiculita, lana de roca, polvillo de coco, turbas, entre otros) para dar soporte físico a las plantas. El sistema hidropónico en líquido no tiene un medio de soporte; los sistemas en agregado tienen un medio sólido de soporte (Montero *et al.*, 2006).

Cada especie vegetal que se cultiva en un sistema hidropónico requiere de una solución nutritiva con características específicas. Esta solución nutritiva se puede basar en las propuestas por diferentes investigadores contempladas en la literatura especializada, sin embargo estas se pueden ajustar en base al clima y la etapa fenológica del cultivo (Lara, 1999). En el Cuadro 9 se indican diversas soluciones nutritivas propuestas por diferentes autores.

**Cuadro 9. Relación mutua entre aniones y cationes de diferentes soluciones nutritivas.**

Solución	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	Relación porcentual en mol. m <sup>-3</sup>						
	Aniones			Cationes			
Knop (1985)	79	10	11	23	66	11	-
Robbins (1946)	74	5	21	26	53	21	-
Hoagland y Arnon (1950)	74	5	21	32	42	21	5
Steiner (1961)	60	5	35	35	45	20	-
Resh (1961)	44	8	48	40	40	12	8
Graves (1983)	50	6	44	40	44	16	-

### 3.3.1 La solución nutritiva de Steiner

La solución nutritiva conseguida por Steiner (1984), se basó en una presión osmótica de 0.7 atmósferas y pH de 6.5, estos valores no son universales. Solo las relaciones mutuas entre los aniones y los cationes se conciben como universales, permitiendo diferentes preparaciones a distintas presiones osmóticas deseadas y valores de pH, la solución nutritiva de Steiner expresa las relaciones mutuas entre los cationes potasio calcio y magnesio; y los aniones nitrato fosfato y sulfato (Steiner, 1984), relaciones que se observan en el Cuadro 10. En la solución nutritiva de Steiner, todo el nitrógeno está presente en forma de nitrato, no como amonio. La razón es que los iones amonio en una solución nutritiva son tóxicos en mayor o menor grado para muchas plantas.

Esta fórmula satisface las siguientes condiciones:

- Las relaciones mutuas deseadas entre aniones.
- Las relaciones mutuas deseadas entre cationes.
- La concentración total de iones deseada.
- El valor deseado de pH con una tolerancia de  $\pm 0.1$ .

**Cuadro 10. Relación de cationes y aniones usados en la preparación de la solución nutritiva universal de Steiner.**

	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Total
mmol·L <sup>-1</sup>	7.080	4.552	2.023	11.888	0.991	3.467	30.001
meq·L <sup>-1</sup>	7.080	9.103	4.046	11.888	0.991	6.934	40.044

### 3.4 El potasio y su relación con la agricultura protegida

Las características morfológicas de las plantas tanto en tamaño como en dosel le dan fortaleza y son influyentes en el rendimiento y calidad de la cosecha.

Diversas investigaciones han encontrado resultados sobre la influencia del potasio, calcio, azufre, cobre y boro entre otros, en la resistencia de las plantas al ataque de fitopatógenos y plagas, así como la tolerancia a las bajas y altas temperaturas, al efecto de los vientos, estrés por sequía o exceso de humedad (Molina, 2000).

El potasio no forma parte de ningún compuesto químico dentro de la planta y se encuentra libremente dentro de ella; es activador enzimático, regula el balance iónico e hídrico en las células (Yañez, 2002).

Kant y Kafkafi (s/f) en su investigación sobre “La absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos” indican que la concentración de  $K^+$  varía significativamente entre los distintos órganos de la planta. Los tejidos carnosos como frutos y hojas en sus etapas tempranas de desarrollo, contienen altos niveles de  $K^+$ . Los frutos pulposos como cápsulas de algodón o uvas acumulan altos niveles de  $K^+$ . Además mencionan que las flores, frutos en desarrollo y tubérculos sirven como destino o «reservorio» del  $K^+$ . Estos órganos movilizan  $K^+$  desde las hojas. Si durante las primeras etapas de desarrollo de las plantas los niveles de  $K^+$  son bajos, la demanda en una fase posterior del crecimiento de los frutos puede dar lugar a deficiencias de  $K^+$  en hojas. Este agotamiento de  $K^+$  de las hojas por parte de la removilización hacia los órganos fructíferos conduce a una reducción en su actividad fotosintética que más adelante conducirá a una menor producción o disminución de la calidad de los frutos.

González *et al.* (2000), en la determinación de la dinámica de absorción de potasio por trigo cultivado en diferentes ambientes, mencionan que, en promedio, 41% del potasio se pierde, es decir abandona la planta después de que esta alcanza su máxima acumulación y que la espiga acumula, también en promedio, solamente 26% del potasio total acumulado por la planta. La pérdida del potasio puede estar ocasionado por lavado en el suelo o por caída de las hojas.

Urbina *et al.* (2006), encontraron que el  $K^+$  fue el catión más eficiente ( $p \leq 0.05$ ) para desplazar al  $Na^+$  en la zeolita natural, en su trabajo sobre cultivo hidropónico de plántulas de tomate en zeolita cargada con  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$  y diferentes granulometrías; en donde se probaron tres granulometrías de tezontle (lava volcánica porosa) como testigos. Con las granulometrías fina y media (fina=0.71-1.0 mm, media=1.01-2.0 mm) se obtuvieron las plántulas de mayor tamaño ( $p \leq 0.05$ ). Las

zeolitas cargadas con  $K^+$  o  $Mg^{++}$  produjeron plántulas de mayor tamaño ( $p \leq 0.05$ ) que las obtenidas en la zeolita cargada con  $Ca^{++}$ . Las plántulas establecidas en el tezontle de granulometría gruesa tuvieron menor tamaño que las establecidas en las zeolitas.

Bugarín *et al.* (2002) mencionan que el contenido de potasio en el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), tipo saladet, suele asociarse a la calidad de sus frutos en términos cualitativos; sin embargo, la cantidad de K que satisface a la demanda de este cultivo aún no está definida claramente. Establecieron dos experimentos hidropónicos bajo invernadero; en el primero evaluaron concentraciones de K de 3, 6 y 9 meq  $L^{-1}$ , en el segundo concentraciones de 6, 9, 12, 15 y 18 meq  $L^{-1}$  y su efecto en biomasa aérea, rendimiento y calidad de frutos. Concluyen que el contenido y la acumulación de K en la biomasa aérea de tomate varía en relación directa con la concentración de K presente en la solución nutritiva ( $Q_k$ ). Sin embargo, esto no repercutió sobre la producción de materia seca total y rendimiento de frutos. La mayor calidad de frutos se obtuvo a partir de  $Q_k$  igual a 6 meq  $L^{-1}$  y se mantuvo indistintamente de la concentración de K aplicada ( $Q_k > 6$  meq  $L^{-1}$ ). Por lo tanto, se concluye que el cultivo de tomate saladete var. Yaqui demanda 3.27 kg de K  $ton^{-1}$  de frutos para obtener un óptimo rendimiento y calidad de tomates, lo que equivale a 4.11% de requerimiento interno de potasio.

Luna (2004) concluye que el nitrógeno debe aportarse en el rango de 200 y 250 ppm y el de potasio en el rango de 250 y 300 ppm ya que con estas concentraciones se obtuvo el mayor rendimiento y el mayor porcentaje de frutos de primera calidad, sin embargo estadísticamente no se tuvo respuesta en el diámetro de tallo, medido a 5 cm de la base, y en el peso fresco de frutos de primera calidad. En su investigación sobre la evaluación de diferentes concentraciones de nitrógeno y potasio en solución hidropónica en tomate *Lycopersicon esculentum*, híbrido Dominique, en condiciones de invernadero, en donde se evaluaron dosis de 150, 200 y 250 ppm de nitrógeno y 250, 300 y 350 ppm de potasio.

El potasio es absorbido por la planta en forma catiónica,  $K^+$ . La absorción en el suelo se relaciona con la concentración de otros cationes, es el caso de magnesio ( $Mg^{++}$ ), por competencia iónica, en la cual son absorbidos con mayor facilidad y velocidad los cationes que tienen una sola carga positiva que los que tienen mayor cantidad (Rodríguez, 1992).

Benton *et al.* (1991) indican que los contenidos de potasio en las hojas varían de 1 a 5% y los contenidos en el rango de suficiencia en hojas recientemente maduras se encuentran entre 1.5 y 3%. Menciona además que cuando es absorbido en exceso por la planta los valores pueden ser superiores, llegando a concentraciones de 6 y 8% en tallos de algunas hortalizas. Estos valores críticos varían entre las especies cultivadas, fase de crecimiento y parte de la planta analizada. Cuando el potasio se encuentra en niveles de deficiencia, se retarda el crecimiento y es traslocado de las hojas maduras a tejidos jóvenes. Por su parte Cambell (2000) indica que los rangos de suficiencia en hojas de tomate, producido bajo invernadero, recientemente maduras oscilan entre 3.5 y 4.5%.

Finalmente se expone la principal aportación del presente trabajo, tomando como base al conocimiento generado por las investigaciones aquí citadas y la tendencia que las mismas orientan hacia el futuro sobre el uso de sustratos en una producción más sustentable de especies vegetales; en este sentido la evaluación sobre el uso y reúso del tezontle en comparación de la perlita, permitirá valorar la factibilidad y viabilidad agronómica del reúso de este material ampliamente utilizado en la producción hidropónica.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Localización del sitio experimental

El municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco se localiza en los Valles Centrales del estado en las coordenadas Latitud Norte 20° 26' 28", Longitud Oeste 103° 31' 22" y a una altura de 1524 msnm.

Limita al norte con los municipios de Zapopan y Tlaquepaque, al sur con el municipio de Jocotepec, al este con El Salto, Juanacatlán e Ixtlahuacán de los Membrillos y al oeste con Tala y Acatlán de Juárez.

La investigación se desarrolló en un invernadero de 500 m<sup>2</sup> en el poblado de Buena Vista municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco (Figura 5). Las evaluaciones se realizaron en dos ensayos (tezontle y perlita) de Agosto de 2009 a Septiembre de 2010 estableciéndose tres ciclos de cultivo consecutivos (Agosto 2009, Enero 2010 y Junio 2010). Para la fase experimental, se establecieron 600 plantas en 250 m<sup>2</sup> de dicho invernadero (2.4 plantas m<sup>-2</sup>), de las cuales sólo se consideraron 48 plantas para cada ensayo (48 para tezontle y 48 perlita) para un total de 96 plantas.



Figura 5. Ubicación del invernadero

## 4.2 Clima

La climatología del lugar donde se estableció el experimento se representa por la siglas *A(C)(wI)(w)a(e)g*, que de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1980) para las condiciones de la República Mexicana, corresponde a un clima semicálido (clima de transición entre el clima cálido y el templado) con temperatura media anual por encima de los 18 °C, semiseco con invierno y primavera secos, y semicálido sin estación invernal definida. La precipitación media anual es de 821.9 milímetros. Los vientos dominantes son de dirección norte. El promedio de días con heladas al año es de 4.3.

El comportamiento de temperaturas y humedad relativa en el interior del invernadero se indican en las Figuras 6, 7, 8 y 9.

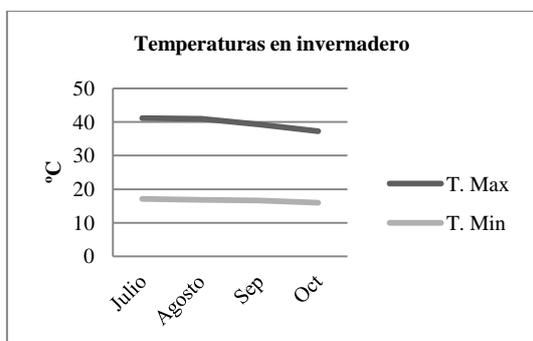


Figura 6. Temperatura promedio (°C) en el interior del invernadero en 2009.

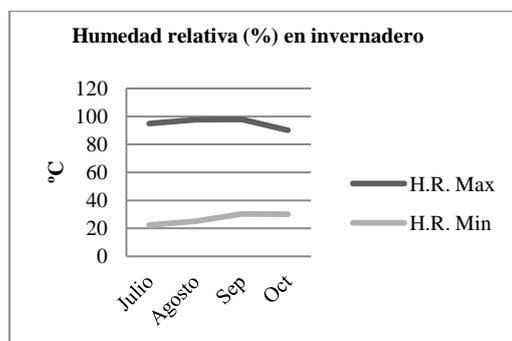


Figura 7. Humedad relativa promedio (%) en el interior del invernadero en 2009.

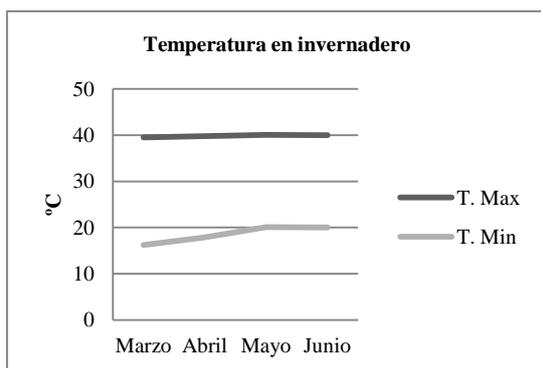


Figura 8. Temperatura promedio (°C) en el interior del invernadero en 2010.

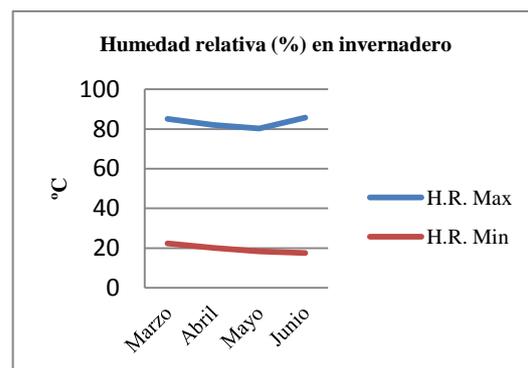


Figura 9. Humedad relativa promedio (%) en el interior del invernadero en 2010.

### 4.3 Materiales físicos

Se utilizó como sustrato tezontle rojo extraído de un banco de materiales del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco y perlita Premium grado B, minerales de origen volcánico que presentan una alta heterogeneidad en el tamaño de partícula, lo cual requirió un primer tamizado para dejarlo en “calidad arena” (partículas de 1 cm aproximadamente); posteriormente antes de su uso en la investigación se homogenizó y se cribó en una malla de 6 mm.

**Tezontle.** El tezontle es un material de origen volcánico que presentó de inicio las características químicas que se muestran en el Cuadro 11.

**Cuadro 11. Principales propiedades físicas y químicas iniciales del tezontle.**

EPT (%)	PA (%)	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	CIC (meq 100 g <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg
								-----ppm-----	
55.5	40.67	7.2	0.05	2.5	250	3.15	13	10	0.25

**Perlita.** La perlita es una roca volcánica vítrea (silicato de aluminio) formada por el enfriamiento rápido; es un material amorfo que contiene entre 2 y 5% de agua atrapada. El material utilizado presentó a su inicio una C.I.C de 1.8 meq 100 g<sup>-1</sup> y un pH de 7.2. Al ser un sustrato con poca actividad química, no presenta en su composición minerales influyentes en la nutrición de las plantas.

Con la finalidad de obtener el material para evaluación de tezontle y perlita: cero uso, primer reuso y segundo reuso, fue necesario establecer el cultivo de tomate en un experimento secuenciado en el periodo de Agosto de 2009 a Septiembre de 2010; así, para el ciclo que inició en Agosto de 2009, se utilizó tezontle y perlita virgen, es decir cero uso de tezontle (T0) y para la perlita (P0). Al final de éste ciclo el mismo material, tezontle y perlita, fueron utilizados para establecer el siguiente cultivo y así obtener resultados referentes al tezontle y perlita de primer reuso (T1 y P1); de la misma manera al finalizar este ciclo se estableció el siguiente cultivo para obtener información de un segundo reuso (T2 y P2). A dichos materiales se les determinaron las características físicas de interés antes y después de su utilización.

#### **4.4 Material vegetal**

Se utilizó la variedad de Tomate Saladet (*Lycopersicon esculentum*) SUN 7705 de la empresa Nunhems, de crecimiento indeterminado. Para la producción de las plántulas se utilizaron charolas que contenían como sustrato Sunshine N° 3 (integrado por una combinación de musgo, *Sphagnum canadiense* y vermiculita principalmente). Los trasplantes de cada ciclo y para los tres tratamientos por tipo de sustrato, se efectuaron el 7 de Agosto de 2009, el 2 de Enero de 2010 y el 17 de Junio de 2010; mismos que se realizaron en bolsas negras de polietileno con capacidad de 18 litros, conteniendo el sustrato tezontle y perlita.

#### **4.5 Diseño experimental**

El diseño experimental fue completamente al azar, incluyó tres tratamientos para el ensayo de tezontle y tres tratamientos para el ensayo de perlita respectivamente:

Tratamiento 1: Primer uso T0 y P0 (año 2009)

Tratamiento 2: Primer reuso T1 y P1 (año 2010)

Tratamiento 3: Segundo reuso T2 y P2 (año 2010)

Con cuatro repeticiones por tratamiento y tipo de sustrato, cuatro plantas por repetición; cada planta correspondió a una unidad experimental teniendo 16 plantas por tratamiento, tipo de sustrato y ciclo de cultivo correspondiente.

Para las variables evaluadas, se efectuó el análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), así como la desviación estándar para los tratamientos; se utilizó el paquete SAS (1990).

#### **4.6 Preparación de los sustratos**

El experimento contempló el uso de sustrato con partículas de 6 mm de diámetro e inferiores, y antes de la caracterización y su uso para la presente investigación, el material recibido a granel presentaba tamaños denominados “calidad arena”, es decir partículas de más de 1 cm de diámetro. Por tal razón se tamizó con una malla de 6 mm de diámetro para proceder a su caracterización inicial (T0 y P0).

La determinación de las características físicas del sustrato se inició con el uso del tamizador *Tyler Ro-Tap*, cuya única operación se basa en dos dimensiones: un movimiento horizontal circular y un movimiento vertical a base de golpes. Esta acción especial permite que las partículas de la muestra sean estratificadas para conseguir tamaños de partículas críticos.

Ya tamizados al tamaño requerido y después de su caracterización inicial, se depositaron en bolsas de polietileno negro con capacidad de 18 litros utilizadas como contenedor.

#### **4.7 Colecta de muestras**

Se recolectó una muestra de cada sustrato por unidad experimental para formar una muestra compuesta por repetición, obteniendo un volumen final por sustrato de 5 litros para realizar tres análisis para cada parámetro físico estudiado. Los materiales presentaban diferentes contenidos de humedad y se procedió a su secado en una estufa con circulación de aire forzado a una temperatura de 60 °C durante 48 horas. Estos análisis se realizaron al inicio y final de cada ciclo de cultivo. Después de evaluar las características físicas del sustrato original (T0 y P0), el material cribado para el primer ciclo, se depositó en bolsas de polietileno negro con capacidad de 18 litros. Para el segundo ciclo de cultivo, solo se eliminó la parte aérea de las plantas del primer ciclo y se usó la misma bolsa con el sustrato derivado (T1 y P1) para establecer la plántula de tomate del segundo ciclo. Procediendo de la misma manera para el tercer ciclo y con el sustrato (T2 y P2) derivado del ciclo anterior.

#### **4.8 Conducción del experimento y manejo del cultivo**

##### **4.8.1 Tratamientos**

Los tratamientos se basaron en el uso y reúso del tezontle y la perlita, los cuales se describen en los Cuadros 12 y 13, y el efecto que produjo su reutilización en las características físicas del sustrato: densidad aparente, capacidad de retención de humedad, porosidad total y porosidad de aireación; determinaciones realizadas por el método descrito por Ansorena (1994). Además se determinó la distribución del tamaño de partículas realizando dos tamizados, el primero de ellos con tamices de 6, 5, 4, 3 y 2 mm. Adicionalmente, y con el objetivo de precisar las diferencias entre las

características físicas de los sustratos, se determinó la distribución del tamaño de partículas finas (< 5 mm), en un segundo tamizado con tamices de 5, 0.84, 0.42, 0.3 y 0.25 mm. Los valores obtenidos se presentan en el capítulo de resultados.

**Cuadro 12. Descripción del uso y reúso del tezontle utilizado como tratamiento.**

Tratamiento	Descripción	Ciclo	Observaciones
T0	Tezontle 0 uso	1	Material Virgen
T1	Tezontle 1er reúso	2	Material derivado de T0
T2	Tezontle 2do reúso	3	Material derivado de T1

**Cuadro 13. Descripción del uso y reúso de la perlita utilizada como tratamiento.**

Tratamiento	Descripción	Ciclo	Observaciones
P0	Perlita 0 uso	1	Material Virgen
P1	Perlita 1er reúso	2	Material derivado de P0
P2	Perlita 2do reúso	3	Material derivado de P1

#### 4.8.2 Obtención de la plántula y trasplante

La siembra del semillero para el primer ciclo se realizó el 15 de Julio del 2009, la del segundo ciclo el 8 de Diciembre del 2009 y la del tercer ciclo el 20 de Mayo del 2010, utilizando charolas de 200 cavidades, con dimensiones de 60 x 34 cm. El sustrato para el germinado de la semilla fue la turba Sunshine Mix N° 3 ®, se humedeció hasta punto de escurrimiento al presionarlo con la mano y se colocó en las charolas germinadoras. Se depositó una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 cm, se cubrió con una pequeña capa del mismo sustrato húmedo. Las charolas se estibarón cubriéndolas con un plástico negro durante 3 días para conservar la humedad y favorecer la germinación. Al cuarto día se descubrieron y se ubicaron en el invernadero bajo una malla sombra. Se aplicaron dos riegos diariamente. Las plantas emergieron 4 días después.

Durante el desarrollo de la plántula se aplicó Previcur y Derosal a razón de 1 mL por cada litro de agua aplicado, de forma preventiva para el control de enfermedades de la raíz.

El trasplante se realizó a las bolsas de polietileno negro conteniendo el sustrato tezontle y perlita. Las bolsas previamente fueron perforadas en el fondo para facilitar el drenado.

Antes del trasplante, el sustrato fue lavado con 5 litros de agua para reducir el contenido de sales en el medio de cultivo. Posteriormente se desinfectó con una solución a base de sales cuaternarias de amonio (benzalconio cloruro) y sulfato de cobre al 60%, a razón de

1 mL por litro de agua de benzalconio y 0.5 gramos de sulfato de cobre por litro de agua, aplicando 2 litros de la solución por bolsa. Se cubrieron las bolsas con un plástico por 5 días y se lavó nuevamente para drenar los residuos de la solución.

La plantación en el invernadero se realizó en líneas, colocando pares de plantas por línea. La distancia entre líneas fue de 80 cm y entre plantas de 30 cm, para una densidad de población de 2.4 plantas m<sup>-2</sup>. El piso del invernadero fue cubierto con un tapete plástico de color negro, denominado “*Ground Cover*”.

#### **4.8.3 Riegos**

Para cubrir las necesidades hídricas de la planta se utilizó un sistema de riego por goteo con mangueras de polietileno negro, instalando un gotero marca *Rain Bird* al cual se le colocó un micro tubo de 4 mm de diámetro y de 50 cm de longitud, para la fijación del micro tubo en la bolsa se usó una piqueta por planta con un aforo de 2 L·hr<sup>-1</sup>, a una presión de 15 lb·plg<sup>-2</sup>. Para el control del flujo del riego se instaló una electroválvula.

La frecuencia, tiempo y volumen de riego por aplicar se realizó con el uso del Programador ESP Modular de la marca *Rain Bird*®.

Con la intención de garantizar uniformidad del riego y la nutrición de la planta se realizó una evaluación del sistema de riego, misma que se observa en el Apéndice en el Cuadro A2, en base al método Bralts y Kesner descrito por Pizarro F. (1986), obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de 95.06, un Coeficiente de Variación de 0.0242 y un Gasto promedio de 2 L·hr<sup>-1</sup>.

Para establecer la frecuencia del riego, al sustrato se le determinó la capacidad de retención de agua con la metodología descrita por De Boodt *et al.* (1974), misma que fue de 2 litros, aplicando el riego con base en esa capacidad. El riego se aplicó en etapas, de acuerdo al desarrollo de la planta. Información que se observa en el Cuadro 14.

**Cuadro 14. Frecuencia y volumen de riego aplicado por planta.**

Etapa	1a	2a	3a	4a	5a
Tiempo	15 días	15 días	15 días	10 días	10 días
Vol. Agua/planta/día	600 cc	800 cc	1,000 cc	1,500 cc	2,000 cc
No de riegos/día	2	2	2	2	2
Vol. de agua por riego / planta	300 cc	400 cc	500 cc	750 cc	1000 cc

Después de la 5ª etapa se continuó con el riego igual.

En el sistema de riego se instalaron filtros de 200 mallas antes de cada inyector y a la salida un filtro de anillos de 200 mallas marca *Amiad*. La calidad del agua utilizada para el riego, proveniente de un pozo profundo de la zona, se muestra en el Cuadro 15.

#### 4.8.4 Solución nutritiva

La formulación química de la solución nutritiva y la nutrición de las plantas se realizó a través de un sistema de riego por goteo aplicando la Solución Steiner (1968, 1981, 1984) en diferentes porcentajes, restando los aniones y cationes determinados en el análisis del agua realizado, iniciando con el 10% de la solución e incrementos del 5% hasta terminar con un máximo del 40% de la misma en función de las fases fenológicas del cultivo (Cruz *et al.*, 2012). La dosificación de los fertilizantes se efectuó con el uso de dos inyectores de fertilizante marca *Dosatron* con un flujo de operación máximo de 14 galones por minuto (53 L min<sup>-1</sup>). Los resultados del análisis del agua de riego se observan en el Apéndice (Cuadro A1).

**Cuadro 15. Solución nutritiva Steiner, contenidos del agua de riego y aportes realizados.**

	-----Aniones meq/L-----					-----Cationes meq/L-----		
	NO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	K	Ca	Mg
<b>Solución</b>	12	1	7	0.5	0	7	9	4
<b>Agua</b>	0	0	1.3	3.5	1	0.26	1.5	0.5
<b>Aportes</b>	12	1	5.7	-3	0	6.74	7.5	3.5

Análisis del agua de riego realizado por el Laboratorio de Agua y Suelo del CUCBA de la Universidad de Guadalajara. El valor -3 meq/L de bicarbonatos indica su neutralización con ácidos.

Para la neutralización de bicarbonatos y ajuste del pH en la solución nutritiva se usó ácido nítrico y ácido fosfórico (Cuadro 16).

En el invernadero se establecieron 600 plantas en pares de líneas de 50 plantas cada par de líneas, donde se ubicaron las bolsas conteniendo los sustratos analizados. La solución nutritiva se calculó para las 600 plantas utilizando fertilizantes comerciales y

distribuyéndose como se indica en el Cuadro 16. La nutrición del cultivo se realizó en etapas, aplicando diferentes porcentajes de la solución. A partir de la 5ª etapa se continuó con la nutrición con el mismo porcentaje.

**Cuadro 16. Fertilizantes utilizados en la nutrición y distribución por etapa durante el ciclo.**

Fertilizante	Meq/L	mg/lit = g/1,000 L de agua	1a Etapa	2a Etapa	3a Etapa	4a Etapa	5a Etapa
			mg/180 L 10%	mg/240 L 15%	mg/300 L 25%	mg/450 L 25%	mg/600 L 40%
KNO <sub>3</sub>	3	303	5.51	10.91	18.18	18.18	29.09
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	7.5	885	16.09	31.86	53.10	53.10	84.96
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	3	369.6	6.72	13.31	22.18	22.18	35.48
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.2	278.4	5.05	10.02	16.70	16.70	26.73
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.68	154	28.00	36.96	46.20	69.30	92.40
HNO <sub>3</sub>	3	242	44.00	58.08	72.60	108.90	145.20
Total			105.37	161.14	228.96	288.36	413.856
g planta <sup>-1</sup>			0.2	0.3	0.4	0.5	0.7

Los elementos menores se incorporaron al sistema de riego, agregándolos a la solución nutritiva final. Los fertilizantes utilizados fueron productos comerciales diversos para nutrir con las cantidades que se indican en el Cuadro 17.

**Cuadro 17. Elementos menores incorporados a la solución nutritiva.**

ppm					
Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
0.56	0.56	0.03	0.26	0.22	0.05

Para las mediciones, manejo y ajuste de la solución nutritiva en pH y conductividad eléctrica se utilizó un potenciómetro portátil marca *Hannan*.

#### 4.8.5 Podas y tutorio

Las plantas se guiaron a un solo tallo eliminando los brotes axilares del tallo principal durante todo el desarrollo del cultivo, iniciando a los 25 días después del trasplante. El tutorio se realizó utilizando hilo “rafia” y clip de broche plástico con la finalidad de mantener la planta erguida y tener un mejor manejo fitosanitario.

#### 4.8.6 Plagas y enfermedades

De forma preventiva se realizaron las siguientes acciones:

- a) Tapete sanitario en caseta de ingreso con solución de sales cuaternarias y sulfato de cobre y gel antibacterial para las manos.
- b) Plástico amarillo para monitoreo de insectos en caseta de ingreso y a lo largo de los pasillos interiores.
- c) Aplicación de pesticidas conforme al programa especificado en el Cuadro 18.

**Cuadro 18. Programa preventivo fitosanitario.**

Semana	Pulsor	Bavistín	Productos aplicados en dosis por hectárea								
			Hidróxido Cúprico	Zineb	Diazinón	Captán	Thiodán	Herald	Aliette	Vel Rosita	Aceite parafínico
5 días de plantación	300 ml	500 g									
1			500 g	500 g	0.5 L						
2						0.5 kg	0.5 L				
3			1 kg	1 kg				250 ml		0.5 L	
4					1 L				1 kg		
5			1 kg	1 kg			1 L				
6					1 L				1 kg		
7			1 kg	1 kg				250 ml		0.5 L	
8					1 L	1 kg			1 kg		
9			1 kg	1 kg			1 L				
10			1 Kg		1 L	1 kg					

En tratamiento correctivo se aplicó TK (acaricida) para control de ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*) y diferentes insecticidas para control de mosca blanca (*Bemisia argentifolii*).

#### 4.8.7 Variables evaluadas en la planta

**Altura de planta.** La altura de planta (AP) se midió con un flexómetro, considerando la longitud del tallo desde la base al nivel del sustrato hasta la parte superior (yema terminal) de la planta. Las mediciones se realizaron periódicamente a los 21, 45, 56 y 71 días después del trasplante (ddt) hasta que alcanzó la altura del quinto racimo formado. Para el primer cultivo (T0 y P0) se inició la medición de las variables en estudio el 28 de Agosto de 2009 y se terminó el 17 de Octubre del mismo año. En el segundo cultivo (T1 y P1) se inició el 23 de Enero de 2010 y finalizó el 23 de Marzo del mismo año. En el tercer cultivo (T2 y P2) se inició 30 de Junio de 2010 y se terminó el 12 de Septiembre del mismo año.

**Grosor de tallo.** El grosor de tallo (GT) se midió con un vernier digital Caliper serie QL-V, tomando como referencia el primer entrenudo de la planta ubicado abajo del primer racimo floral, se midieron periódicamente a los 21, 45, 56 y 71 días después del trasplante (ddt).

**Peso promedio de fruto.** El peso promedio de fruto (PPF) de cada uno de los racimos se determinó cosechando los frutos al inicio de su maduración, utilizando una báscula digital Torrey Modelo LPCR 20 para obtener el peso promedio. Se evaluaron los primeros cinco racimos.

**Sólidos solubles totales.** La concentración de sólidos solubles totales (SST) se expresó en grados Brix, estos son una forma de medir la densidad. Un grado Brix es la densidad que tiene una solución de sacarosa a 20° C a una concentración de 1%, a esta concentración corresponde un determinado índice de refracción. Para su determinación se utilizó un refractómetro marca ATAGO PAL-1 calibrándolo con agua destilada (el índice de refracción del agua destilada es de 1.3330 que corresponde a 0% de sólidos solubles), posteriormente se colocó una gota del extracto de tomate y se tomó la lectura, esta determinación se promedió de tres lecturas realizadas. El equipo se lavó con agua destilada entre cada determinación realizada.

#### 4.8.8. Variables evaluadas en sustrato

En todos los casos las determinaciones físicas de los sustratos se realizaron en ensayos de tres repeticiones. Previamente las muestras de sustratos fueron secadas a una temperatura de 70 °C en una estufa de ventilación forzada hasta peso constante.

**Densidad aparente.** Esta característica es utilizada en ocasiones para estimar la capacidad total de retención de agua del medio de cultivo y su grado de compactación. Se define como el volumen que ocupa el sustrato, teniendo en cuenta el espacio entre partículas y se calcula dividiendo el peso seco del sustrato entre el volumen aparente de sustrato. Esta se determinó por el método De Boodt *et al.* (1974).

---

$$Da = \frac{P_{ll} - P_v}{V}$$

Dónde:

Da= Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>)

Pll = Peso de probeta llena (g)

Pv = Peso de probeta vacía (g)

V = Volumen ocupado por sustrato (cm<sup>3</sup>)

---

**Porosidad total.** El espacio poroso o porosidad total es la porción no sólida del volumen del sustrato. Representa el volumen del aire del material, seco en estufa,

expresado como un porcentaje del volumen total. Esta se determinación se realizó por el método De Boodt *et al.* (1974).

---

$$\text{Porosidad total (\%)} = \frac{V_a + \frac{PH - PS}{Pa}}{V_c} \times 100$$

Dónde:

V<sub>a</sub> = Volumen drenado (cm<sup>3</sup>)

PH = Peso húmedo de la muestra (g)

PS = Peso seco de la muestra (g)

Pa = Peso específico del agua (1 g cm<sup>-3</sup>)

V<sub>c</sub> = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

---

**Porosidad de aireación.** Cuando un medio de cultivo se ha saturado con agua y se ha permitido el drenado libremente, se dice que el medio está a capacidad de recipiente y el volumen del medio ocupado por aire a este nivel de humedad es la denominada capacidad de aireación del sustrato o porosidad de aireación. (De Boodt *et al.*, 1974).

---

$$\text{Porosidad de aireación (\%)} = \frac{V_a}{V_c} \times 100$$

Dónde:

V<sub>a</sub> = Volumen drenado (cm<sup>3</sup>)

V<sub>c</sub> = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

---

**Capacidad de retención de agua.** La capacidad de retención de agua de un medio de cultivo es el volumen de agua que se retiene después de permitir el drenado posterior a un riego. La cantidad de agua retenida por un medio en particular es dependiente de la distribución del tamaño de las partículas y la altura del recipiente. (De Boodt *et al.*, 1974).

---

$$\text{Capacidad de retención de agua (\%)} = \frac{PH - PS}{V_c} \times 100$$

Dónde:

PH = Peso húmedo de la muestra (g)

PS = Peso seco de la muestra

V<sub>c</sub> = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

---

**Distribución del tamaño de partículas.** La granulometría del sustrato determina el tamaño y distribución de los poros y la proporción agua-aire y en consecuencia el régimen de riego y el desarrollo de las plantas. El análisis granulométrico se ha considerado como una práctica importante en la caracterización de sustratos. (De Boodt *et al.*, 1974).

La granulometría del sustrato determina las propiedades físicas del mismo. Para la separación granulométrica, en un primer tamizado, se emplearon tamices de 6, 5, 4, 3 y 2 mm; en un segundo tamizado se emplearon tamices de 5, 0.84, 0.42, 0.3 y 0.25 mm de

utilizando para ello un tamizador *Tyler* (Rotap) de la Planta Piloto del Departamento de Madera Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara.

**Superficie específica.** La determinación de la superficie específica de óxidos y minerales, se realiza generalmente mediante la adsorción de N<sub>2</sub>, con el método BET (Brunnauer, Emmett y Teller). Debido a que la superficie específica es una propiedad que depende de la técnica utilizada para medirla, el método BET es reconocido mundialmente como standard.

La determinación de la superficie específica del tezontle y la perlita se realizó en el Laboratorio de Biomateriales del Departamento de Celulosa, Madera y Papel de la Universidad de Guadalajara.

#### **4.8.9 Toma de muestras de hoja**

La finalidad de los procedimientos de muestreo de hoja es obtener una muestra representativa del total, para realizar el análisis de laboratorio y determinar los niveles de los diversos componentes de la materia vegetal, como minerales, macro y micronutrientes, o residuos de plaguicidas remanentes en los vegetales.

Con el objetivo de determinar el contenido de potasio en hoja se tomaron muestras de hojas abajo del primer racimo de frutos, abajo del tercer racimo y arriba del quinto racimo de frutos de las plantas establecidas en los diferentes tratamientos. En todos los casos al inicio de la maduración de los frutos. El peso de la muestra fue de 50 gramos de hoja fresca. La toma de muestra y la preparación de la misma se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Alcántar *et al.* (2007) y con algunas modificaciones de la siguiente manera; una vez tomadas las muestras se lavaron con agua fría y agua destilada, cuando las hojas estuvieron limpias se colocaron en bolsas de papel y se secaron en la cámara de secado a una temperatura de 60° C durante 48 hr aproximadamente. Una vez secas se molieron y se tamizaron en una malla de 0.5 mm para homogenizar la muestra. El producto molido se colocó en pequeñas bolsas de polietileno con cierre hermético (*zipper*) para su posterior análisis.

#### **4.8.10 El análisis foliar**

El término “análisis foliar” incluye todos métodos de diagnóstico directo que hace uso del análisis químico aplicado a partes representativas de las plantas (Carvajal, 1978). Si se desea enfocar el análisis foliar desde el punto de vista de balance nutrimental de la planta, una adecuada selección de muestras puede incluir la planta entera o secciones específicas de la misma como los peciolos, las raíces y las hojas. Sin embargo, generalmente son estas últimas las que mejor reflejan el estado nutrimental de la planta, ya que es ahí donde se efectúa la elaboración de sustancias para el crecimiento y la fructificación.

Los análisis foliares se realizaron con la técnica de absorción atómica con el equipo Varian AA240FS del Laboratorio Ambiental del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. La curva de calibración fue de 4 puntos con los estándar 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 mg L<sup>-1</sup>. Para su interpretación se analizó con el software SepctrAA 5.1 Pro que es una hoja de cálculo que muestra los resultados de concentraciones de los elementos analizados.

Previo al análisis las muestras se sometieron a una digestión con 4 mL de HNO<sub>3</sub> y 2 mL de HClO<sub>4</sub> por muestra (relación 2:1); se pesaron en balanza analítica, marca Radwag, 0.25g de material vegetal molido y seco, se colocaron en matraces Kjeldhal de 30 mL. Los matraces Kjeldhal con las muestras se colocaron en la placa de digestión o digestor y se reguló la temperatura a 150°C por 45 minutos. El producto de la digestión se conservó en refrigeración hasta su análisis por absorción atómica.

#### **4.8.11 Análisis estadístico**

Los datos que se obtuvieron durante las observaciones en el comportamiento del sustrato y la planta se sometieron a un análisis de varianza y una comparación de medias con la prueba de Tukey (p=0.05). Para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS (1990).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de manera independiente de las evaluaciones realizadas para los dos ensayos de la investigación (tezontle y perlita), de cada uno de los tres ciclos de cultivo consecutivos (Agosto 2009, Enero 2010 y Junio 2010), iniciando con la descripción y discusión de los resultados correspondientes al tezontle y posteriormente para la perlita.

### 5.1 Caracterización física de los materiales evaluados

#### 5.1.1 Sustrato tezontle

Se encontró que las variables medidas: densidad aparente, retención de humedad en columna, retención de humedad en contenedor, porosidad total y porosidad de aireación se vieron modificadas por efecto en la distribución del tamaño de partículas ocasionado por el reúso del sustrato.

##### 5.1.1.1 Distribución del tamaño de partículas

Las partículas mayores de 6 mm después de su primer reúso ya no se percibieron, en cambio las partículas menores se mostraron con una diferente redistribución (Cuadro 19). En esta investigación se realizó un segundo tamizado para determinar la redistribución del tamaño de partículas y su efecto en las variables de cultivo medidas. En este sentido, el mayor porcentaje de partículas finas, que son influyentes en la capacidad de retención de humedad y aireación de los sustratos, se encontraron entre 0.84 y 0.42 mm por una redistribución del tamaño de partículas originadas por el reúso, lo cual puede apreciarse con los valores del coeficiente de variación (CV) (Cuadro 20).

**Cuadro 19. Distribución del tamaño de partículas del sustrato en su primer tamizado.**

Tamiz	Tezontle 0 uso (T0)		Tezontle 1er. reúso (T1)		Tezontle 2do. reúso (T2)		C.V. (%)
	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	
>6 mm	57.00	7.94Aa	0.00	0Ba	0.00	0Ba	3.01
5 – 6 mm	50.33	7.01Ab	24.00	5.63Bb	10.00	4.02Cb	0.17
4 – 5 mm	166.33	23.16Ac	134.00	31.4Bc	44.00	17.67Cc	0.037
3 – 4 mm	38.00	5.29Ad	80.00	18.78Bd	17.00	6.83Cd	0.115
2 – 3 mm	126.00	17.54Ae	38.00	8.92Be	30.00	12.05Ce	0.078
< 2 mm	280.67	39.07Af	150.00	35.21Bf	148.00	59.44Cf	2.255
C.V (%)		0.054		0.054		0.143	

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), las mayúsculas son las diferencias entre tratamientos (fila) y las minúsculas entre tamaño de tamiz (columna)., C.V= Coeficiente de Variación.

**Cuadro 20. Distribución del tamaño de partículas del sustrato en su segundo tamizado.**

Tamiz	Tezontle 0 uso (T0)		Tezontle 1er. reúso (T1)		Tezontle 2do. reúso (T2)		C.V. (%)
	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	
>5 mm	240	51.1 Aa	5	1.0 Baa	0.00	0 Ca	0.47
5-0.84 mm	224	47.7 Ab	395	79.9 Bbb	194.00	74.40Cb	0.15
0.84-0.42 mm	1.5	0.3 Ac	60	12.1 Bcc	50.00	19.20Cc	0.78
0.42-0.3 mm	0	0.0 Ad	15	3.0 Bdc	9.00	3.40 Cd	3.11
0.3-0.25 mm	0	0.0 Ae	5.5	1.1 Bed	2.50	0.90 Ce	8.33
< 0.25 mm	4	0.9 Ae	14	2.8 Bfd	5.00	1.90 Cf	0.54
C.V. (%)		0.33		0.57		0.17	

Medias con distinta letra en fila y columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), las mayúsculas son las diferencias entre tratamientos (fila) y las minúsculas entre tamaño de tamiz (columna)., C.V.= Coeficiente de Variación.

Se presentó además una disminución de la porosidad influyente en la aireación (T0: 12.3% y T2: 8%), debido a que las partículas superiores a 5 mm ya no aparecieron después del primer reúso (Cuadro 19 y 20), pero hubo un incremento en la porosidad influyente en la retención de agua (T0: 43% y T2: 48%) y como consecuencia una disminución en la capacidad de aireación (Cuadro 21). Resultados similares reportan Vargas *et al.* (2008) al evaluar el efecto de tamaño de partícula en propiedades físicas de tezontle; concluyen que cuando el diámetro de partícula se reduce por debajo de 0.50 mm la capacidad de aireación se reduce significativamente, además que los valores de espacio poroso total y de porosidad ocluida se incrementan al aumentar el tamaño de partícula. A diferencia del comportamiento del tezontle, Anicua *et al.* (2009), en su investigación sobre la micromorfología y propiedades físicas de la perlita, consignan que debido al empaquetamiento de las partículas se origina un incremento en el tamaño de las mismas, y en consecuencia, una mayor capacidad de aireación por el incremento en la proporción de macroporos.

El reúso del tezontle influyó en las características físicas del sustrato que intervienen en el manejo del riego y la nutrición del cultivo: densidad aparente, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación. La densidad aparente, debido al cambio del tamaño de partícula (Cuadros 19 y 20), fue la que presentó mayor variación al pasar de 0.92 en T0 a 0.91 en T1 y a 0.81  $\text{g cm}^{-3}$  en T2; la retención de humedad presentó un aumento significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) con el reúso y por lo tanto la capacidad de aireación disminuyó también significativamente (Cuadro 21). A pesar de estos cambios, el comportamiento del cultivo no se vio afectado, ya que manejando el riego de acuerdo a cada una de estas variables en los tratamientos se mantuvo la producción en todos los casos. En este sentido, los valores observados en densidad aparente entre los tratamientos a pesar de presentar diferencia estadísticamente significativa, se encuentran

dentro de los rangos reportados por Vargas *et al.* (2008), quienes refieren promedios entre 0.67 y 0.98 g cm<sup>-3</sup> para las diferentes granulometrías evaluadas en su trabajo, los cuales fueron adecuados para la producción del cultivo.

La retención de humedad, tanto en columna como en contenedor, se incrementó por el reúso, debido a la redistribución del tamaño de partícula, a consecuencia del mayor porcentaje de partículas de tamaño inferior a 5 mm; también influyó en esta propiedad, la disminución de la densidad aparente en los materiales evaluados (Cuadro 21). Sin embargo, en la retención de humedad en contenedor (Cuadro 21) se presentaron diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); lo que se debió al aumento en la proporción de partículas finas (menores a 0.84 mm), incrementándose la superficie específica del material (T0: 4.78 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> y T2: 5.48 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), lo que le otorga mayor retención de humedad y con ello la disponibilidad del agua para el cultivo se ve mejorada (Vargas *et al.*, 2008). Cabrera (1999) establece que el sustrato deberá tener una porosidad total de por lo menos 70% con base en volumen; destaca, además, la importancia de conocer cómo la porosidad total está repartida entre el espacio ocupado por agua y aire; es la porosidad probablemente la propiedad física más importante de los sustratos empleados en cultivos ornamentales; ya que para el caso del tomate en la presente investigación el 56% de porosidad fue adecuado para su desarrollo y su producción. Acorde con este mismo autor, el valor mínimo recomendado de porosidad de aireación del sustrato es 10%, este porcentaje debe ajustarse de acuerdo a la tolerancia de las plantas a niveles bajos de aireación; el tomate puede desarrollarse favorablemente entre 10 y 15% en su porosidad de aireación de acuerdo con los resultados del presente trabajo y a lo reportado por diversos autores (Brady y Weil, 1999; Velasco *et al.*, 2004; Morgan, 2012 y Ojodeagua, 2008), condición que se mantuvo hasta el primer reúso (T1); para el segundo reúso (T2) su disminución (8%) implicó realizar un manejo del riego de acuerdo a las necesidades del cultivo evitando la saturación y la disminución en los niveles de aireación para la raíz.

**Cuadro 21. Características físicas del sustrato en su primer tamizado.**

Determinación	Tezontle 0 uso (T0)	Tezontle 1er. reúso (T1)	Tezontle 2do. reúso (T2)
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.92 a	0.91 a	0.81 b
Retención humedad (columna) (%)	40.67 a	41.66 a	45 a
Retención humedad (contenedor) (%)	43.10 c	45.69 b	48 a
Porosidad total (%)	55.5 a	55 a	56.5 a
Porosidad de aireación (%)	12.33 a	9.3 ab	8 b

Medias con distinta letra en la fila son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). La retención en columna se realizó en laboratorio y la de contenedor directamente en las bolsas.

### 5.1.1.2 Efecto del reúso del tezontle en la producción de tomate

**Peso de fruto.** Al comparar el peso promedio de fruto de los racimos por tratamiento, no se observó diferencia significativa entre los tratamientos en cada uno de los muestreos evaluados (Cuadro 22), aunque sí se apreció una disminución en el peso promedio final para el segundo reúso (T2) con 96.58 g; ya que en T2 el racimo 1 y racimo 2 fue menor que los demás influyendo en el peso promedio del tratamiento pero no reflejando diferencia estadística.

**Cuadro 22. Efecto del sustrato en el peso promedio de fruto.**

Tratamiento	Peso promedio por muestreo (g)					Promedio del Peso de fruto(g)
	Racimo 1	Racimo 2	Racimo 3	Racimo 4	Racimo 5	
Tezontle 0 uso (T0)	96.4	105.32	125.4	121.92	108.95	111.60 a
Tezontle 1er. reúso (T1)	103.57	105.57	121.17	124.65	111.37	113.47 a
Tezontle 2do. reúso (T2)	68.25	84.6	106.9	110.97	112.17	96.58 a

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

Los resultados concuerdan con los obtenidos por Ojodeagua *et al.* (2008), al evaluar el efecto de dos sustratos sobre la producción hortícola: suelo y tezontle con diferente granulometría. Los autores no detectaron diferencias significativas en la producción de tomate, el cual registró un peso promedio de 120 g fruto<sup>-1</sup>. Velasco *et al.* (2004), al comparar tres sustratos para la producción de tomate: arena de río, lama y cascajo, no registraron diferencias en el rendimiento del fruto. También hay concordancia con los resultados de Abad y Noguera (2000), quienes afirman que existen numerosos materiales que se pueden utilizar con éxito en la producción hortícola, ya que las características de los materiales que se utilicen como medio de cultivo son determinantes en el manejo de las plantas, tanto en el riego como en la nutrición vegetal, lo cual fue el principal motivo de este estudio, encontrando que es posible el reúso pero ajustando el manejo del cultivo a los cambios originados en el sustrato.

De acuerdo a Wolf y Rudich (1988) existe una relación entre la altura de la planta y el peso de frutos de tomate, ya que, según estos autores, a mayor altura el período de crecimiento del fruto se reduce por la mayor cantidad de racimos y por lo tanto a la mayor demanda de nutrimentos de los frutos superiores, lo que en el presente trabajo se reflejó para el tezontle de segundo reúso (T2), al tener un peso promedio de fruto de 96.6 g y una altura promedio de planta de 102.5 cm. Por otro lado, la reducción de la aireación en el sustrato originada por el reúso (de 12% a 8%) influye en la reducción de la asimilación de nutrimentos por parte de la planta (Morgan, 2012), y como puede

observarse en la columna del peso promedio de fruto (Cuadro 22), una tendencia a disminuir a partir del segundo reuso.

**Altura de planta y diámetro de tallo.** La altura de planta presentó una diferencia estadística entre T0 (153.9 cm) y T2 (190 cm), para la medición a los 71 ddt, la cual es adecuada para la producción hasta el quinto racimo (Cuadro 23). La altura de la planta que se consideró para fines de la investigación fue hasta la producción del quinto racimo; para fines comerciales, y con base en el precio de mercado, se puede manejar el cultivo hasta el racimo número 12 (Quintana *et al.*, 2010); en este sentido, y de acuerdo a Dogliotti (2012), la altura de la planta puede variar de acuerdo a su origen genético, manejo del cultivo a uno o dos tallos y a la nutrición aportada. Tucuch *et al.* (2011) mencionan que la variación de altura de planta y diámetro de tallo se deben a la composición granulométrica del sustrato.

**Cuadro 23. Efecto del sustrato en la altura de planta (cm) y diámetro de tallo (mm).**

Trata- miento	21 ddt		45 ddt		56 ddt		71 ddt	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
T0	15.97	4.4	93.18	7.3	113.81	9.2	153.93 b	9.5 a
T1	16.81	3.940	81.43	6.5	117.06	8.8	160.43 b	9.6 a
T2	22.75	4.240	94.83	8.4	102.43	8.0	190.00 a	9.2 b

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). ddt = días después del trasplante. T0=Tezontle 0 uso. T1=Tezontle 1er. Reuso. T2=Tezontle 2do. Reuso.

El crecimiento alcanzado por la planta se puede considerar normal de acuerdo al avance en su desarrollo. Sin embargo, la diferencia de altura de planta entre reusos se puede atribuir a que se cambió el manejo del cultivo entre un ciclo y otro, debido a las modificaciones en las características físicas del material que obligan a manejar el riego y la nutrición de la planta en función a la modificación que tuvo la retención de humedad y la aireación del sustrato entre tratamientos. A este respecto, Urbina *et al.* (2006) consignan que en un cultivo hidropónico de plántulas de tomate en zeolita y tezontle con diferentes granulometrías (fina, media y gruesa), se lograron plántulas de mayor tamaño.

A pesar de las diferencias estadísticas encontradas entre los tratamientos para el diámetro de tallo, la diferencia numérica no debiera considerarse trascendente desde el punto de vista fisiológico por ser tan solo de 0.4 mm (Cuadro 23), lo que no se reflejó en la producción. Es así como, al igual que con la altura de planta, el diámetro de tallo se puede modificar no solo por el tratamiento (reuso del tezontle), sino por otros factores que no fueron evaluados en esta investigación. Para el segundo reuso (T2), a

los 71 ddt el diámetro de tallo disminuyó (Cuadro 23) al tener una altura mayor (190 cm), infiriendo que se debe a la disminución del tamaño de partículas y la consecuente reducción en la proporción de aire en el sustrato, a diferencia de lo que reporta Urbina *et al.* (2006) en plántulas de tomate solo para el caso del diámetro, en donde el tezontle “grueso” (2.01-3.36 mm) fue el que presentó el menor valor de diámetro de tallo; siendo coincidentes sus resultados en la altura de planta con los de la presente investigación.

**Grados Brix.** Los grados Brix en frutos (Cuadro 24) no mostraron diferencias significativas entre muestreos ni entre sustratos en los ciclos de producción.

Los resultados coinciden con lo que expresan Bugarín *et al.* (2002), quienes evaluaron la producción de tomate en escoria volcánica basáltica negra (tezontle negro) como sustrato con una granulometría de 3 a 6 mm de diámetro; no detectaron diferencia significativa en los grados Brix en frutos de tomate.

**Cuadro 24. Efecto del sustrato en grados Brix de fruto.**

Tratamiento	Promedios por racimo					Grados Brix
	1er	2do	3er	4to	5to	
Tezontle 0 uso (T0)	4.10	4.2	4.05	4.07	4.04	4.09 a
Tezontle 1er. reuso (T1)	3.87	3.9	4.03	3.94	4.02	3.95 a
Tezontle 2do. reuso (T2)	4.55	3.7	4.45	4.35	4.22	4.25 a

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

Con base en los resultados del presente trabajo, se puede argumentar que el tezontle puede ser reutilizado dos veces después de su primer uso, sin que los cambios en los parámetros físicos que se generan en los materiales por el reuso, tengan efectos negativos en el desarrollo del cultivo y su producción. En la presente investigación surgió la evidencia de que después de un segundo reuso, en caso de pretender utilizar de nuevo el material como sustrato, éste deberá ser reacondicionado en la distribución del tamaño de partícula para lograr propiedades físicas adecuadas, especialmente con una aireación entre 10 y 15% y una retención de humedad de 45% aproximadamente, lo cual permitiría el establecimiento de un nuevo cultivo de tomate.

El tezontle se podrá usar en tres ciclos de cultivo de tomate con un manejo adecuado en el sistema de producción, contribuyendo de esta forma a la producción de hortalizas de manera sustentable, disminuyendo los costos de producción en lo que se refiere al uso de sustratos nuevos.

Considerando que para el cultivo de tomate con tezontle como sustrato, de manera convencional se reusa sólo una vez, por considerar el ahorro que esto representa, no se contemplan más reusos por que el material ya no reúne las propiedades físicas adecuadas para el buen desarrollo del cultivo, ni para lograr una producción comercial rentable; en este sentido, y como se ha demostrado en el presente trabajo, es posible un segundo reuso y con ello un mayor ahorro económico de los costos de producción; ya que el ahorro por reuso del sustrato, por hectárea de producción de tomate, es de \$161, 000 pesos (Cuadro 25). Además, es posible acortar los tiempos de producción entre ciclo y ciclo, ya que para los reusos la única práctica adicional requerida sería una desinfección al sustrato.

**Cuadro 25. Costos de tezontle y ahorro por reuso por hectárea.**

Concepto	Unidad	Costo (\$)	Cantidad	Costo Inicial (\$) (T0)	Ahorro 1er reuso (\$) (T1)	Ahorro 2do. reuso (\$) (T2)
Sustrato (calidad arena)	m <sup>3</sup>	600	432	259 200	129 600	129 600
Tamizado	Jornal	200	40	8000	4000	4000
Bolsas	Pza.	1.8	24 000	43 200	21 600	21 600
Llenado bolsas	Jornal	200	32	6400	3200	3200
Acomodo bolsas	Jornal	200	32	6400	3200	3200
<b>Total</b>				<b>323 200</b>	<b>161 600</b>	<b>161 600</b>

Nota. El costo inicial se refiere al primer ciclo de cultivo. Las columnas ahorro se refiere a lo que se dejaría de invertir al reutilizar el mismo sustrato para los dos ciclos siguientes.

### 5.1.2 Sustrato perlita

En los materiales evaluados se encontró que las características físicas de las variables medidas: densidad aparente, retención de humedad en columna, retención de humedad en contenedor, porosidad total y porosidad de aireación se vieron modificadas por efecto en la distribución del tamaño de partículas ocasionado por el reuso del sustrato. En el Cuadro 28 se observan las modificaciones mencionadas, principalmente en retención de humedad al pasar de 36.9 % en P0 a 50% en P2 y en porosidad de aireación al pasar de 34.1 % en P0 a 20 % en P2.

#### 5.1.2.1 Distribución del tamaño de partículas

La perlita presentó una modificación en sus dimensiones después del reuso, ya que en su uso inicial (P0) no presentaba partículas mayores de 6 mm y después de su primer reuso se aprecia un porcentaje de ellas, en cambio las partículas menores presentan una redistribución diferente (Cuadro 26).

En los Cuadros 26 y 27 se observa el comportamiento físico de los materiales utilizados como medio de cultivo después de tres ciclos de uso. En el Cuadro 26 se aprecia un incremento en la proporción de tamaño de partículas superiores a 5 mm de diámetro, así como en las ubicadas entre 3 y 4 mm y las inferiores a 2 mm. El incremento en el diámetro puede ser debido, según Martínez *et al.* (2006), a que las partículas se acomodaron con los granos vecinos formando macroporos, o como consecuencia de la inserción de las raíces en desarrollo dentro del sustrato que favorecieron la formación de agregados cementados de mayor tamaño denominándolos “canalículos”.

**Cuadro 26. Distribución del tamaño de partículas de perlita en tamices de 6 mm e inferiores. Primer tamizado.**

Tamiz	Perlita 0 uso (P0)		Perlita 1er. Reúso (P1)		Perlita 2do. Reúso (P2)		C.V. (%)
	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	
> 6 mm	0.00	0 Cf	7.67	1.12 Bf	5.00	1.69 Af	0.87
5 – 6 mm	32.00	3.34 Ce	48.50	7.08 Be	24.00	8.14 Ae	0.16
4 – 5 mm	188.00	19.62 Ac	128.37	18.74 Bc	50.00	16.95 Cc	0.06
3 – 4 mm	166.00	17.33 Cd	143.85	21.00 Bb	70.00	23.73 Ab	0.28
2 – 3 mm	228.00	23.80 Ab	106.03	15.48 Bd	34.00	11.53 Cd	0.05
< 2 mm	344.00	35.91 Ca	250.23	36.53 Ba	112.00	37.97 Aa	0.05
C.V. (%)		0.04		0.25		0.06	

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), las mayúsculas son las diferencias entre tratamientos (fila) y las minúsculas entre tamaño de tamiz (columna). C.V= Coeficiente de Variación.

Se le realizó un segundo tamizado para verificar la distribución de partículas finas. En el Cuadro 27 se observa que las partículas ubicadas entre 5 y 0.25 mm tuvieron un incremento en el diámetro, sin embargo las partículas inferiores a 0.25 mm tuvieron un decremento en el diámetro al pasar de 8.2% en P0 a 3.6% en P2, que de acuerdo a Martínez *et al.* (2006), puede ser consecuencia de las secreciones ácidas de las raíces y también observarse granos más finos posiblemente debido al efecto mecánico de raíces.

**Cuadro 27. Distribución del tamaño de partículas de perlita en tamices de 5 mm e inferiores. Segundo tamizado.**

Tamiz	Perlita 0 uso (P0)		Perlita 1er. Reúso (P1)		Perlita 2do. Reúso (P2)		C.V. (%)
	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	Volumen (cc)	%	
>5 mm	16	2.9 Ac	10	1.9 Be	9.5	1.9 Be	4.48
5-0.84 mm	425	78.3 Ba	400	76.2 Ca	398	80.8 Aa	0.12
0.84-0.42 mm	44	8.1 Cb	61	11.6 Ab	50	10.2 Bb	1.00
0.42-0.3 mm	9	1.7 Bd	15	2.9 Ad	12	2.4 ABd	4.28
0.3-0.25 mm	4	0.7 Be	6.5	1.2 Af	4.5	0.9 Bf	10.7
<0.25 mm	44.5	8.2 Ab	32.5	6.2 Bc	18.2	3.6 Cc	1.67
C.V. (%)		0.6		0.6		0.6	

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), las mayúsculas son las diferencias entre tratamientos (fila) y las minúsculas entre tamaño de tamiz (columna). C.V= Coeficiente de Variación.

El comportamiento de la granulometría para la perlita por efecto de los reúsos fue dinámico ya que para el primer reuso (P1) como se muestra en los resultados se observó una agregación de las partículas a manera de cementación a partir de la interacción de las vesículas entre una partícula y otra (Figura 10). Para el segundo reuso los resultados fueron reversibles, ya que como se mencionó anteriormente los agregados de las partículas derivados del primer reuso (P1) se desintegraron generando nuevamente la separación de partículas y una gran cantidad de finos derivados del proceso de desfragmentación ocasionado por la reacción ácida de las raíces y de su efecto mecánico entre las partículas de dichos agregados (Figuras 10 y 11).



Figura 10. Agregados de partículas de perlita formados en el primer reuso (P1) derivadas de P0.



Figura 11. Fragmentación de los agregados de perlita en el segundo reuso (P2).

Las características físicas de la perlita: densidad aparente, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación que influyen en el manejo del riego y la nutrición del cultivo, y las modificaciones que tuvieron por su uso y reuso se presentan en el Cuadro 28.

#### Cuadro 28. Características físicas de la perlita

Determinación	Perlita 0 uso (P0)	Perlita 1er. Reuso (P1)	Perlita 2do. Reuso (P2)
Densidad Aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.187 c	0.291 a	0.209 b
Retención humedad (columna) (%)	50.11 c	56.2 b	58 a
Retención humedad (contenedor) (%)	36.97 c	41.1 b	50 a
Porosidad Total (%)	66.10 c	67.8 b	70.0 a
Porosidad aireación (%)	34.10 b	39.6 a	20.0 c

Medias con distinta letra en la fila son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). La retención en columna se realizó en laboratorio y la de contenedor directamente en las bolsas.

En los Cuadros 26, 27 y 28 se observa las modificaciones que mostró la perlita con una tendencia a incrementar la densidad aparente y el tamaño de partículas con el reuso,

formándose partículas superiores a 6 mm e incrementando su porcentaje las que se encontraban en los tamices entre 5 y 0.84 mm, pero disminuyendo el tamaño de las inferiores a 0.3 mm. Esta modificación ocasionó un incremento en la retención de humedad, pero sin influir sustancialmente en el porcentaje de la capacidad de aireación; los resultados obtenidos en estos dos parámetros evaluados se deben a un aumento en la porosidad efectiva y una pérdida de porosidad intraparticular, logrando que se mantengan los valores de agua fácilmente disponible y la capacidad de aireación. Los resultados coinciden con lo reportado por Martínez *et al.* (2006) y Astiz, *et al.* (2010). En relación al potencial de aireación de un sustrato, Cabrera (1999) sostiene que el valor mínimo para este parámetro se ubica en 10%; por otro lado, de acuerdo a lo reportado por diversos autores, el tomate puede desarrollarse favorablemente en sustratos con 10 y 15% en su porosidad de aireación (Brady y Weil, 1999; Velasco *et al.*, 2004; Morgan, 2012 y Ojodeagua, 2008).

### 5.1.2.2 Efecto del reuso de la perlita en la producción de tomate

**Peso de fruto.** En el Cuadro 29 se observa que la perlita utilizada como sustrato en los tres ciclos si influyó estadísticamente en el peso promedio de los frutos para el segundo reuso (P2), manteniéndose uniforme en el primer uso (P0) y en el primer reuso (P1).

**Cuadro 29. Efecto del sustrato en el peso promedio de fruto.**

Tratamiento	Peso promedio por muestreo (g)					Promedio del Peso de fruto(g)
	Racimo 1	Racimo 2	Racimo 3	Racimo 4	Racimo 5	
Perlita 0 uso (P0)	98.8	104.1	121.9	119.15	107.8	110.35 a
Perlita 1er. reuso (P1)	100.4	109.8	115.8	114.8	112.3	111.6 a
Perlita 2do. reuso (P2)	62.15	70.1	101.1	89.4	80.0	80.55 b

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

De la misma forma, como se observó en el tezontle, existe una relación entre la altura de la planta y el peso de frutos de tomate, ya que acuerdo a Wolf y Rudich (1988) indican que a mayor altura el período de crecimiento del fruto se reduce por la mayor cantidad de racimos formados y por lo tanto a la mayor demanda de nutrientes de los frutos superiores, lo que en el presente trabajo se reflejó en la perlita de segundo reuso (P2) al promediar el peso de fruto 80.55 g con una altura de planta al quinto racimo de 175.3 cm.

## Altura de planta y diámetro de tallo

La altura de planta presenta una diferencia estadística entre P1 (148.3 cm) y P2 (175.3 cm) para la medición a los 71 ddt, altura de planta al quinto racimo de producción (Cuadro 30).

**Cuadro 30. Efecto del sustrato en la altura de planta (cm) y diámetro de tallo (mm).**

Tratamiento	21 ddt		45 ddt		56 ddt		71 ddt	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
P0	15.7	4.53	76.87	6.19	110.18	7.34	155.87 b	7.65 a
P1	14.91	3.83	72.95	5.21	105.19	6.35	148.3 b	6.65 b
P2	20.97	3.64	87.5	7.32	94.75	6.9	175.3 a	7.95 a

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

P0=Perlita 0 uso. P1=Perlita 1er. reúso. P2=Perlita 2do. Reúso.

Dogliotti (2012) especifica que la altura de la planta puede variar de acuerdo a su genética, manejo del cultivo a uno o dos tallos y a la nutrición aportada. Del mismo modo Tucuch *et al.* (2011) mencionan que la variación de altura de planta y diámetro de tallo se deben a la composición granulométrica del sustrato.

## Grados Brix

El Cuadro 31 muestra que los sustratos utilizados no influyeron estadísticamente en la concentración de sólidos solubles totales (°B), los valores se encuentran dentro de los rangos considerados normales; sin embargo, se puede observar una disminución en la concentración promedio de °Brix al pasar en P0 de 3.98 °B a 3.38 °B en P2.

**Cuadro 31. Efecto del sustrato en grados Brix de fruto.**

Tratamiento	Promedios por racimo					Grados Brix (promedios)
	1er	2do	3er	4to	5to	
Perlita 0 uso (P0)	3.69	3.8	4.1	4.1	4.2	3.98 a
Perlita 1er. reúso (P1)	3.4	3.5	3.7	3.5	3.6	3.55 a
Perlita 2do. reúso (P2)	3.4	3.3	3.4	3.5	3.3	3.38 a

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

Casierra y Aguilar (2008), en su investigación sobre la “Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez”, reportan un rango de 3 a 5° Brix en tres variedades de tomate evaluadas, por lo que, los resultados obtenidos en la presente investigación pueden considerarse aceptables.

Por otro lado, Fortes *et al.* (2013) reportan que en la “Evaluación del riego deficitario controlado sobre la calidad y la producción en las distintas fases fenológicas del cultivo de tomate para industria”, una restricción del riego en la última fase del cultivo supone un aumento en la concentración de °Brix; situación que no se presentó en esta investigación al manejar el riego en función de las modificaciones físicas debido al uso y reúso del sustrato y no someter a estrés al cultivo.

La perlita conserva algunas características físicas en cuanto a la retención de humedad y la capacidad de aireación, sin embargo en los parámetros evaluados y de respuesta de la planta por efecto del uso y reúso, aunque no existen diferencias significativas en altura de planta, diámetro de tallo peso de fruto y grados Brix; para el segundo reúso el peso de fruto en todos los racimos evaluados tiende a ser menor en comparación con el tezontle; por tal motivo, para el caso de la perlita, se recomienda un uso y un reúso para la producción de tomate bajo el sistema hidropónico, lo que representará un ahorro por hectárea de \$ 151,120 pesos en un reúso (Cuadro 32).

**Cuadro 32. Costos de perlita y ahorro por reúso por hectárea.**

Concepto	Unidad	Costo (\$)	Cantidad	Costo Inicial (\$) (P0)	Ahorro 1er reúso (\$) (P1)
Sustrato	m <sup>3</sup>	570	432	246 240	123 120
Bolsas	Pza.	1.8	24 000	43 200	21 600
Llenado bolsas	Jornal	200	32	6400	3200
Acomodo bolsas	Jornal	200	32	6400	3200
<b>Total</b>				<b>302 240</b>	<b>151 120</b>

Nota. El costo inicial se refiere al primer ciclo de cultivo. Las columnas ahorro se refiere a lo que se dejaría de invertir al reutilizar el mismo sustrato para los dos ciclos siguientes

## 5.2 Contenido de potasio en hoja

El contenido de potasio en hoja para los diferentes sustratos evaluados y la influencia del uso y reúso de los mismos se observan en el Cuadro 33, donde se aprecia que el tezontle en comparación con la perlita supera los contenidos de potasio en hoja; pero al comparar la influencia de los reúsos en ambos sustratos, el segundo reúso (T2 y P2) influye en los contenidos de potasio.

**Cuadro 33. Contenido de Potasio en hoja (%) por tipo de sustrato y racimo.**

Racimo	Tezontle			Perlita		
	0 Uso (T0)	1er. Reúso (T1)	2do. Reúso (T2)	0 Uso (P0)	1er. Reúso (P1)	2do. Reúso (P2)
1er	1.5093 a	1.7623 a	SD	1.1262 b	1.3042 c	SD
3er	1.8096 b	1.9164 a	2.9275 a	1.4696 c	1.5434 c	2.3149 b
5to	1.6450 a	1.6912 a	2.9155 a	1.6394 a	1.6675 a	2.1773 c

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). SD: Sin datos.

Benton *et al.* (1991) establecen que los contenidos de potasio en las hojas varían de 1 a 5% y los contenidos en el rango de suficiencia en hojas recientemente maduras se encuentran entre 1.5 y 3%. Por su parte Cambell (2000) indica que el rango de suficiencia en hojas maduras de tomate producido bajo invernadero oscila entre 3.5 y 4.5%. Cabe hacer la aclaración que en la presente investigación la toma de muestra de hoja se realizó al inicio de la maduración de los frutos, lo que puede influir en la concentración de potasio, sin embargo los contenidos se encuentran dentro de los rangos establecidos por diferentes autores.

Comparando la concentración de grados °Brix por la influencia de los sustratos evaluados (Cuadros 24 y 31), se observa que las características físicas del tezontle influyen más en ese parámetro que la perlita, siendo coincidente con los contenidos de potasio que son determinantes en los sólidos solubles totales en los frutos de las plantas.

Por otro lado, dando importancia a la función del potasio en las plantas, es de aceptarse que interviene en la síntesis de carbohidratos, importante en la materia prima que permite formar varios compuestos químicos de la planta que contienen cadenas de carbonos. El rendimiento y la calidad de las cosechas están influenciados por este mineral al ser uno de los elementos nutrimentales que está ligado en la producción de la materia seca. El tamaño de los frutos, la coloración, serosidad, sabor y peso es determinante por los aportes de potasio (Melgar *et al.*, 2012).

El mal manejo del agua y el aporte de nitrógeno origina en la planta susceptibilidad al acame, a las enfermedades y ataque de insectos, así como daños ambientales. Para estas situaciones involucrar al potasio en la fertilización le da mayor resistencia a las plantas a diferentes factores adversos. En varios casos la aplicación de potasio (en cualquiera de sus formas: fertirriego, foliar o al piso) en las fases intermedias y de desarrollo de frutos y otros órganos le da un buen tamaño, peso y calidad a los mismos (Melgar *et al.*, 2012).

## 6. CONCLUSIONES

En el tezontle la redistribución del tamaño de partículas finas originadas por el reúso, sólo influyó en un aumento en la capacidad de retención de humedad y en una disminución de la capacidad de aireación sin afectar las variables agronómicas y de producción del cultivo. Por otra parte, para el caso de la perlita, se conservaron algunas características físicas como la retención de humedad y la capacidad de aireación.

En el caso del tezontle tienden a disminuir las características físicas, tales como la densidad aparente y la capacidad de aireación, debido a la redistribución del tamaño de partículas. Sin embargo, la capacidad de retención de agua se incrementa y la porosidad total se conserva, aunque estos cambios no influyen significativamente en las variables de producción de la planta. En cambio, con la perlita se incrementa la densidad aparente, la capacidad de retención de humedad y la porosidad total (esta última considerablemente), mientras que disminuye la capacidad de aireación. Estos cambios para el segundo reúso fueron influyentes en los grados Brix y en el peso del fruto.

Al comparar los sustratos evaluados y los cambios físicos originados por el uso y reúso, el tezontle presenta una influencia mayor que la perlita en la concentración de potasio en hoja, no obstante, al comparar los reúsos, el segundo reúso de tezontle (T2) es más influyente en la proporción de potasio en hoja que el segundo reúso de perlita (P2), sin embargo en ambos sustratos los segundos reúsos (T2 y P2) son determinantes en el incremento en el contenido de potasio.

En la perlita, los parámetros físicos evaluados y de respuesta de la planta por efecto del uso y reúso sí influyeron de manera importante; para el segundo reúso el peso de fruto mostró una disminución estadística significativa, no así para los grados Brix.

Existen diferencias en los cambios físicos de los materiales evaluados, sin embargo, el tezontle, en comparación con la perlita, presenta cualidades que permiten usarlo por tres ciclos consecutivos (primer uso y dos reúsos), dado que los cambios en sus características físicas no fueron influyentes en la respuesta de la planta. En cambio, la perlita conserva características que permiten usarla solo por dos ciclos consecutivos (un uso y un reúso), ya que los cambios en las características físicas del segundo reúso influyeron en una disminución del peso de fruto y la concentración de grados Brix de

todos los racimos evaluados; lo que le da al tezontle la ventaja de un ahorro económico en los costos de producción del cultivo de tomate hidropónico.

En lo que se refiere al impacto económico, derivado del reúso de los sustratos evaluados (tezontle y perlita) se logró un ahorro en los costos de producción del cultivo de tomate hidropónico. Con base en los resultados obtenidos el tezontle puede utilizarse durante tres ciclos (un uso y dos reúsos) en comparación con la perlita que solo permite dos ciclos de producción consecutivos (un uso y un reúso), sin que se vean afectadas las variables productivas.

## 7. LITERATURA CITADA

- Abad M, 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. *En*: F. Nuez (Coord.). El Cultivo del Tomate. Mundi Prensa, Madrid. pp. 131-166
- Abad M, Noguera P, 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *En*: C Cadahía (Coord.). Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Mundi Prensa, Madrid. pp. 287- 342.
- Abad, M. y Noguera, M. 2000. Los sustratos en cultivos sin suelo, En manual de cultivos sin suelo. Urrestarazu Gavilan, M. (ed). Mundi-Prensa. Almería, España. pp 137-182.
- Abad B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *En*: Tratado de cultivo sin suelo. Urrestarazu G. M. Mundi Prensa. Madrid, España. pp. 113-158.
- Abad B. M., P. Noguera M. y C. Camón B. 2005. Sustratos en los cultivos sin suelo y fertirrigación. *En*: Fertirrigación cultivos hortícolas y ornamentales. C. Cadahía (coord.). Mundi Prensa. Madrid, España pp 299-352.
- Alcántar, G. G. y Trejo, T. L. 2007. Nutrición de Cultivos. Mundi Prensa. México. pp. 233-236.
- AMPHAC. 2010. Informe 2010. Asociación Mexicana de Horticultura Protegida, A.C.
- Anicua S., R., M. C. Gutiérrez C., P. Sánchez G., C. Ortiz S., V. H. Volke H. y J. E. Rubiños P. 2009. Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agric. Téc. Méx.* 35: 147-156.
- Ansorena M., J. 1994. Sustratos: Propiedades y Caracterización. Mundi Prensa. Madrid, España. 172 p.
- Astiz M., Del Castillo J., Uribarri A, Aguado G., Apesteguía M., Sádaba S. 2010. Navarra Agraria. España.
- Baixauli S. C y Aguilar O. J. M. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Generelatita Valenciana, Conselleria D'Agricultura, Peixca I Alimentació. España.
- Beeson, R. C. Jr. 1996. Composted yard as a component of container substrates. *Journal Environmental Horticulture.* 14: 115-121.
- Benton J. Jr., B. Wolf and H. A. Mills 1991. Plant Analysis Handbook. A practical, sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Pub., Inc. USA.
- Benoit and Ceustermans, 1995. Horticultural aspects of ecological soilless growing methods. *ISHS Acta Horticulturae* 396.
- Biran, I., and A. Eliassaf. 1980. The effect of container and aeration conditions on growth of roots and canopy of woody plants. *Scientia Horticulturae* 12: 385-394.

- Brady, N. C. and Weil, R.R. 1999. The nature and Properties of Soils. 12 Edition. Prentice Hall, New Jersey. USA. T
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container. Grow plants. Unwin Hyman. London. Great Britain. 309 p.
- Bugarín M. R., Galvis S. A., Sánchez S. P. y García P. D. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladett. Terra. Núm 20 (3). México. pp 91-399.
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container. Grow plants. Unwin Hyman. London. Great Britain. 309 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ed. Aerotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- Burés, S. 1998. Introducción a los sustratos. Aspectos generales, en: Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística, ornamental, hortícola y forestal. J. Narciso Pastor S. Ed. Universitat de Lleida. pp:19-31.
- Cabrera R. I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. Revista Chapingo Serie Horticultura 5(1): 5-11.
- Cabrera R. I. 2004. Aspectos a considerar en la nutrición mineral de las plantas a través del fertirriego. Memorias Seminario Internacional de Fertirriego. Bogotá, Colombia. pp. 9-15.
- Cadahia L. C. 1998. Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pag. 289-296.
- Cadahía L. C. 2005. Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Madrid, España. Mundi-Prensa. 681 pp.
- Calderón S. F. 2001. Los Sustratos. Colombia.  
[http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los\\_Sustratos.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm). Consultado 8 Mayo 2013.
- Cambell, C. R. 2000. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin #394. 79 p. USA.
- Cantliffe, D. 1998. Seed germination for transplants. Hort Technology 8 (4): 499-510.
- Cánovas M. F. 1992. III Jornadas Nacionales Iberoamericanas de cultivos protegidos. FIAPA. Almería, España.
- Carvajal J. F. 1978. El diagnóstico del estado nutrimental de los cultivos. Agronomía Costarricense 2(2):175-183.
- Casierra, P. F. y Aguilar, A. O. 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. Agronomía Colombiana. 26(2). pp. 300-307.
- Chong, C. and R. A. Cline 1993. Response of four ornamental shrubs to container substrate amended whit tow sources of raw paper mili sludge. HortScience 28: 807-809.

- Claassen V.P. y Carey J.L. 2004. Regeneration of nitrogen fertility in disturbed soils using composts. *Compost Sci. & Util* 12(2): 145-152.
- COTEC. 2009. Invernaderos de plástico. Fundación COTEC para la innovación tecnológica. Madrid, España. pp 12-13.
- Cruz, C. E.; Sandoval, V. M.; Volke, H. V. H.; Can, Ch. A. y Sánchez, E. J. 2012. Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(7):1361-1373.
- Díaz S. F. R. 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero. Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción Torreón, Coah, México.
- De Boodt, M.; Verdonck, O y Cappaert, I. 1974. Determination and study of water availability of substrates of ornamental plant growing. *Acta Hortic*. 35:51-58.
- Dogliotti S. 2012. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Universidad de la República – Facultad de Agronomía. Ciclo de Formación Central Agronómica. Curso de Fisiología de los Cultivos. Uruguay.
- FAO - SAGARPA. 2007. Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas. México. 33 pp
- Fortes, R.; Prieto M. H.; González, J. A. y Campillo, C. 2013. Evaluación del riego deficitario controlado sobre la calidad y la producción en las distintas fases fenológicas del cultivo de tomate para industria. Memorias de Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid, España. pp 6.
- Gallardo, C. (s/f). Sustratos para plantas, tipos y principales características. En: Proyecto de investigación y desarrollo – PID-UNER-2067. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.
- García, V. N.; Van der Valk O. y Elings, O. 2011. Mexican protected horticulture. Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. Rapport GTB-1126. 31p.
- Gislerød, H. R. 1997. Effect of aeration on rooting and growth of roses. *Acta Horticulturae* 450: 113-122.
- González E. D.R., Alcalde B. S., Ortiz C. J. y Castillo M. A. 2000. Dinámica de la acumulación de potasio por trigo cultivado en diferentes ambientes. *Agrociencia* 34. Colegio de Posgraduados. pp 1-11
- Hartmann, H. y Kester, D. 2002. Plant propagation. Principles and practices. Prentice Hall. New Jersey. 880 p.
- Heeb A, Lundegardh B, Ericsson T, Savage PG. 2005. Nitrogen from affects yield taste of tomatoes. *J. Food Sci. Agric*. 85: 1405–1414.
- Hitchon, G. M., D.A. Hall, R. A. K. Szmidt, 1990. Hydroponic production of glasshouse tomatoes in Sardinian Plaster-grade perlite. *Acta Horticulturae* 287: 261-266.

Juárez H.M. J. 1995. Influencia de diferentes sustratos en la concentración de N, P, K en plantas de fresa (*Fragaria amantilla*) bajo hidroponía. Memorias del VI Congreso de Horticultura. Hermosillo, Sonora.

Juárez R., Rodríguez M., Sandoval V. y Muratalla L. 2007. Comparación de tres sistemas de producción de fresa en invernadero. Revista Terra Latinoamericana. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo. 25(1). México.

Lara H. A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. Terra Latinoamericana 17(3).

Lavado, R. S.; Mazzarino, M. J. 2005. Fertilización de forestales. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Echeverría, H. y F. O. García (editores) INPOFOS-INTA Balcarce, Pcia. Bs. Aires.445-454.

Lazcan F. 2000. El potasio para un buen rendimiento en la caña de azúcar. Instituto de la Potasa y el Fósforo, A.C.

Lemaire F.; Dartigues A.; Riviere, L.M. and Charpentier, S. 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA – PHM Revue Horticole, París-Limoges. 184 pp.

López P. L., Cárdenas N. R., Lobit P., Martínez C. O. y Escalante L.O. 2005. Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. Fitotecnia Mexicana. 28(2). Sociedad Mexicana de Fitogenética. Chapingo, A.C. México. pp 171-174.

Luna G. C. L. 2004. Evaluación de diferentes concentraciones de nitrógeno y potasio en solución hidropónica en tomate *Lycopersicon esculentum*, híbrido Dominique, en condiciones de invernadero, Bárcena, Villanueva. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos. Guatemala. 85 pp.

Luque, A. 1981. Physical and physicalchemical properties of the volcanic materials used in hydroponics. Acta Horticulturae 126: 51-57.

Magdaleno V. J.J; A. Peña-Lomelí; R. Castro B. R.; A. M. Castillo G. M.; A. Galvis S. A.; F. Ramírez P. F. y P. A. Becerra L. P.A. 2006. Efecto de tres sustratos y dos colores de plástico en el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Revista Chapingo. Serie horticultura. México. pp 153-158.

Márquez H. C.; Cano R. P.; Rodríguez D. M. 2008. Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. Agricultura Técnica de México. 34(1).

Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. San Diego, Calif.

Martínez D A.; Landin A.M.; Svartz H.; Vence L.; Bottini L.; Mascarini L.; Orden S. y Vilella F. 2006. Propiedades Físicas e Hidráulicas de Perlita en Cultivos de Rosas y sus Variaciones Temporales. Scientific Electronic Library Online. Argentina.

Melgar, R.; Magen, H. y Imas, P. 2012. El rol del Potasio en la Producción Agrícola. International Plant Nutrition Institute. International Potash Institute. pp 72.

Mojarro V. J. y Moreno D. C. 1995. Chile jalapeño (*Capsicum annum* L.) en cultivo hidropónico y diferentes sustratos autóctonos bajo condiciones de invernadero. Tesis de Licenciatura Ing. Agrónomo. Universidad de Guadalajara.

Molina E. A. 2000. Fertilización Foliar: Principios y Aplicaciones. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Laboratorio de Suelos y Foliars del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Costa Rica. pp 92.

Montero, S.M.; Singh, B.K.; Taylor, R. 2006. Evaluación de seis estructuras de producción hidropónica diversificada en el trópico húmedo de Costa Rica. *Tierra Tropical* 2 (1): 27-37

Morgan, L. 2012. La importancia del oxígeno en hidroponía. <http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/boletin11.htm>. Consultado 18/08/2013

Ojodeagua, A. J. L.; Castellanos, R. J. Z.; Muñoz, R. J. J.; Alcantar, G. G.; Tijerina, Ch. L.; Vargas T. P. y Enríquez, R. S. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Fitotécnia Mexicana* Vol. 31(34): 367-374.

Ortega M. D. 2010. Efecto de los sustratos en el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) bajo condiciones de invernadero. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados. México. pp 116

Pastor S. J. N. 1999. Utilización de sustratos en vivero. *Revista Terra Latinoamericana*. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo. 17(3). México. pp 231-235.

Pizarro F. 1986. Riegos localizados de alta frecuencia. Goteo, Microaspersión y Exudación. Mundi Prensa. España. Pp 373-385.

Porcelli C. y Porcelli O. 2004. Características de los sustratos y problemas en los planes de fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. II Congreso Nacional de Floricultura y Plantas Ornamentales y VI Jornadas Nacionales de Floricultura. Buenos Aires, Argentina.

Quintana, B. R; Balguera, L. H.; Alvarez, H. J. G.; Cárdenas, H. J. y Hernando, P. E. 2010. Efecto del número de racimos por planta sobre el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 4(2):199-208.

Quirino H. S., Sánchez C. F, Peña L. y Montalvo H. D. 2005. Sustratos y frecuencias de riego para la producción de jitomate en hileras a diferente altura. *Terra Latinoamericana*. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo. 23(3). México.

Raviv M, Chen Y, Geler Z, Medina S, Putievski E, Inbar Y, 1984. Slurry produced by methanogenic fermentation of cow manure as a growth medium for some horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 150: 563-573.

Raviv M. R., Wallach A. Silber and A. Bar-Tal 2002. Substrates end their analysis. p 25-101. In: D. Savvas and H. Passam (eds). *Hydroponic production of vegetable and ornamental*. Embryo Publications. Athens Greece.

Resh M. H. 1992. Cultivos hidropónicos, nuevas técnicas de producción. Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Rodríguez D. E. 2004. La caracterización física de los sustratos. Memorias Seminario Internacional de Fertirriego. Bogotá, Colombia. pp 18-21.
- Rodríguez, S.A. 1992. Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT editor. Segunda reimpresión. México, D.F
- Rodríguez, M. R.; Alcántar, G. E. G.; Iñiguez, C.G.; Zamora N. F.; García L. P. M.; Ruiz L. M. A. y Salcedo P. E. 2010. Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia*, 35(7). pp. 515-520 Asociación Interciencia. Venezuela.
- Rojas G. M. 1981. Fisiología vegetal aplicada. Ed. McGraw-Hill. 2da. Edición. pp. 108-118.
- Rosen J., C. and Bierman M., P. 2005. Using manure and compost as nutrient sources for vegetable crops. University of Minnesota, Extension Service. 12 p.
- SAS. 1990. SAS Institute, Inc (Cary, NC).
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCyT). 2010. Inventario de Bancos de Materiales. Bancos 2010. México. 15 p.
- Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2010. Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP). Estadísticas por estado. SAGARPA. México. URL: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2012. México. URL: <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>. 2012.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15: 134- 154.
- Steiner, A. A. 1968. Soilless culture. Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute. Florence, Italy. pp: 325-341.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-650. In: Proceedings 6th International Congress on Soilles Culture. Wageningen. The Netherlands.
- Swya Kant y Uzi Kafkafi (S/f). La absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. International Potash Institute.
- Terés, V. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Vegetal, Fitotécnia.
- Tripepi, R. R. George, A. G. Cambell and B. Shafi 1996. Evaluation pulp and peper sludge as a substrate for comparison in container media. *Journal Environmental Horticulture* 14: 91-96.
- Tucuch, H. C. J.; Alcantar, G. G.; Ordaz, C. V. M.; Santizo, R. J. A. y Larquee, S. A. 2011. Producción y calidad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) con diferentes

- relaciones  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  y tamaño de partícula de sustratos. *Terra Latinoamericana* 30: 9-15.
- Urbina S.E., Baca C. G. A., Núñez E. R., Colinas L. M. T., Tijerina Ch. L. y Tirado T. J. L. 2006. Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargada con  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  y diferente granulometría. *Agrociencia* Julio/Agosto año/vol 40, núm. 4. Colegio de Posgraduados. Pp 419-429.
- Urrestarazu, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. 3ª ed. Madrid. Mundi-Prensa. pp 914.
- Villanueva R. E., Sánchez G. P., Rodríguez M. N., Villanueva N. E., Ortiz M. E., Gutiérrez E. J. A. 1998. Efecto de reguladores de crecimiento y tipo de sustrato en el enraizamiento de *Kalanchoe*. *Revista Terra Latinoamericana*. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo. 16(1). México. pp 33-41.
- Vargas T. P., Zaragoza C.R., Muñoz J.J., Sánchez G. P., Tijerina C. L., López R.R.M., Martínez S. C. y Ojodeagua A. J.L. 2008. *Agricultura Técnica en México* 34 (3): 323-331.
- Velasco H. E.; Miranda V. I.; Nieto A. R. y Villegas R. H. 2004. Evaluación de sustratos y variedades en la producción protegida de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 10(2): 239-246.
- Verdonk, O. F.; De Vleeschauwer, D.; De Boodt, M. 1981. The influence of the substrate to plant growth. *Acta Horticulturae* 126: 251-258.
- Villegas T. O. G.; Rodríguez M. M.N.; Trejo T. L. I.; Alcántar G. G. 2001. Potencial de la miel de abeja en la nutrición de plántulas de tomate. *Terra Latinoamericana*. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo. 19 (1): 97-102.
- Wallach R. F. F. da Silva and Y. Chen. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society Horticultural Science* 117:415-421.
- Willumsen, J. 1997. Improvement of the physical conditions in peat substrates during the germination of cabbage seeds in organic farming (refereed). *Acta Horticulture* 450: 183-190.
- Wolf, S. y Rudich, J. 1988. The growth rates of fruits on different parts of tomato plants and the effect of water stress on dry weight accumulation. *Science Horticulturae* 34: 1-11
- Yañez, R. J. N. 2002. Nutrición y regulación del crecimiento en hortalizas y frutales. *Tecnología, Comercio y Servicios Agrícolas Mundiales*. Saltillo, Coahuila. pp 13.

## 8. APÉNDICE

**Cuadro A1.** Resultados de la calidad del agua de riego (Pozo profundo). Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

DETERMINACIONES	METODO	RESULTADO
pH	Potenciómetro	7.42
C.E. Micromhos $\text{cm}^{-1}$ 25°C	Conductímetro	270
C.E. Milimhos/cm 25°C	Conductímetro	0.270
Cationes:		
Calcio ( $\text{meq L}^{-1}$ )	EDTA	1.50
Magnesio ( $\text{meq L}^{-1}$ )	EDTA	0.50
Sodio ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Flamometría	2.00
Potasio ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Flamometría	0.26
Relación de Adsorción de Sodio (%)	Nomograma	2.00
Porcentaje de Sodio Intercambiable (%)	Nomograma	1.60
Aniones:		
Cloruros ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Mhor-Argentome	1.00
Sulfatos ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Calculado	1.30
Carbonatos ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Warder-Fonolfta	0.00
Bicarbonatos ( $\text{meq L}^{-1}$ )	War. Anar. De met	3.50
Carbonato de sodio residual ( $\text{meq L}^{-1}$ )	Calculado	2.00
Boro (ppm)	Colorimetría	0.00
Clasificación del agua para riego		C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>

Laboratorio Agrología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara.

**Cuadro A2. Coeficiente de Uniformidad del Sistema de Riego.**

Nº Gotero	Gasto L hr <sup>-1</sup>	$X_i - \bar{x}$	$(X_i - \bar{x})^2$
1	2.00	0.0015	0.0000
2	2.10	0.1015	0.0103
3	1.96	-0.0385	0.0015
4	1.97	-0.0285	0.0008
5	2.00	0.0015	0.0000
6	1.96	-0.0385	0.0015
7	2.00	0.0015	0.0000
8	2.00	0.0015	0.0000
9	1.96	-0.0385	0.0015
10	2.00	0.0015	0.0000
11	2.10	0.1015	0.0103
12	1.97	-0.0285	0.0008
13	1.96	-0.0385	0.0015
<b>Suma</b>	<b>25.98</b>		<b>0.0282</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.00</b>		
<b>q mínimo =</b>	<b>1.96</b>		
<b>Desviación estandar =</b>			<b>0.0485</b>
<b>Coeficiente de Variación CV =</b>			<b>0.0242</b>
<b>Coeficiente Uniformidad EU =</b>			<b>95.06</b>