



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**EVALUACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES PARA INCREMENTAR LA  
CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE HUMEDAD EN SUSTRATO ARENOSO**

**TESIS PROFESIONAL**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**PRESENTA**  
**CARLOS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**  
**M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ**

**San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre 2016.**



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES PARA INCREMENTAR LA  
CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE HUMEDAD EN SUSTRATO ARENOSO

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

CARLOS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ

ASESORES

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

DR. SIGFRIDO DAVID MORALES FERNÁNDEZ

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre 2016

La presente tesis titulada: **"EVALUACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE HUMEDAD EN SUSTRATO ARENOSO"** realizada por: **Carlos Rodríguez Rodríguez**, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

Consejo particular integrado por:

Firma

Director: M.C. Fabiel Vázquez Cruz \_\_\_\_\_

Asesor: M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín \_\_\_\_\_

Asesor: Dr. Sigfrido David Morales Fernández \_\_\_\_\_

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Diciembre 2016

El presente trabajo forma parte del grupo de investigación denominado: **Innovación y transferencia de tecnología en el uso del agua** y de la línea de investigación: **Manejo sustentable del agua**. Dicho trabajo, fue financiado por: **La dirección de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica (2016-2017), y con recursos propios.**

## DEDICATORIA

**A Dios y mi virgen de Guadalupe y Santa Ana:** Por darme salud y bienestar y una extraordinaria familia, amigos, compañeros, maestros que me han ayudado a crecer personal y profesional, que de alguna u otra manera formaron parte en la realización de este sueño, gracias.

**A mis padres:** Sr. Agustín Rodríguez Carillo y Sra. Guillermina Rodríguez Romero, ustedes son el motor en mi vida gracias por todo, no pude tener mejores padres que a ustedes.

**A mis hermanos:** Yolanda Rodríguez Rodríguez y Gabriel Rodríguez Rodríguez, en especial a ti hermana mascabrother.

**A mis amigos y compañeros:** Dulce Patricia Briones Aranda (Patito), Eduardo Ramírez Palafox (oyamelitos), Víctor Rodríguez García (vick), Misael Martínez Bolaños (oax), por su amistad, confianza, trabajar en equipo con ustedes fue increíble.

**A ti cielo:** porque de alguna u otra forma eres parte de este sueño, por tus palabras consejos, tiempo que tuviste para mí y darme ánimos para seguir adelante.

## AGRADECIMIENTOS

**A dios:** por darme vida, salud y bienestar y una gran familia.

**A mis padres:** Sr. Agustín Rodríguez Carillo y Sra. Guillermina Rodríguez Romero, solo ustedes saben los sacrificios que tuvieron que hacer para que yo pudiera estudiar, las preocupaciones que pasaron, gracias por su apoyo incondicional por hacer de este sueño una realidad, por no dejarme vencer ante cualquier circunstancia, gracias.

**A la dirección y personal docente de la Facultad de ingeniería Agrohidráulica:** Por el apoyo económico para lograr este trabajo, a los maestros que contribuyeron con sus conocimientos para mi formación como profesional.

**Al M.C. Fabiel Vázquez Cruz:** Por la confianza, tiempo y dedicación, así como su aportación de sus conocimientos como director de este trabajo gracias.

**Al M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín:** Por compartirme sus conocimientos y tiempo para la revisión y realización de este trabajo.

**Al Dr. Sigfrido David Morales Fernández:** Por compartirme sus conocimientos y tiempo para la revisión y realización de este trabajo.

**A la Ing. Elizabeth Aguilar Hernández:** Por su apoyo y consejos para que yo pudiera formar parte de esta facultad.

**A la empresa CONFETEX:** Por su apoyo material de los desechos industriales (lodo, piedra pómez).

**A la central hidroeléctrica ATEXCACO:** Por habernos proporcionado la arena para la realización de este trabajo.

---

## ÍNDICE GENERAL

---

Contenido	Pág.
<b>NDICE DE CUADROS</b> .....	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRAC</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
<b>III. HIPÓTESIS</b> .....	<b>4</b>
<b>IV. REVISION DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
4.1. Sustratos .....	5
4.2.1. Definición de sustratos.....	5
4.2.2. Características de los sustratos.....	5
4.2.3. Propiedades de los sustratos.....	5
4.2.3.1. Retención de humedad en sustratos .....	7
4.2.3.2. Granulometría .....	7
4.2.3.3. Densidad de sustratos .....	8
4.2.3.4. Porosidad .....	8
4.2.3.5. El pH en sustratos .....	9
4.2.3.6. Capacidad de intercambio catiónico del sustrato	10
4.2.3.7. Capacidad de campo del sustrato .....	11
4.2.3.8. Punto de marchitez permanente del sustrato .....	11

4.2.3.9. Capacidad de campo del sustrato a tensión de columna de agua .....	11
4.2.3.10. Conductividad hidráulica .....	12
4.3. Tipos de sustratos .....	13
4.3.1. Arena.....	15
4.3.2. Desechos industriales.....	15
4.3.3. Piedra pómez.....	17
4.3.4. Lodo industrial.....	17
4.4. Antecedentes de investigación sobre sustratos. ....	17
4.4.1. Arena.....	17
4.4.2. Piedra pómez.....	18
4.4.3. Lodos industriales.....	18
4.4.4. Temperatura.....	19
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
5.1 Área experimental .....	21
5.2. Material de experimentación .....	22
5.2.2. Selección.....	22
5.3. Trabajo de laboratorio .....	25
5.4. Trabajo en invernadero .....	26
5.4.1. Preparación de los Tratamientos.....	26
5.4.1.1. Diseño experimental y distribución de los tratamientos .....	27
5.4.2. Evaluación de retención de humedad.....	28
5.4.3. Registro de temperatura.....	30
5.5. Variables a evaluar .....	31
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>

6.1. Características químicas .....	32
6.2. Características físicas .....	33
6.3. Curva de retención de humedad (CC Y PMP) de cada tratamiento .....	34
6.4. Peso de las macetas de los tratamientos (variación de la humedad a través del tiempo). .....	37
6.5. Determinación de la temperatura diaria del invernadero.	40
<b>VII. CONCLUSION .....</b>	<b>42</b>
<b>VIII. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>43</b>

---

## INDICE DE CUADROS

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Características de un sustrato ideal.....	6
Cuadro 2. Disponibilidad de agua en sustratos a diferentes tenciones (cm columna de agua).....	7
Cuadro 3. Recomendaciones de granulometría para sustratos.....	8
Cuadro 4. Términos empleados para describir soluciones de diferentes valores de pH.....	10
Cuadro 5. Niveles de capacidad de intercambio catiónico.....	11
Cuadro 6. Conductividad Hidráulica para suelos saturados, (Soil Service Staff, 1981).....	13
Cuadro 7. Granulometría del sustrato de arena.....	15
Cuadro 8. Clasificación de residuos.....	16
Cuadro 9. Características de sustratos.....	20
Cuadro 10. Descripción de tratamientos a evaluar.....	27
Cuadro 11. Distribución de tratamientos en bloques.....	27
Cuadro 12. Características químicas de los sustratos preparados.....	33
Cuadro 13. Características Físicas de los sustratos preparados	34
Cuadro 14. Peso seco y húmedo de los tratamientos y su comportamiento con respecto al tiempo en la primera evaluación. ....	38
Cuadro 15. Pérdida de humedad diariamente %.....	40

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de un sustrato.....	9
Figura 2. Curva de calibración de agua de un sustrato (De Boodt et al. 1974).....	12
Figura 3. Localización del área de estudio e invernadero tipo túnel.....	21
Figura 4. Materiales para mezclas de sustratos, a) Residuos de arena de la hidroeléctrica, b) Piedra pómez de desecho textil c) Lodo de desecho textil.....	23
Figura 5. Preparación de material, a) Tamizado, b) Adición de cloro, c) Secado a la sombra.....	24
Figura 6. Preparación de la piedra pómez, a) Secado de la piedra pómez, b) Trituración del pómez, c) Tamizado.....	24
Figura 7. Preparación del lodo, a) Secado de muestras en estufa, b) Eliminación de residuos ajenos al lodo.....	25
Figura 8. Invernadero tipo túnel.....	26
Figura 9. Distribución de tratamientos en invernadero.....	28
Figura 10. Bascula digital.....	29
Figura 11. Peso de macetas.....	30
Figura 12. Curva de retención de humedad de la arena y del tratamiento 1.....	34
Figura 13. Curva de retención de humedad de la arena y el tratamiento 5.....	35
Figura 14. Curva de retención de humedad de la arena y Lodo...	36
Figura 15. Curva de retención de humedad de la arena y arena más lodo.....	36
Figura 16. Curva de retención de humedad de la arena y arena más piedra pómez.....	37
Figura 17. Comportamiento de la humedad a través del tiempo..	39

---

## RESUMEN

Los materiales de desecho industrial como lo son la piedra pómez, lodo y arena, fueron mezclados en distintas medidas a sustratos de arena, con el objetivo de medir la capacidad de retención de humedad de las mezclas y evaluar el uso de lodo industriales en la elaboración de sustratos para uso agrícola. Con diferentes porcentajes, en base a volumen tales como piedra pómez y lodo (33, 50 y 100%) se adicionaron a la arena con la misma proporción. En la fase inicial del experimento se evaluó la retención la retención de humedad de los sustratos; en la siguiente fase se midió el comportamiento de la humedad a través del tiempo. Los resultados muestran que el contenido de humedad aumenta debido al incremento de porosidad producida por las partículas, el mayor contenido de humedad fue de (41%), después de agregar agua se obtuvo en el sustrato de lodo con un volumen de 100%, así también una pérdida de humedad de 3.1 % en promedio diariamente, que es menor a la que pierde diariamente la arena (4.1%). Los desechos industriales pueden ser utilizados en la elaboración de sustratos para incrementar la retención de humedad de forma económica y de adquisición sencilla.

**Palabras clave:** curva, porosidad, porcentaje, capacidad de campo.

## **ABSTRAC**

The materials of industrial waste like it are the pumice, mud and sand were mixed in different proportions to substrata of sand, with the aim to measure the capacity of retention of dampness of the mixtures and to evaluate the use of mud manufacturers in the production of substrata for agricultural use. With different percentages, on the basis of volume such as pumice and mud (33, 50 and 100 %) they were added to the sand by the same proportion. In the first part of the experiment there was evaluated the retention of dampness of the substrata; in the second part the behavior of the dampness measured up across the time. The results show that the content of dampness increases due to the increase of porosity produced by the particles, the major content of dampness was of (41 %), after adding water was obtained in the substratum of mud by a volume of 100 %, this way also a loss of dampness of 3.1 % in I divide equally every day, that is minor to the one that loses every day the sand (4.1 %). The industrial waste can be used in the production of substrata to increase the retention of dampness with low cost and easy obtaining.

## I. INTRODUCCIÓN

Un factor crucial en la producción bajo invernadero es el sustrato empleado para el desarrollo de la planta (Cruz *et al.* 2012), el sustrato es el material que permite un óptimo desarrollo de las plantas (SAGARPA, 2009). Pueden ser de productos orgánicos, inorgánicos y sintéticos (FAO, 2002). Los materiales de origen natural (inorgánicos) más utilizados son arena, grava, piedra pómez, turba, arcilla expandida, perlita, vermiculita, carbón; o desechos industriales procesados como la cascarilla de arroz, cascara de coco, cascara de café, lana de roca espumas fenólicas (Calderón y Cevallos, 2002). Las principales funciones son: retención de humedad y su aportación a la planta; retención de nutrientes y su aportación a la planta para actuar como amortiguador de las reacciones químicas que se desarrollan (Acosta, 2004). La retención de humedad es una cualidad crucial en todo tipo de sustrato (Bures, 2002). Cabrera, (1998) menciona que el volumen de agua total disponible para la planta sea por lo menos 30% del volumen total del sustrato.

La concepción del uso de los sustratos cambió, por lo que hay otros factores a considerar al seleccionar un material como sustrato, tal como agua, suelo y reciclaje de materiales de desecho (Cruz, 2012). Salazar (2014), Indica que, para generar el doble de alimentos necesario en los próximos 30 años, la agricultura deberá mejorar significativamente la eficiencia en la utilización del agua, especialmente en México, donde la disponibilidad de agua es limitada. El sustrato de cultivo debe de estar compuesto por materiales distintos del suelo *in situ* en los que se cultivan plantas Abad *et al.* (2004).

Los desechos industriales como la piedra pómez lavada con agua puede ser utilizada en la elaboración de sustratos por su capacidad de retención de humedad y de liberación del agua que el material pomáceo confiere al sustrato y puede ayudar a hacer un uso eficiente del agua (Segura, 2008). Por su parte Narváez, (2014) sugiere utilizar lodos textiles industriales en sustratos en donde la parte comestible del vegetal no se encuentre en contacto directo con el sustrato o bien en cultivos ornamentales. Moinereau *et al.* (1987), mencionan que la arena es un material que se puede encontrar en todos los ambientes. Estos sustratos pueden ser obtenidos de materiales regionales lo cual representa grandes ventajas como son La accesibilidad y costos más bajos, especialmente de origen orgánico, debido a la creciente tendencia hacia prácticas de producción con enfoque sostenible (Porter y Humtpert, 2000).

Por todo lo anterior la presente investigación se enfocó a la obtención de un sustrato que pueda cumplir algunos de los aspectos importantes como lo es alta retención de humedad para hacer el uso eficiente del agua y reciclaje de materiales desde el punto de vista ambiental, usando mezclas de diferentes materiales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la capacidad de retención de humedad en diferentes mezclas de sustratos de arena y desechos textiles.

**II.****OBJETIVOS****2.1. Objetivo general**

- Evaluar la capacidad de retención de humedad de los sustratos utilizando diferentes cantidades de arena y desechos textiles tales como la piedra pómez y el lodo.

**2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la curva de retención de humedad (capacidad de campo y punto de marchitez permanentes), de los diferentes tratamientos.
- Determinar parámetros químicos (pH, Capacidad de intercambio catiónico y conductividad hidráulica) de diferentes tratamientos.
- Determinar los parámetros físicos (Densidad aparente, porosidad total) de los tratamientos.
- Determinar la factibilidad de la piedra pómez en la elaboración de sustratos para hacer un uso eficiente del agua.
- Evaluar la viabilidad del uso de lodos textiles en sustratos con el fin de utilizar los desechos industriales.

### **III. HIPÓTESIS**

El contenido de humedad a través del tiempo en la mezcla arena más piedra pómez al 50%, es mayor que en la mezcla del resto de los sustratos con 33 y 100%.

## IV. REVISION DE LITERATURA

### 4.1. Sustratos

#### 4.2.1. Definición de sustratos

Los sustratos, definidos como aquellos materiales distintos del suelo in situ empleados para el cultivo de plantas en contenedores, están compuestos por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Dentro de una serie de aspectos esenciales que caracterizan estas fases, se destacan la densidad del sustrato (DS), el tamaño y forma de las partículas, el espacio que ocupan los poros en el volumen total del sustrato, la capacidad de los poros de retener agua y la de liberar y conducir agua desde la trama porosa hacia la raíz, intercambio gaseoso, los que indefectiblemente actúan sobre el crecimiento de las plantas (Raviv, 2002).

#### 4.2.2. Características de los sustratos

La textura del sustrato debe posibilitar el flujo de aire, siendo óptimo que permita un 15-35 % de aire y un 20-60 % de agua en relación con el volumen total. Además, es deseable que sea fácil de mezclar, libre de malezas y fácilmente desinfectable, y que tenga un costo reducido. Químicamente inertes: arena, grava perlita, lana de roca (minerales) y químicamente activos: turba, vermiculita, corteza de pinos y otros orgánicos (Álvarez, 2011).

#### 4.2.3. Propiedades de los sustratos

Entre las propiedades de los sustratos consideradas generalmente las de mayor importancia se encuentran las mecánicas y las físico-químicas.

a) Propiedades mecánicas. En cuanto a las propiedades mecánicas de los sustratos, Son perfectas cuando conservan su estructura

estable a lo largo del tiempo, su formación no es ni cortante ni pesada, y no se descompone fácilmente.

b) Propiedades físico-químicas. Las propiedades físicas tienen relación con la capacidad líquida y gaseosa del sustrato, así como su composición y la reacción a las sales minerales; y se refieren fundamentalmente a su grado de granulometría y su porosidad, las cuales deben permitir oxigenación, circulación y retención de agua fácilmente disponible, además debe facilitar el manejo apropiado del riego (Samperio, 2004).

Las características de un sustrato son el resultado de sus propias propiedades físicas (Cuadro 1), estas dependerán de la estructura de los componentes y están determinadas por la relación entre partículas de diferentes tamaños, la configuración de los poros y los volúmenes proporcionales de agua y aire que ocupan dichos poros (FAO, 2002).

**Cuadro 1. Características de un sustrato ideal.**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad aparente	0.22 gcm <sup>-2</sup>
Densidad real	1.44 gcm <sup>-2</sup>
Espacio poroso total	85 %
Fase sólida	10-15 %
Contenido de aire	20-30 %
Agua fácilmente disponible	20-30 %
Agua de reserva	6-10 %
pH	5.5-6.5
Capacidad de intercambio catiónico	10-30 meq/100 g peso seco
Contenido de sales solubles	200 ppm (2mS cm <sup>-1</sup> )

Fuente: FAO, 2002.

#### 4.2.3.1. Retención de humedad en sustratos

Desde una perspectiva física, los sustratos nos ofrecen dos propiedades clave para su aplicación en el cultivo en macetas: en primer lugar, una notable capacidad para retener agua a bajas tensiones de 0-100 cm de columna de agua (Cuadro 2); al mismo tiempo, presentan una destacada capacidad de aireación. la curva de liberación de agua, similar a la curva característica de humedad empleada en edafología, genera una terminología específica en el contexto de los sustratos. (Bures, 2002).

**Cuadro 2. Disponibilidad de agua en sustratos a diferentes tensiones (cm columna de agua).**

<b>Agua</b>	<b>Tensiones columna de agua</b>
<b>Agua fácilmente</b>	Es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 10 y 50 cm de tensión en columna de agua sobre el sustrato.
<b>Agua de reserva</b>	Es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 y 100 cm de columna de agua de tensión sobre el sustrato.
<b>Agua disponible</b>	Es el agua en tanto por ciento en volumen que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm.

Fuente: Bures, 2002.

#### 4.2.3.2. Granulometría

Las partículas de cualquier componente orgánico e inorgánico, los niveles considerados apropiados para la fabricación de sustratos deben ubicarse entre 0.5 y 4 mm (Cuadro 3), y con

menos del 20% presente en partículas más finas que 0.5 mm (Bunt, 1988).

**Cuadro 3. Recomendaciones de granulometría para sustratos.**

<b>Diámetro de la partícula (mm)</b>	<b>Proporción deseada 8 (% con base en peso )</b>
< 0.5	< 20
0.5 - 2	> 60 (100 % ideal )
2 - 10	< 20

Fuente: Bunt, (1988).

#### **4.2.3.3. Densidad de sustratos**

La densidad de un sustrato se puede referir a la del material sólido que lo compone (densidad real), o bien a la densidad calculada considerando el espacio total ocupada por los componentes sólidos más el espacio poroso, y se denomina densidad aparente.

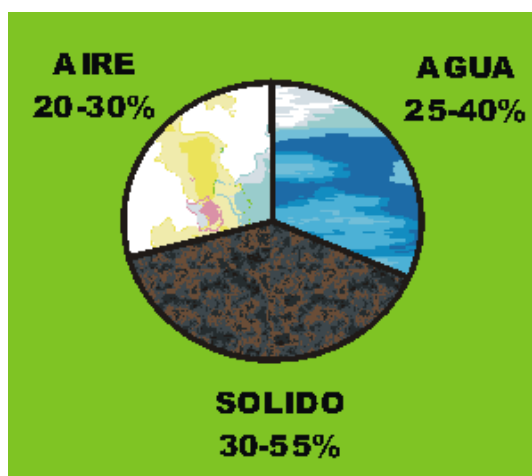
La relevancia de la densidad real es relativa, ya que su valor fluctúa dependiendo del material en cuestión, generalmente oscilando entre 2.5 y 3 para la mayoría de los sustratos de origen mineral. Por otro lado, la densidad aparente proporciona una indicación indirecta de la porosidad del sustrato, así como de su facilidad de transporte y manejo. Se prefieren valores bajos que aseguren cierta consistencia en la estructura del sustrato (Bárbado, 2009).

#### **4.2.3.4. Porosidad**

Pastor, (1999) menciona que la porosidad total es el volumen total del sustrato de cultivo que no está ocupado por partículas orgánicas o minerales. Es un dato que se determina a partir de las densidades real y aparente, su valor óptimo se produce cuando alcanza niveles superiores a 85 %, y una

capacidad de aireación la cual se refiere a la proporción de aire en el volumen del sustrato después de que este ha sido saturado y drenado (generalmente a 10 cm de columna de agua). El valor óptimo se encuentra en el rango del 10 al 30%.

Un sustrato excesivamente fino se vuelve compacto, en especial cuando está húmedo e impide el paso del aire, los sustratos deben permitir la presencia del 15 al 35 % de aire y del 20 al 60 % de agua en relación al volumen total (Calderón y Cevallos, 2002), (Figura 1).



**Figura 1. Esquema de un sustrato.**

#### **4.2.3.5. El pH en sustratos**

El pH es una medida de la concentración de iones  $H^+$ , en solución acuosa y por tanto de su carácter ácido o básico: en lugar de  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$  o  $10^{-8}$ , se expresa la concentración de iones  $H^+$ , diciendo que el pH es 7 (neutro), 6 (ácido) u 8 (básico) respectivamente (Cuadro 4). El pH es uno de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar un sustrato, ya que de acuerdo con Ansorena (1994), su valor dependerá:

1. La posible presencia de compuestos de aluminio o magnesio que son tóxicos para las raíces de las plantas y limitan su crecimiento.

2. La asimilación de nutrientes minerales, ya que su disponibilidad para las raíces de la planta depende en gran medida del pH.
3. La cantidad de nutrientes retenidos como reserva en el complejo de cambio, ya que la capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica aumenta mucho con el pH.

**Cuadro 4. Términos empleados para describir soluciones de diferentes valores de pH.**

pH	Denominación
Inferior a 4,0	Extremadamente ácido
4,0 a 5,0	Muy fuertemente ácido
5,0 a 5,5	Fuertemente ácido
5,5 a 6,0	Moderadamente ácido
6,0 a 6,7	Ligeramente ácido
6,7 a 7,3	Rango neutro
7	Neutro
7,3 a 8,0	Débilmente alcalino
8,0 a 8,5	Moderadamente alcalino
8,5 a 9,0	Fuertemente alcalino
9,0 a 10,0	Muy fuertemente alcalino
Superior a 10,0	Extremadamente alcalino

Fuente: Ansorena (1994).

#### **4.2.3.6. Capacidad de intercambio catiónico del sustrato**

Se define como la suma de los cationes que pueden ser absorbidos por unidad de peso (o volumen) del sustrato. Estos cationes están disponibles para la planta y no son lixiviados por efecto del riego (Terés, 2001). Martínez y García (1993), sugieren que los sustratos destinados al cultivo hidropónico de hortalizas deberían tener una capacidad de intercambio catiónico muy baja o nula. En otras palabras, se busca que sean químicamente inertes con el fin de facilitar un control nutricional más preciso de la planta. En el Cuadro 5, se

muestra los valores para la interpretación de la capacidad de intercambio catiónico para suelos agrícolas (Abad *et al.* 2001).

**Cuadro 5. Niveles de capacidad de intercambio catiónico.**

<b>CIC (meq. 100g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Nivel</b>
≤ 5	Muy bajo
5-10	Bajo
10-20	Medio
20-30	Elevado
≥ 30	Muy elevado

Fuente: Abad *et al.* (2001). CIC: capacidad de intercambio catiónico.

#### **4.2.3.7. Capacidad de campo del sustrato**

El término más conocido para definir esta capacidad es el de "Capacidad de contenedor", que es la cantidad total de agua que persiste en el sustrato posterior al riego y drenaje del agua gravitacional (Bures, 1997).

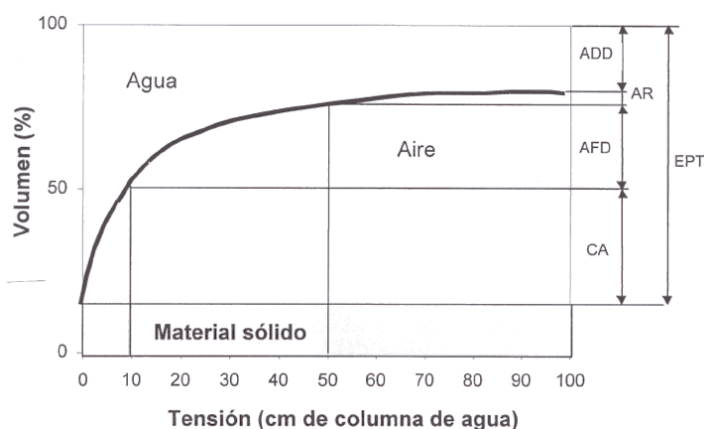
#### **4.2.3.8. Punto de marchitez permanente del sustrato**

Se refiere al nivel de humedad en el suelo alrededor de la zona de raíces de la vegetación. En este estado, las fuerzas de succión de las raíces son inferiores a las fuerzas de retención del agua por el suelo, específicamente las fuerzas capilares de los poros más pequeños. Cuando la planta no puede satisfacer completamente su demanda de agua, se llega al punto de marchitez temporal. Si la planta ya no puede absorber agua del suelo, se alcanza el punto de marchitez permanente (Udelar *et al.* 2009).

#### **4.2.3.9. Capacidad de campo del sustrato a tensión de columna de agua**

De Boodt *et al.* (1974) propusieron la curva de liberación de agua para suelos al estudio de los sustratos; marcando que los puntos de mayor interés de la curva son los que corresponden a

las bajas tensiones, se estableció el rango de los valores de tensiones entre 0 - 10 kPa ya que el agua en un contenedor debe estar disponible para las raíces a las más bajas tensiones posibles. Definieron el punto cero de tensión como el máximo contenido de humedad (saturación) cuyo valor coincide con la porosidad total (PT). La capacidad de aireación (CA) es el volumen de aire del sustrato sometido a una tensión de (10 cm de columna de agua = kPa), agua fácilmente disponible (AFD), se encuentra entre 10 - 50 cm de columna de agua = 1 y 5 kPa, y agua de reserva el volumen de agua liberada a tensiones entre 5 - 10 kPa, agua difícilmente disponible (100 cm de columna de agua) es el agua que se encuentra retenida en el sustrato y la planta no la puede extraer (Figura 2).



**Figura 2. Curva de calibración de agua de un sustrato (De Boodt et al. 1974).**

#### **4.2.3.10. Conductividad hidráulica**

La Conductividad Hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. El movimiento del agua en el suelo se controla por dos factores: la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua, y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de

agua del suelo. La ley de Darcy, la ecuación fundamental que describe el movimiento de agua en el suelo, relaciona la proporción de flujo con estos dos factores. El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo es el cero (Donado, 2004).

Calderón y Cevallos (2002), describe que la velocidad de infiltración ( $lt/dm^2/h$ ) y la conductividad hidráulica juegan un papel importante que nos permiten estimar la longitud del recorrido que puede llegar a realizar el agua por dentro del sustrato antes de alcanzar el drenaje (Cuadro 6).

**Cuadro 6. Conductividad Hidráulica para suelos saturados, (Soil Service Staff, 1981).**

<b>Conductividad Hidráulica; cm/h</b>	<b>Interpretación</b>
< 0.1	Muy Lenta
0.1 - 0.5	Lenta
0.6 - 2.0	Moderadamente Lenta
2.1 - 6.0	Moderada
6.1 - 13	Moderadamente rápida
13.1 - 25	Rápida
> 25	Muy rápida

Fuente: Calderón y Cevallos (2002).

#### **4.3. Tipos de sustratos**

Los criterios para clasificar los sustratos, se basan en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación (Zarate, 2007).

##### 1. Materiales orgánicos

Natural: Son materiales que están sujetos a descomposición biológica, como solo es la tierra de monte.

Sintéticos: Polímeros orgánicos biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química como la espuma de polímero y poliestireno, espuma de resinas fenólicas.

Residuos y subproductos de diferente actividad de producción y consumo: Los materiales de este requieren una previa maduración o estabilización de su materia orgánica para poder ser adecuados como sustrato, por ejemplo, la corteza de árboles, aserrín, viruta de madera, residuos urbanos, lodos de plantas depuradoras de aguas negras, estiércoles, cascarillas de arroz, paja de cereales, polvo de coco, etc. (Bures, 1997).

## 2. Materiales inorgánicos

De origen natural: estos materiales se obtienen a partir de diversas rocas o minerales (ya sean ígneos, metamórficos o sedimentarios) y no son biodegradables. Ejemplos de estos incluyen arena, grava, roca volcánica (piedra pómez) y zeolita. Por otro lado, los materiales transformados o procesados industrialmente son aquellos que provienen de rocas o minerales y han experimentado cambios químicos o físicos con el propósito de obtener fibras o gránulos más livianos y altamente porosos. Algunos ejemplos de estos son perlita, lana de roca, vermiculita y arcillas expandidas (Hitchon *et al.*, 1990).

Residuos o subproductos industriales: Son materiales provenientes de diversas actividades industriales, residuos de procesos de combustión, desechos de minerías, escorias de hornos, escorias de carbón, (Bures, 1997).

#### 4.3.1. Arena

La arena deberá lavarse para dejarlo libre del limo más fino y arcilla, debe de estar libre de partículas mayores de 1/16 pulgadas (2 mm) de diámetro o menores de 1/40 de pulgadas (0.6mm). Una arena para el cultivo cernida propiamente deberá drenar con facilidad y no embarrarse fácilmente después de un riego con gran cantidad de agua (Howard, 2001).

Calderón y Cevallos, (2002) mencionan que al considerar a la arena de río como sustrato, esta debe tener un contenido mínimo (casi nulo), de arcillas que traigan problemas de fijación iónica, además de que su contenido en carbonato de calcio debe ser inferior al 20 %, en cuanto a su granulometría deberá estar en un rango de 0.5 y 2 mm y de acuerdo con su tamaño estas se clasifican (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Granulometría del sustrato de arena.**

<b>Categoría</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Contenido deseable (%)</b>
Gravilla	> 2	0
Arena Muy Gruesa	1 - 2	0 - 5
Arena Gruesa	0.5 - 1.0	70 - 80
Arena Media	0.25 - 0.5	70 - 80
Arena Fina	0.1 - 0.25	0 - 20
Arena muy Fina	0.05 - 0.1	0 - 2
Limo y Arcilla	< 0.05	0

Fuente: Calderón y Cevallos (2002).

#### 4.3.2. Desechos industriales

Los recursos del planeta, tanto renovables como no renovables, están siendo agotados o alterando irreversiblemente el medio ambiente. Esto se debe al aumento de la población y al

desarrollo económico, que generan residuos que ocupan valiosas superficies de tierra y contaminan el aire y el suelo. Un aspecto preocupante en el ámbito medioambiental, vinculado a la industria textil, es el elevado consumo de agua necesario para llevar a cabo los procesos de acabado. Esto resulta en aguas residuales con una alta carga contaminante derivada del uso de diversos productos auxiliares, colorantes y el lavado de fibras textiles (Cuadro 6), igualmente otros parámetros como son los residuos sólidos propios de las textiles (Resitex, 2007).

**Cuadro 8. Clasificación de residuos.**

<b>Clasificación</b>	<b>Residuo</b>
Residuo no peligros de envase y embalaje	Residuos de embalaje de papel Residuos de embalaje de plástico Residuos de embalaje de madera Residuos de embalaje metálicos
Residuos no peligrosos	Residuos textiles Lodos de depuración textil Toners de impresión
Residuos peligrosos	Grasas y trapos impregnados de aceite Aceites usados Tubos fluorescentes Fugas accidentales sobre sustratos de sepiolita Trapos textiles contaminados con químicos Residuos disolventes

Fuente: Resitex, (2007).

### **4.3.3. Piedra pómez**

Es una roca porosa, grisácea o blancuzca, frágil y de bajo peso específico, procedente de magma volcánico reciente; está compuesta por cuarzo y silicatos (principalmente feldespatos). Se encuentra pura o mezclada con varias sustancias, sobre todo obsidiana, que se distingue por su color negro brillante (Osindky *et al.* 2003).

La piedra pómez es utilizada en el lavado de la mezclilla (Jeans) y desgastada, el lavado a la piedra consiste en poner en contacto una prenda de vestir o el tejido dentro de un equipo de cuba con piedras pómez cuyo tamaño de partículas está entre 25,4 mm a 254 mm, durante un período suficiente, las piedras pómez abrasan el tejido, generando un color más claro en las áreas expuestas a la abrasión, incluyendo las costuras. Además, la piedra pómez suaviza el tejido y crea una superficie decolorada similar al aspecto producido por el uso prolongado del tejido (Enciso, 2014).

### **4.3.4. Lodo industrial**

La fabricación de los diferentes productos textiles se lleva a cabo utilizando procesos de limpiado, lanzado, estirado, acabado y teñido, entre otros, como resultado de estas actividades se generan aguas residuales que contienen fenoles, sulfuros, cromo y colorantes. Esto últimos constituyen uno de los contaminantes más visibles a causa de su color, siendo además algunos de ellos de difícil degradación (Garcés y Peñuela, 2007).

## **4.4. Antecedentes de investigación sobre sustratos.**

### **4.4.1. Arena.**

Galindo *et al.* (2014) obtuvieron como resultado en sus análisis de los parámetros químicos en sustrato de arena más una

solución Steiner una conductividad eléctrica en la arena de  $1.98 \text{ ds m}^{-1}$  y un pH inicial de 7.5.

Pire y Pereira, (2003) encontraron en el análisis de las propiedades físicas de diferentes sustratos que la arena fina tiene una porosidad total del 37.3 %, una retención de humedad del 32.6 %, la densidad aparente de  $1.458 \text{ Mg m}^{-3}$ .

#### **4.4.2. Piedra pómez**

Estudios realizados por Segura *et al.* (2008) encontraron que la piedra pómez de desecho industrial lavada con agua puede ser utilizada en la elaboración de sustratos para incrementar la retención de humedad, además de que una mezcla de arena con 30 % de pómez en base a volumen, tiene una retención de humedad inicial del 44.40 % siendo la humedad fácilmente disponible de 56 %, mientras que el porcentaje de humedad que se pierde a través del tiempo es de 2.46.

El desarrollo de la planta de tomate hasta su etapa de floración, no se ve afectado al utilizar un sustrato compuesto por 70 % de arena y un 30 % de piedra pómez de desecho industrial (tamaño de 2.38 a 3.35 mm de diámetro) así mismo este no presenta elementos contaminantes que influyan en el desarrollo de las plantas, por lo cual el sustrato se puede utilizar sin ningún problema como sustrato en la producción de cultivos (Segura *et al.* 2011).

García *et al.* (2001) obtuvieron como resultado en la medición de las características físicas de diferentes sustratos evaluados al inicio de su experimento, una densidad aparente de  $0.32 \text{ g ml}^{-1}$ , y una porosidad total de 66.6 %, en piedra pómez.

#### **4.4.3. Lodos industriales.**

Narváez, (2014) sugiere utilizar lodos textiles industriales en cultivos en donde la parte comestible no se encuentre en

contacto directo con el sustrato o bien en cultivos ornamentales o para la producción industrial de fibras.

Bautista *et al.* (2015) indicaron en sus resultados de análisis físico-químico de salinidad y sodicidad de lodos, que este tiene una textura franco arcillosa, con una densidad aparente de  $0.74 \text{ g cm}^{-1}$ , una retención de humedad a capacidad de campo de 30.45 % así mismo indicaron que la conductividad eléctrica de sus lodos fue alta  $11.03 \text{ ds m}^{-1}$  y un pH alcalino 7.6.

Narváez *et al.* (2013) registraron en sus análisis físicos de lodos textiles una densidad aparente de  $1.052 \text{ g cm}^{-1}$  una porosidad del 58 % con una textura franco arcilloso, en sus parámetros químicos la conductividad eléctrica fue extremadamente alta de  $20.8 \text{ ms cm}^{-1}$  y un pH 8.4 alcalino.

#### **4.4.4. Temperatura**

La variación de la precipitación y temperatura en el municipio de Teziutlán, Puebla del año 1979 al 2008, indica que la temperatura promedio máxima oscila entre  $24^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$ , y que durante la primavera esta oscila entre los  $28^{\circ}\text{C}$  y  $29.6^{\circ}\text{C}$ , posteriormente en las estaciones restantes la temperatura varía de  $24^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  (Villegas *et al.* 2004).

Hernández, (2015) reportó en su trabajo aplicación de dosis de fertilización de lixiviados de raquitis de plátano en chile manzano, realizado bajo invernadero en las instalaciones de la facultad de ingeniería Agrohídrico, temperaturas promedio 19.9 a  $21.5^{\circ}\text{C}$ .

Calderón y Ceballos, (2002) mencionan que un sustrato hidropónico debe reunir un conjunto de características que lo hagan apto para el cultivo, y no siempre un sustrato reúne todas las características deseables (Cuadro 9).

**Cuadro 9. Características de sustratos.**

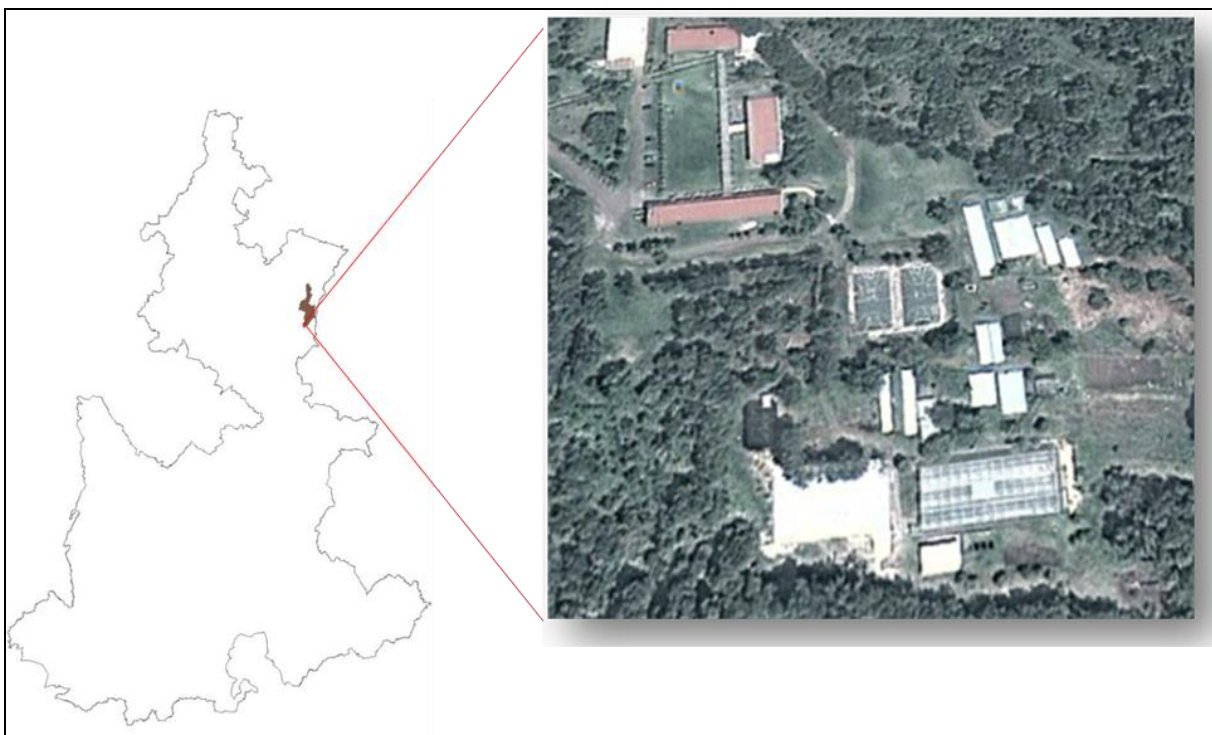
<b>Sustrato</b>	<b>Da (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Pt: (%vol)</b>	<b>CA (%)</b>	<b>AFD (%vol)</b>	<b>AR; (%vol)</b>	<b>ADD; (%vol)</b>
Arena de Río	1.4 - 1.60	38-42	5-20	15-35	1-2	0.1-0.5
Arena de Peña	1.5 - 2.0	25-35	1-15	10-20	2-5	0.1-0.5
Grava	1.6 - 2.0	40	36	2	1	0.1-0.5
Piedra Pómez	0.6 - 0.8	75	40-55	20-40	5-8	2-5

Fuente: Calderón y Ceballos, (2002). Da: Densidad aparente, Pt: Porosidad total, CA: Capacidad de aireación, AFD: Agua Fácilmente Disponible, AR: Agua Reserva, ADD: Agua Difícilmente Disponible.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área experimental

El presente estudio se realizó en un invernadero (tipo túnel) de 5 m de ancho por 6 m de largo y una altura de 2,5 m de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ubicado en la comunidad de San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla (Figura 3), cuyas coordenadas geográficas son Longitud:  $19^{\circ} 52'$  y  $19^{\circ} 53'$  de Latitud Norte  $97^{\circ} 22'$  y  $97^{\circ} 22'$  de Longitud Oeste, se encuentra a una altura de 1600 metros sobre el nivel del mar con una precipitación fluvial anual de 1100-1500 mm, temperaturas máximas de  $25^{\circ} \text{C}$  y mínimas de  $24^{\circ} \text{C}$  (INEGI, 2000).



**Figura 3. Localización del área de estudio e invernadero tipo túnel.**

El trabajo de investigación se dividió en tres etapas: la primera etapa consistió en la selección del material de

experimentación, la segunda fue el análisis en laboratorio y por último, el trabajo en invernadero.

## **5.2. Material de experimentación**

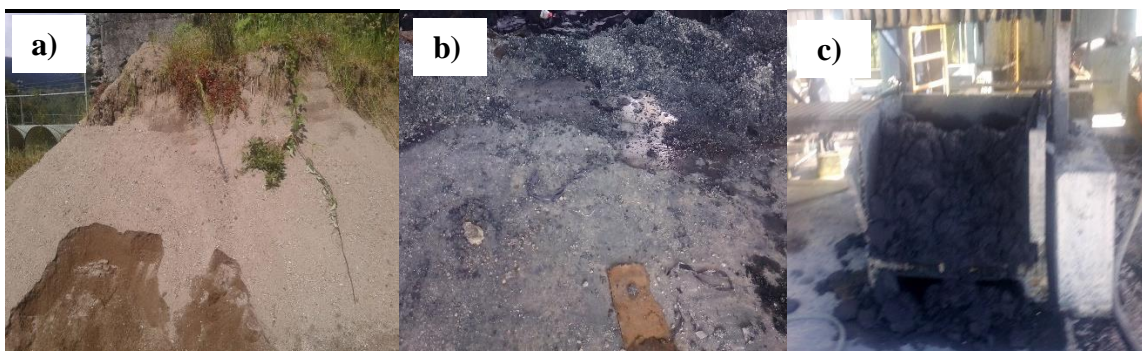
Consistió en la búsqueda y recolección de materiales de desecho industrial que puedan ayudar a la mezcla de nuevos sustratos para la retención de humedad, como lo son la piedra pómez y el lodo que son utilizadas en el proceso de lavado de la mezclilla que se generan en las maquiladoras textiles de la región y por último una fuente de arena.

### **5.2.2. Selección**

Para realizar la mezcla de sustratos los materiales se obtuvieron de los desechos industriales de las confeccionarias textiles e hidroeléctrica de la región de Teziutlán Puebla. Porter y Humtpert, (2000) mencionan que al adquirir materiales de la región representa grandes ventajas como son la disponibilidad y menor costo.

1. Arena: Se adquirió de la central hidroeléctrica (ATEXCACO), la cual se encuentra en la región de Teziutlan, Puebla. La arena es generada a partir de un desarenador cuya función es retener el azolve arrastrado por la corriente (Figura 4, a)), que proviene de los ríos Acateno, Calapa, Atexcaco, Xiucayucan, Xomiaco, Puxtla y Colaxtitla, afluentes del río Apulco formador del río Tecolutla (Autlán, 2015).
2. Piedra pómez.: Esta se obtuvo de los desechos de una maquiladora de la región (CONFETEX) la cual es usada en el proceso de lavado de la mezclilla, una vez utilizada cuando esta tiene un tamaño menor a 6 mm es desechada (Figura 4, b).

3. Lodo: El material fue proporcionado de la misma maquiladora de la cual se adquirió la piedra pómez (CONFETEX), este residuo se forma a partir de los sedimentos de telas, pinturas, etc., que se emplean durante el lavado de prendas de mezclilla (Figura 4, c).



**Figura 4. Materiales para mezclas de sustratos, a) Residuos de arena de la hidroeléctrica, b) Piedra pómez de desecho textil c) Lodo de desecho textil.**

### 5.2.2. Preparación

Arena: Se tamizó para eliminar las partículas mayores a 2.0 mm (gravas) con un tamiz del mismo número y las menores que 0.06 mm para limos y arcillas (tamiz 44 Micrones) para obtener la fracción de arena (Howard, 2001). Posteriormente se sumergió en cloro al 1 % por 24 h para después lavarlo con agua, con el objetivo de eliminar exceso de sales carbonatadas en la arena (Resh, 1989), (Figura 5).



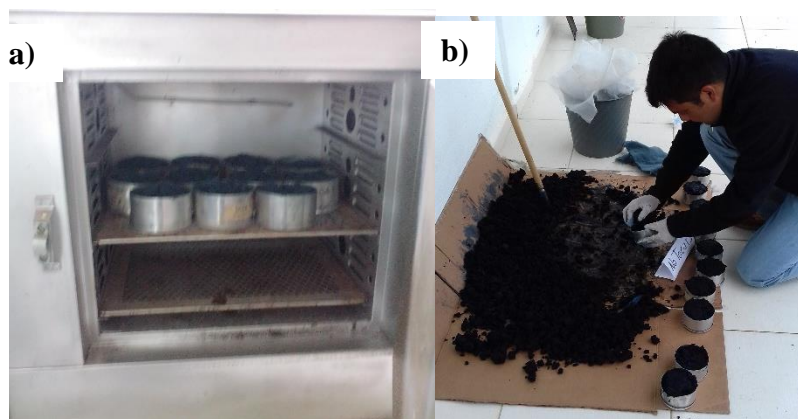
**Figura 5. Preparación de material, a) Tamizado, b) Adición de cloro, c) Secado a la sombra**

Piedra pómez: El proceso consistió en el secado de la piedra pómez el cual se realizó extendiéndola en una superficie seca bajo condiciones de invernadero hasta que al partirla por la mitad esta no tuviera indicios de humedad, este fue el indicador para proceder al siguiente paso que fue la trituración con ayuda de un molino eléctrico y después tamizarla con un harnero de construcción con 3.5 mm de abertura y con tamiz metálico de 2 mm se volvió a tamizar para obtener partículas de un diámetro de 2 y 3.5 mm, las cuales retienen una mayor cantidad de agua 68%, (Figura 6) (Segura, 2003).



**Figura 6. Preparación de la piedra pómez, a) Secado de la piedra pómez, b) Trituración de pómez, c) Tamizado.**

Lodo: Se colocó la cantidad en pequeñas cantidades de lodo en capsulas de aluminio para meterlas a una estufa de horno de convección Biossa 105°C durante 24 h, para acelerar su proceso de secado (Figura 7), posteriormente manualmente se eliminaron desechos ajenos al lodo (plásticos, piedras).



**Figura 7. Preparación del lodo, a) Secado de muestras en estufa, b) Eliminación de residuos ajenos al lodo.**

Finalmente se obtuvieron muestras de 1.5 kg de cada material: arena, piedra pómez y lodo ya mezclados y preparados como tratamientos para su análisis en laboratorio.

### **5.3. Trabajo de laboratorio**

Consistió en realizar una serie de análisis físicos y químicos a las diferentes muestras con el fin de determinar las características de los sustratos, las cuales fueron:

1. Determinación de densidad aparente: Se realizó mediante el método de la excavación en un laboratorio particular.
2. Determinación de porosidad total: mediante el método de propuesto por Baixauli-Soria C, en el laboratorio de la Facultad de ingeniería Agrohídrica.
3. Determinación de CIC: Mediante el método de acetato de amonio pH 7, de acuerdo con el manual de ISRIC en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agrohídrica.
4. Determinación de pH y CE: La preparación de las muestras para su análisis fue mediante el método de pH relación 1:2, con H<sub>2</sub>O desionizada, posteriormente con ayuda de un potenciómetro digital marca ATC Probé modelo wáter quality meter 850082, se realizaron las lecturas correspondientes

para cada tratamiento, este trabajo se realizó en las instalaciones del laboratorio de la FIAH.

5. Determinación de capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP): se determinó mediante la curva de retención de humedad a diferentes tensiones de columnas de agua en un laboratorio particular.
6. Determinación de conductividad Hidráulica: Se determinó directamente con el permeámetro de carga constante en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica.

#### **5.4. Trabajo en invernadero**

El trabajo se realizó en un invernadero tipo túnel de 5 m de ancho por 6 m de largo con una altura de 2.5 m (Figura 8).



**Figura 8. Invernadero tipo túnel.**

##### **5.4.1. Preparación de los Tratamientos**

Con el material pomáceo, arena y lodo se realizaron mezclas homogéneas a diferentes cantidades en base a volumen y así generar seis tratamientos con cuatro repeticiones (Cuadro 10), cada una con 1 kg de la mezcla, los cuales se depositaron en bolsas de plástico negro con capacidad de 2000 cm<sup>3</sup>.

**Cuadro 10. Descripción de tratamientos a evaluar.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Sustrato</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>Repeticiones</b>
<b>T<sub>1</sub></b>	Arena	1000	4
<b>T<sub>2</sub></b>	Arena + Piedra pómez	500 + 500	4
<b>T<sub>3</sub></b>	Arena + Lodo	500 + 500	4
<b>T<sub>4</sub></b>	Lodo	1000	4
<b>T<sub>5</sub></b>	Arena + Lodo + Piedra pómez	333 + 333 + 333	4
<b>T<sub>6</sub></b>	Piedra pómez	1000	4

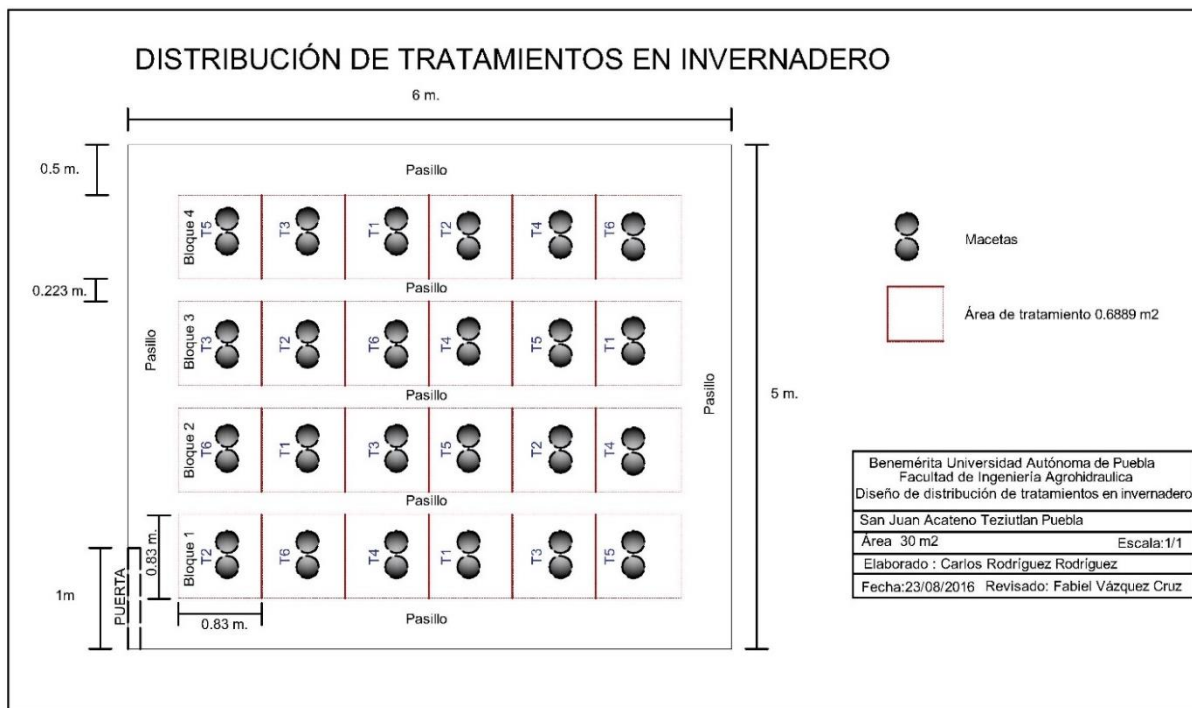
**5.4.1.1. Diseño experimental y distribución de los tratamientos**

Los seis tratamientos se distribuyeron con base a un diseño de bloques completamente al azar con cuatro bloques (repeticiones) y dos macetas por repetición (Cuadro 11). Los análisis estadísticos consistieron en análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias.

**Cuadro 11. Distribución de tratamientos en bloques.**

<b>Bloque 1</b>	<b>Bloque 2</b>	<b>Bloque 3</b>	<b>Bloque 4</b>
T <sub>2</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>
T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>
T <sub>1</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub>
T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>
T <sub>5</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>6</sub>

La distribución espacial del experimento en condiciones de invernadero se presenta en la Figura 9.



**Figura 9. Distribución de tratamientos en invernadero.**

**Elaboración propia.**

#### **5.4.2. Evaluación de retención de humedad**

Este proceso se realizó con base a la metodología utilizada por Segura *et al.*, (2008), para la evaluación de los tratamientos.

- a) Cada maceta de los tratamientos y repeticiones se obtuvo su peso con ayuda de una báscula digital marca Ranger (Figura 10), para obtener el peso seco total (**ST**: sustrato + bolsa), posteriormente se le agregó un litro de agua con ayuda de una probeta de plástico volumétrica de un litro para saturarlas y dejándolas así por 48 h.



**Figura 10. Bascula digital**

b) Transcurridas las 48 h se perforaron por la base las bolsas de todos los tratamientos, para drenar el exceso de agua, hasta que la frecuencia de goteo fue de una gota cada 10 s, (Preciado *et al.* 2002). En ese momento se obtuvo el peso húmedo inicial de cada maceta (**PHI**), que al restarle el **ST**, indicó el peso de agua inicial o contenido de humedad inicial (**HI**).

c) Una vez obtenida la **HI**, la evaluación consistió en el registro del peso de las macetas diariamente a las 12:00 del día y así poder determinar el momento de riego (se consideró la suma del contenido de humedad a PMP de cada material pómez, lodo y arena obtenida en un laboratorio particular, más la **ST**), para conocer el tiempo que tardaron los tratamientos en llegar al momento de riego (Figura 11).



**Figura 11. Peso de macetas.**

d) la frecuencia de aplicación de agua fue mediante la suma de la CC de los diferentes tratamientos, más la ST, debido a que el agua retenida a una tensión menor a 33 kPa es considerada como fácilmente disponible para las plantas. Para determinar el momento de riego (peso de maceta= CC+ST) se registraron los pesos correspondientes a las 12:00 h del día durante 23 días, la cantidad de agua aplicada en cada riego será la diferencia en peso (g) entre el criterio de riego y el contenido de humedad inicial.

Este proceso se realizó en tres ocasiones para observar si el comportamiento a través del tiempo es el mismo, una vez que el material se sometió a secado al aire y sombra.

#### **5.4.3. Registro de temperatura**

El registro de temperatura se realizó con un termómetro de mercurio colocado al centro del invernadero, tres veces al día 8:00am, 12:00 pm y 6:00 pm, durante los 23 días de experimentación, para obtener la temperatura promedio.

### **5.5. Variables a evaluar**

Las variables evaluadas en la presente investigación se describen a continuación:

1. Capacidad de intercambio catiónico.
2. Determinación de pH.
3. Conductividad hidráulica de Darcy.
4. Densidad aparente.
5. Porosidad total.
6. Curva de retención de humedad (CC Y PMP).
7. Peso de las macetas (variación de la humedad a través del tiempo)
8. Temperatura promedio diaria en el invernadero.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Características químicas

La arena (T<sub>1</sub>), obtuvo un pH debidamente alcalino y que es un valor menor obtenido por Galindo *et al.* (2014), los tratamientos arena-pómez (T<sub>2</sub>), arena más lodo (T<sub>3</sub>), arena más lodo más pómez (T<sub>5</sub>) y piedra pómez (T<sub>6</sub>), se encuentran dentro de un rango neutro; Ansorena, (1994) obtuvo un valor neutro para estos tratamientos; el lodo (T<sub>4</sub>), presento un valor neutro y es diferente al reportado por Bautista *et al.*, (2015) obteniendo un valor alcalino para el lodo (Cuadro 12).

Con respecto a conductividad eléctrica (CE), la arena (T<sub>1</sub>), no presento ningún valor de conductividad eléctrica en cambio el resto de los tratamientos si presentaron un valor, pero están dentro del valor permitido, Bunt y Warncke, (1988) recomiendan que sus valores no deberían exceder 3 dS m<sup>-1</sup> para así facilitar el manejo de la fertilización (Cuadro 12).

La arena (T<sub>1</sub>), arena más pómez (T<sub>2</sub>) y arena más lodo más pómez (T<sub>5</sub>), se encuentran en un nivel muy bajo de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y son valores inferiores a 5 meq obtenidos por Abad *et al.*, (2000), no así el resto de los tratamientos (T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> y T<sub>6</sub>) que están dentro del nivel bajo que va de 5 a 10 meq.100 g<sup>-1</sup>. Esta diferencia se puede deber a la presencia de minerales en el material pomáceo. Gama *et al.*, (2000), indican que los minerales de rango corto en el material pomáceo pueden influir en la CIC de suelos de origen pomáceo.

Los tratamientos arena (T<sub>1</sub>), lodo (T<sub>4</sub>), arena más lodo más pómez (T<sub>5</sub>) y piedra pómez (T<sub>6</sub>), presentaron valores de conductividad hidráulica moderadamente rápida ya que se encuentran en un rango de 6.1 a 13 cm.h<sup>-1</sup>, según la clasificación de Calderón y Ceballos, (2002) y los tratamientos

arena más pómez (T<sub>2</sub>), arena más lodo (T<sub>3</sub>), tienen una conductividad hidráulica rápida y muy rápida respectivamente; esta característica es el factor limitante de la adsorción de agua por la planta en un sustrato (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Características químicas de los sustratos preparados.**

Tratamiento	pH	CE (agua 1:2)	CIC (meq/100 g <sup>-1</sup> )	CH (cm/h)
T <sub>1</sub>	7.7	0.000000000	3.62739879	10.6570114
T <sub>2</sub>	6.1	0.016000000	3.56189063	31.526992
T <sub>3</sub>	6.7	0.217666667	5.26454727	19.9818963
T <sub>4</sub>	7	0.253333333	7.59845323	13.7653064
T <sub>5</sub>	6.1	0.056333333	3.12102101	7.85954589
T <sub>6</sub>	6.2	0.405666667	5.16271318	11.5450957

CE: Conductividad eléctrica, CIC: Capacidad de Intercambio catiónico por el método de Thomas, (1982) y Kamprath, (1970), CH: Conductividad Hidráulica.

## 6.2. Características físicas

La densidad aparente de la arena presenta un valor muy cercano al reportado por Pire y Pereira, (2003) el lodo (T<sub>4</sub>) tiene un valor similar al reportado por Bautista *et al.*, (2015), un sustrato con densidad real baja resulta más fácil de manejar y transportar dentro del invernadero. El espacio poroso total fue menor en los tratamientos al reportado por Noguera *et al.* (2000), la piedra pómez (T<sub>6</sub>) obtuvo un valor cercano al reportado por García *et al.*, (2001), esta diferencia entre tratamientos se debe a la presencia de material pomáceo. (Cuadro 13).

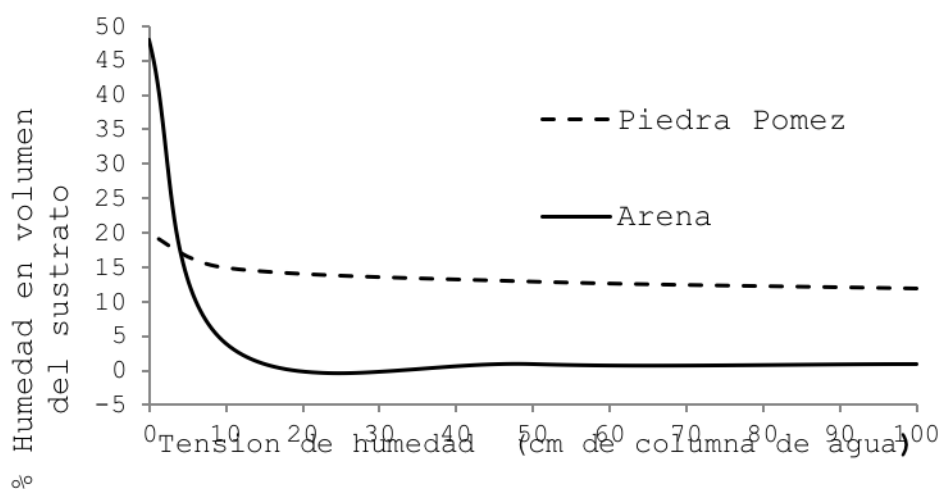
**Cuadro 13.** Características físicas de los sustratos preparados

Tratamiento	Da (Mg m <sup>-3</sup> )	Pt (%)
T <sub>1</sub>	1.09	60
T <sub>2</sub>	0.57	53.33
T <sub>3</sub>	0.71	53.33
T <sub>4</sub>	0.54	49.11
T <sub>5</sub>	0.32	54
T <sub>6</sub>	0.48	61.11

Da: Densidad aparente, Pt: Porosidad total

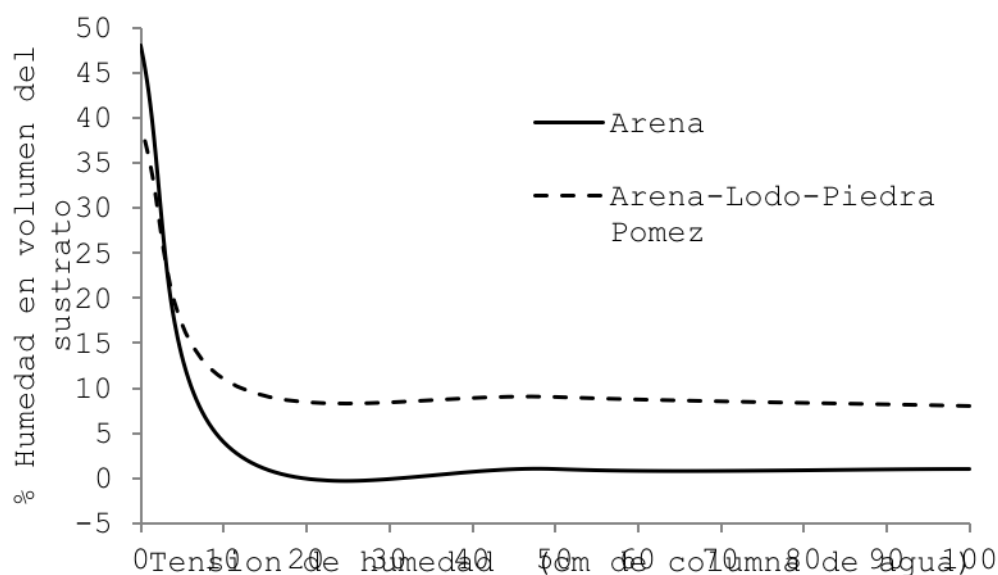
### 6.3. Curva de retención de humedad (CC Y PMP) de cada tratamiento

La arena y el resto de los tratamientos tuvieron diferentes capacidades de retención de humedad, cuando la arena (T<sub>1</sub>) estuvo sometida a una tensión de 0 cmca de agua presento un 48% mientras que la piedra pómez (T<sub>6</sub>) presento un 20 % (Figura 12), resultados que corresponden a la mayor capacidad de retención de humedad de acuerdo con los valores reportados por De Bood *et al.*, (1974).



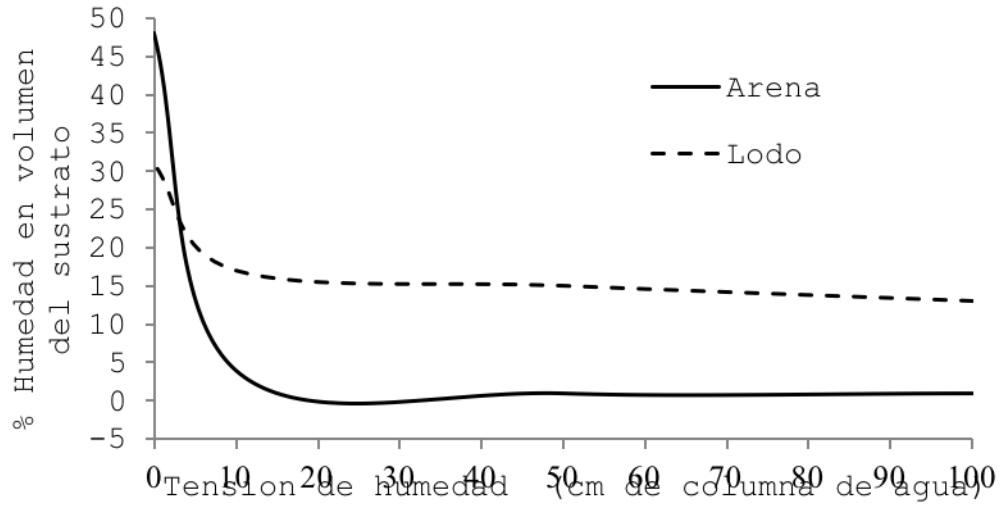
**Figura 12.** Curva de retención de humedad de la arena y del tratamiento 1.

El comportamiento de la retención de humedad de la arena ( $T_1$ ) en comparación con el tratamiento arena más lodo más piedra pómez ( $T_5$ ), el cual registro un 39% de retención de humedad a 0 cmca este valor corresponde al reportado por Calderón y Cevallos, (2003), de mayor capacidad retención de humedad en sustratos analizados por separado tales como la arena y piedra pómez (Figura 13).



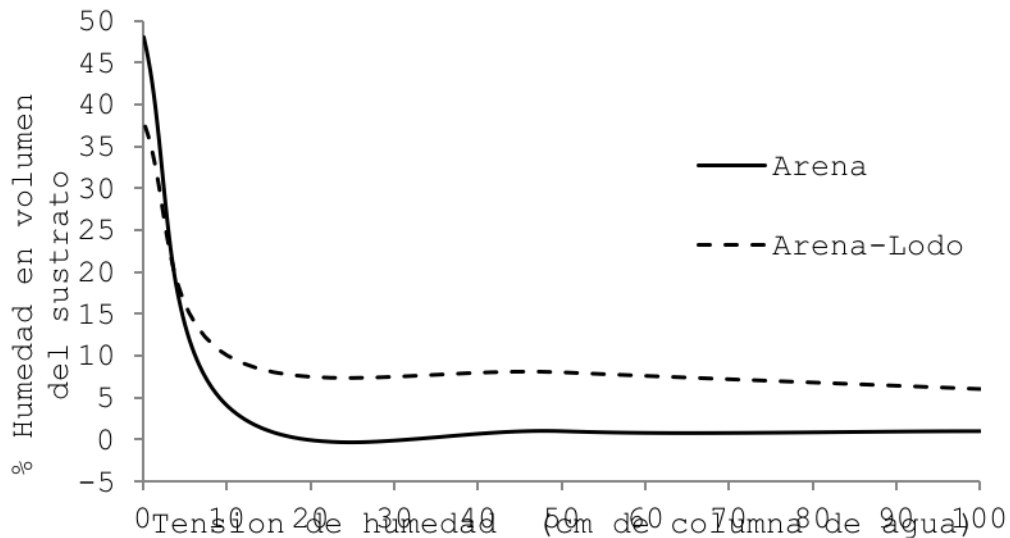
**Figura 13. Curva de retención de humedad de la arena y el tratamiento 5.**

Por su parte el lodo ( $T_4$ ), cuando se sometió a una tensión de 0 cm ca se obtuvo un 31 % de retención de humedad (Figura 14), este valor corresponde al reportado por Bautista *et al.*, (2015).



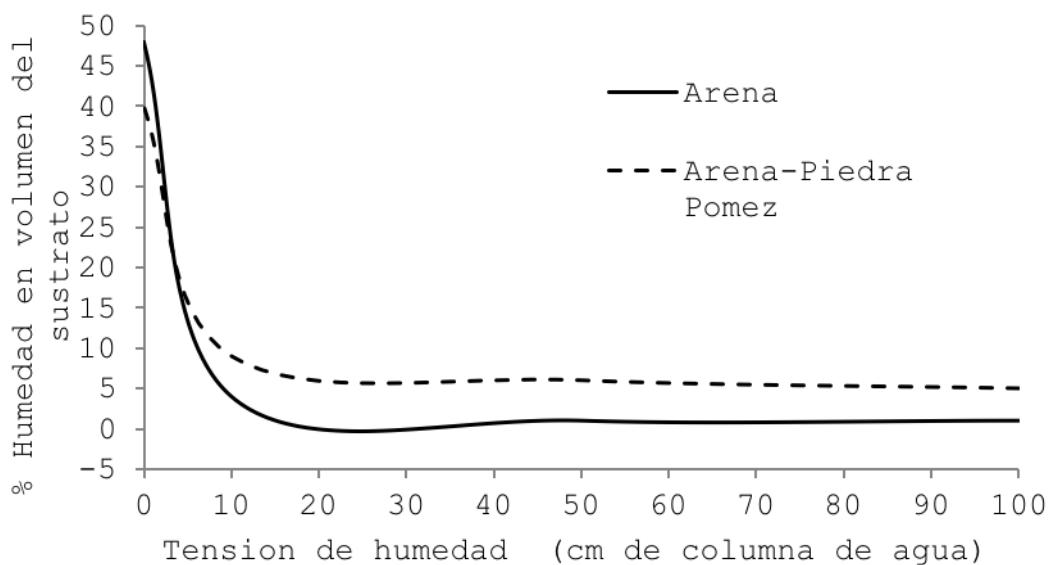
**Figura 14. Curva de retención de humedad de la arena y Lodo.**

La mezcla de arena más lodo ( $T_3$ ), presenta mayor porcentaje a una tensión de 100 cmca con un 6% mientras que la arena obtuvo 1% a la misma tensión (Figura 15), sin embargo, estos valores corresponden a el agua de reserva que se libera a una tensión de 50 a 100 cm ca según Bures, (2002).



**Figura 15. Curva de retención de humedad de la arena y arena más lodo.**

Por su parte la mezcla de arena más piedra pómez ( $T_2$ ), presento un 40 % de retención de humedad a una tensión de 0 cmca, 5 % a 100 cm ca, valores que concuerdan con lo reportado por Segura et al., (2008), aun sin haber sometido el tratamiento a un lavado con agua fría y caliente como lo realizó el autor antes mencionado por lo cual no influye en la retención máxima de humedad (Figura 16).



**Figura 16. Curva de retención de humedad de la arena y arena más piedra pómez.**

#### **6.4. Peso de las macetas de los tratamientos (variación de la humedad a través del tiempo).**

En el cuadro 14, se muestran los diferentes pesos de los tratamientos a través del tiempo durante los 23 días de evaluación, así mismo, el análisis estadístico indico que los tratamiento arena más lodo ( $T_3$ ), arena más lodo más piedra pómez ( $T_5$ ) y piedra pómez ( $T_6$ ), fueron estadísticamente iguales pero diferentes a los tratamientos ( $P \leq 0.05$ ), ( $T_1$ ) y ( $T_4$ ), por su parte el  $T_1$  es estadísticamente igual al arena más piedra pómez ( $T_2$ ), pero diferentes a los otros, el mejor tratamiento que

tuvo mayor retención de humedad fue el lodo (T<sub>4</sub>), el cual registro una humedad al final de la evaluación similar a la arena (T<sub>1</sub>), cuando este se le peso la humedad inicial; estos valores son mayores a los reportados por Segura *et al.*, (2008) debido a la zona de estudio presenta mayor humedad relativa en comparación con la zona del autor antes mencionado.

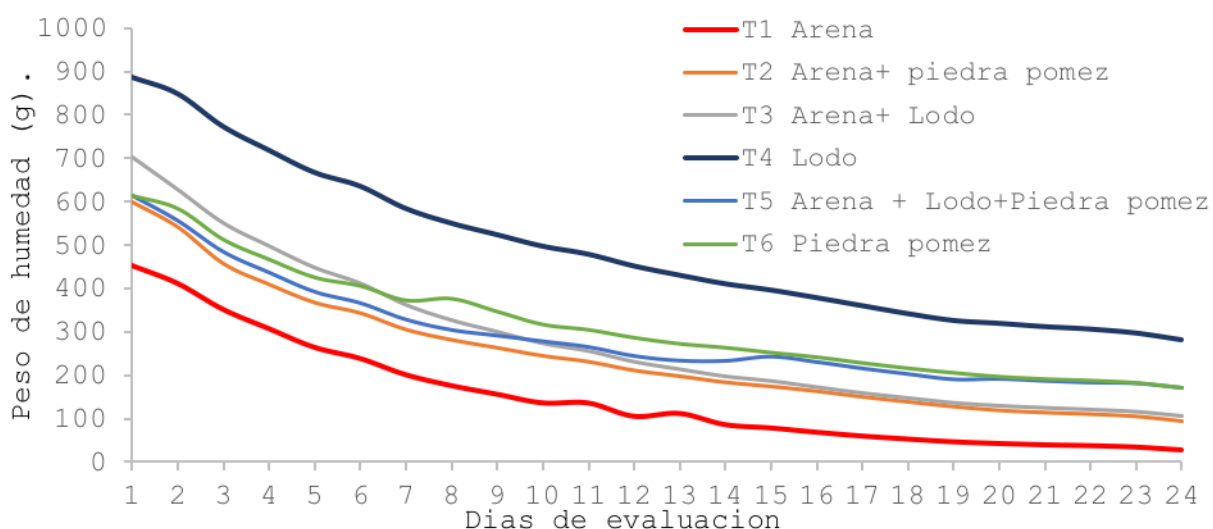
**Cuadro 14. Peso seco y húmedo de los tratamientos y su comportamiento con respecto al tiempo en la primera evaluación.**

Tratamiento	PS (g)	PHI (g)	HI (g)	Peso del agua en las macetas (g) a través del tiempo (días)						
				1	2	3	4	5	23	Prom.
				T <sub>1</sub>	1000	1479	454	413	353	309
T <sub>2</sub>	1032	1632	600	542	458	410	368	343	093	231cb
T <sub>3</sub>	1013	1715	702	627	550	497	448	412	107	265b
T <sub>4</sub>	1009	1895	886	848	772	718	667	635	281	473a
T <sub>5</sub>	1018	1633	615	557	485	437	392	366	170	278b
T <sub>6</sub>	1035	1648	613	583	512	466	425	405	172	305b

PS: Peso Seco, PHI: Peso húmedo inicial, HI: Contenido de humedad inicial, g: gramos. Letras iguales dentro de la columna no son diferentes estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ).

Por otra parte, el contenido de humedad de los tratamientos, arena más piedra pómez (T<sub>2</sub>), arena más lodo (T<sub>3</sub>), lodo (T<sub>4</sub>), arena más lodo más piedra pómez (T<sub>5</sub>) y piedra pómez (T<sub>6</sub>), a través del tiempo, siempre fue mayor que el de arena (T<sub>1</sub>) (Figura 17). Después de 9 días la humedad de la arena (T<sub>1</sub>), llego a 11 % que corresponde al PMP de la arena, parámetro que se consideró como punto crítico para reponer el agua perdida y llevarlo al peso húmedo inicial, este valor es mayor al número de días que reporto Segura *et al.*, (2008) en el cual su primer riego en arena fue al tercer día, esto se debió a la diferencia

de temperatura que hay en Teziutlán. El resto de los tratamientos tuvieron diferente comportamiento en el tiempo, de manera que para llegar al punto crítico tardaron: arena más pómez (T<sub>2</sub>) 16 días, arena más lodo (T<sub>3</sub>) 18 días, y arena más lodo más piedra pómez (T<sub>5</sub>), no llegó al punto crítico de riego PMP durante los 23 días de evaluación, de igual manera los tratamientos, lodo (T<sub>4</sub>) y piedra pómez (T<sub>6</sub>), al final de la evaluación aún tenía humedad disponible; esto se debe a la cantidad de humedad ambiental que se encuentra en la zona de estudio (Cuadro 15).



**Figura 17. Comportamiento de la humedad a través del tiempo.**

En promedio la pérdida de humedad diariamente en el tratamiento arena (T<sub>1</sub>) fue mayor con 4.1 %, que el resto de los tratamientos (Cuadro 15), esto se debe a una diferencia de potenciales matriciales según, Miller y Garnerner, (1962) dado que cada tratamiento se refiere a un sistema conformado por dos subsistemas, siendo el subsistema de arena aquel con un mayor potencial matricial en comparación con el pómez y el lodo. Esto conlleva a que el agua retenida en la arena se evapore primero,

seguida por la evaporación del agua presente en el pómez y el lodo. Así también Segura et al., (2008) encontraron que el agua que se encuentra en los poros de partículas de arena que son poros de mayor diámetro con respecto a los que tiene la piedra pómez, la arena se evapora en primer lugar y posteriormente la que se encuentra en los poros de pómez. Por esta razón, la arena se deshidrata más rápidamente en comparación con los otros tratamientos, pero cuando se combina con los demás materiales, la pérdida de agua disminuye significativamente.

**Cuadro 15. Pérdida diaria de humedad.**

<b>Tratamientos</b>	<b>Días para el riego</b>	<b>% De pérdida de Hu /día</b>
T <sub>1</sub>	9	4.1
T <sub>2</sub>	16	3.7
T <sub>3</sub>	18	3.7
T <sub>4</sub>	*	3.0
T <sub>5</sub>	*	3.1
T <sub>6</sub>	*	3.1

Hu: Humedad, \*: no llegaron al punto crítico de riego

#### **6.5. Determinación de la temperatura diaria del invernadero.**

La temperatura a la cual se evaluó el experimento fue en promedio de 22 °C, valor que se encuentra cercano al mencionado por Hernández, (2015) que van de los 19.9 a 21.5 ° C, en promedio durante el día en un invernadero de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica, este valor es menor a la temperatura a la cual evaluó Segura et al., (2008) que fue de 25 C°. La diferencia de temperatura se debe a la ubicación geográfica de la región de Teziutlán Puebla, donde la temperatura ambiente es menor en la estación de otoño en comparación con la estación de

primavera la cual es mayor Villegas *et al.* (2004), ya que no es la misma a la que se encuentra la ciudad de Torreón Coahuila, México.

## VII. CONCLUSION

La piedra pómez y el lodo de desecho industrial puede ser utilizadas en la elaboración de sustratos para incrementar la retención de humedad a un bajo costo y de fácil obtención.

El 100% de lodo en base a volumen, tiene una retención de humedad inicial del 31%, siendo la humedad fácilmente disponible de 42%, mientras que la arena es del 48% al inicio, pero la liberación de esta última es más rápida, en promedio diario se pierde un 4.1 % de humedad en comparación con el lodo industrial. La capacidad de retención de humedad y de liberación del agua en los sustratos de desechos industriales evaluados ayuda a hacer un uso eficiente del agua en la producción de cultivos en invernadero; sin embargo, es necesario realizar más estudios para establecer si la mezcla de los diferentes tratamientos no afecta el desarrollo de las plantas

La retención de humedad se puede incrementar, si esta se mezcla con desechos industriales como lo son la piedra pómez y lodo.

### VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M., Noguera, P., and Bures, S. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77:197-200.
- Abad, B.M., Noguera, M.P., Carrión, B.C.2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urrestarazu-Gavilán. *Cultivo sin suelo*. Madrid: Mundi Prensa, 113-158.
- Acosta, D.C.M., Acosta, P.D., Cazárez, P.M., Martínez V.Y.M. 2004. Retención de humedad de materiales para la preparación de sustratos en la producción de plantas en contenedor. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Agropecuaria, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Biológicas. *Investigación Agropecuaria*. 2004.
- Álvarez, M. 2011. *Hidroponía. Una guía esencial para el cultivo en agua de frutas, hortalizas y plantas florales*. Albatros SACI, Argentina. pp. 32.
- Ansorena, M.J. 1994. *Sustratos. Propiedades y características*. Editorial: Mundi-Prensa México .pp: 67 - 79.
- Bautista, V.E., Benavides, M.A., Maria de las Nieves Rodríguez, M.M. Fuentes, G.A., Robledo, T. V., y Sandoval, R.A. 2015. Lodo industrial textil en la producción de hortensias (*Hydrangeamacrophylla L.*) en maceta. *Rev: Mex. Ciencias Agrícolas*. Pub. Esp. Núm. 12 de noviembre.
- Barbado, J. 2009. *Hidroponía. Su empresa de cultivos en agua* 1ª edición. Albatros SACI. pp:37.

- Baixauli-Soria C, Aguilar-Oliver J.M. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Serie de divulgación técnica no. 53. Generalitat Valenciana.
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hyman Ltd., Great Britain. pp: 309.
- Bures, P. 2002. Informe sobre la industria hortícola. Bures S.A.
- Bures, S. 1997. Sustratos. Ediciones: Aerotecnicas. Madrid, España. pp: 342
- Boodt, M. De, O. Verdonk and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. Acta Horticulturae 37: 2054-2062.
- Cabrera, R. I. 1998. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. Revista: Serie Horticultura. pp: 5-11
- Castellanos, J. 2009. Manual de producción de tomate. Celaya: Editorial Intagri, S.C., 2009. 459.
- Calderón, S. F, Cevallos F. 2002. Los sustratos. Disponible en línea: [http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los\\_Sustratos.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm)
- Cruz, C.E., Can C.A., Sandoval V.M., Bugarín M. R, Robles B. A., Juárez L.P., 2012. Sustratos en la horticultura. Unidad Académica de Agricultura. Universidad Autónoma de Nayarit. Revista: *Bio Ciencias* Enero 2013 ISSN 2007-3380. pp: 17-26

- Donado, L. C. J. 2000. Modelo de Conductividad Hidraulica en Suelos. Modelo de Conductividad Hidráulica en Suelos. Bogota D.C., Colombia.
- Enciso, H.C. 2014. Texturas denim. Tecnicas de producción pp: 43-44
- FAO, 2002. El cultivo protegido en el clima mediterráneo. Manual preparado por el Grupo de Cultivos Hortícolas Dirección de Producción y Protección Vegetal pp: 147-148
- García, O.C., Alcántara, G.G., Cabrera. F. Gavi R. Volke, V.H. 2001. Evaluación de sustratos para las producciones de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México. Texas A&M University, Research and Extension Center. 17360 Coit Road, Dallas, TX 75252. Revista: terra volumen 19 número 3, 2001. pp: 253-254
- Galindo, P.F.V., Fortis, H.M., Preciado, R.P., Trejo, V.R., Segura, C.M. A., Orozco, V.J.A. 2014. Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus L.*) bajo sistema protegido. Rev.: Mex. Cienc. Agríc. Vol.5 Núm.7.
- Gama, C.J.E., Solleiro, R. E., Vallejo, G.E., 2000. Weathered pumice influence on selected alluvial soil properties in west Nayarit, México. Soil Till. Res. 55: 143-165.
- Garcés, G.L.F., Peñuela, M.G.A. 2007. Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. Rev.: Lasallista de Investigación, vol. 4, núm. 2,

- 2007, pp. 24-31 Corporación Universitaria Lasallista Antioquia, Colombia.
- Hernandez, Dottoli, A. M. 2015. Aplicación de dosis de lixiviado de raquitis de plátano en chile manzano (*Capicúa pubescens R&P*).
- Hitlchon, G.M., D.A. Hall, R.A.K. Szmidt. 1990. Hidroponic production of glasshouse tomatoes in Sardinian plaster-grade perlite. Acta Horticulturae PP: 287-261-266
- Hillel, D. 1982. Texture, particle size distribution, and apecific surface. In: Fundamentals of Soli Physics. Pp: 55-69. Acadmic Press Inc. New York. Disponible en línea: <http://oa.upm.es/869/1/VTerestesis.pdf>.
- Howard, M.R. 2001. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Ediciones: Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona, México. pp: 261.
- INEGI, 2000. Carta Topográfica. Teziutlán. E14B5.Esc.150, 00. Primera impresión. Dirección General de Geografía de México
- Martínez, E. García, M. 1993. Cultivos Sin Suelo: Hortalizas en Clima Mediterráneo. Ediciones de Horticultura S.L., Reus (Tarragona), 123 pp.
- Moinereau J, Hermann, J.P., Favrot C, Riviere L.M., 1987. The substrats-Inventaire, caractéristiques, ressources. En Blanc D (Dir.) Les Cultures Hors Sol. 2e ed. Institut National de la Recherche Agronomique. París, Francia. pp. 15-75.
- Minera Autlan, 2015. <http://www.autlan.com.mx/>

- Miller, D.E., Gardner, W.H., 1962. Water infiltration into stratified soil. Proc. Soil Sci. Am. 26: 115-118
- Narváez, O. W.A., Benavides, M.A., Robledo, T.V., Y Mendoza, V.R. 2013. Efectividad del lodo textil en la producción y composición química del fruto de tomate. Rev: Ciencias Agrícola. Vol.4 Núm.1 1 de enero - 14 de febrero, 2013.
- Narváez, O.W.A., Benavides, M.A., Vazquez, B.M.E., Cabrera, DE F.M. 2014. Efecto de la aplicación de lodos crudos de la industria textil en la productividad y en la composición química de lechuga (*Lactuca sativa*). Rev. Int. Contam. Ambient vol.30 no.4 México nov. 2014
- Noguera, P, M Abad, V Noguera, R Puchades, A Maquieira., 2000. Coconutcoirwaste, a new and viable ecologically-friendly peatsubstitute. Acta Hort. 517:279-288.
- Osindky, D., Jeanne, M.S. 2003. Minerales y productos químicos para la agricultura. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo pp: 5
- Preciado, R.P., Baca, C.G, Tirado. T.J.L, Kahuashi, S.J, Tijerina, Ch. L., Martínez, G.A. 2002. Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. Terra 20: 267-276.
- Pastor, S. J. N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. Rev: Terra 17 (3):231-235.
- Piere, R. Pereira. A. 2003. propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. Revista :Bioagro, 15 (1):55-63. 2003
- Porter-Humpert C. New trends in sustainable farming build compost use. ByoCycle 2000; 41: 30-35.

- Resh, H. 1989. Hydroponic food production. 4a ed. Woodbridge. Sta. Barbara, CA, EEUU. 462 pp.
- Resitex, 2007. Minimización de residuos textiles. Alternativas para la reducción del volumen de residuos en el sector textil. Medidas de minimización en el proceso de producción y en el consumo. LIFE05 ENV/E/000285
- SAGARPA. 2009. Hidroponía rustica. Sistema de agronegocios traspatio pp: 2
- Salazar, R., Rojano, A., López, I. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V, núm. 2
- Samperio, R. 2004. Un paso más en la Hidroponía. 1ª edición. Diana. Pag. 59-60
- Silva, C. P., Acevedo, H. E., And H. Silva R. 2000. Manual de estudios y ejercicios.4-5. Universidad de Chile. Facultad de CS. Agronomicas Lab. Relación suelo-agua -planta.
- Segura, C.M.A., Ramírez, S.A.R., García. L.P., Preciado. R.P., García, H.J.L., Yescas, C.P; Fortis, H.M., Orozco, V.J.A., Montemayor, T.J.A.2011. Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pómez con tres diferentes frecuencias de riego. Rev.: Chapingo ser. Hortic. vol.17
- Segura, C. M. A.; Preciado, R.P.; González, C.G.; Frías, R.J. E.; García. G.; Orozco, V. J. A.; Enríquez, S. M. 2008. Adición de material pomáceo a sustratos de arena para incrementar la capacidad de retención de humedad. Rev.: INTERCIENCIA. 33: 923-928. INCI Vol.33 n.12 Caracas dic. 2008

- Strojny, Z. Nowak J. 2001. Effect of different growing media on the growth of some bedding plants. Acta Hort. 644:157-162.
- Teres, T. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización
- UdelaR - FI - IMFIA.2009. Curso de Hidrología e Hidráulica Aplicadas. Agua en el Suelo. Módulo Hidrología.
- Villegas, R.I., Méndez, G. J., Reyes, L.D., Barrios, D.B., Torres, F.C.D.2014. Variación de la precipitación y temperatura en el municipio de Teziutlán, Puebla. Revista: Biológico Agropecuaria Tuxpan 2(3): 588-598. ISSN: 2007-6940.
- Warncke, D. 1988. Recommended test procedure for greenhouse growth media. pp. 34-37, In: Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. Bulletin 499. North Dakota Agricultural Experiment Station. Fargo, ND.
- Zarate, N. H. 2007. Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* mil.) hidropónico con sustratos, bajo invernadero. Instituto politécnico nacional, maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales. pp:16