



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**PROPIEDADES HÍDRICAS EN MEZCLAS DE SUSTRATOS
CON DIFERENTES PROPORCIONES Y TAMAÑOS DE
PARTÍCULA**

JORGE LUIS HERNÁNDEZ ESCOBAR

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2009

La presente tesis, titulada: **“PROPIEDADES HÍDRICAS DE MEZCLAS DE SUSTRATOS CON DIFERENTES PROPORCIONES Y TAMAÑOS DE PARTÍCULA”**, realizada por el alumno: **Jorge Luis Hernández Escobar**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

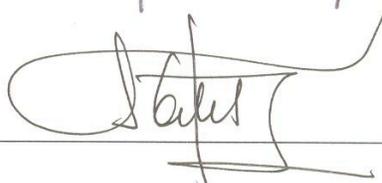
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR:



DR. CARLOS ORTIZ SOLORIO

ASESOR:



DRA. ROSA ANICUA SANCHEZ

Montecillo, Texcoco, México, septiembre de 2009

RESUMEN

PROPIEDADES HÍDRICAS DE MEZCLAS DE SUSTRATOS CON DIFERENTES PROPORCIONES Y TAMAÑOS DE PARTÍCULA

Jorge Luis Hernández Escobar, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2009

Se evaluaron las propiedades hídricas (retención de agua y capacidad de aire) de mezclas de sustratos (fibra de coco: FC, piedra pómez: PP y tezontle: T) con micromorfología de partículas y demanda hídrica de plantas de lechuga Var. Summertime. Los factores de estudio fueron: tamaño de partícula (1-2 mm y 2-3.36 mm) y proporción de mezcla (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0, FC:T y FC:PP, respectivamente). Se determinaron las curvas de retención de agua mediante el uso de un equipo de succión con embudos de placa filtrante. Se realizaron láminas delgadas de las mezclas de sustratos para evaluar la porosidad y la distribución de partículas. Las mezclas con mejor retención de agua y capacidad de aireación se probaron en plantas de lechuga bajo condiciones de invernadero. Los resultados mostraron que las propiedades hídricas varían en el mismo material con diferente tamaño de partícula y proporción de mezcla, debido a que las partículas presentan diversas distribuciones (en bandas y aleatoria). La mezclas en las que se presentó un mejor desarrollo y calidad de plantas de lechuga fueron FC:T y FC:PP 75:25 que corresponden a los sustratos donde las partículas se separaron en capas cada una con alto porcentaje de agua disponible o alta capacidad de aire. Las propiedades físicas de los sustratos pueden ser aditivas, sustractivas o promedios dependiendo del tipo de mezcla y del tamaño de partícula, por lo que la selección de la mezcla de sustrato debe de estar en función de las necesidades hídricas de las plantas.

Palabras clave: fibra de coco, tezontle, piedra pómez, micromorfología, análisis de imágenes, retención de agua.

ABSTRACT

WATER PROPERTIES OF MIXTURES OF GROWING MEDIA WITH DIFFERENT RATIO AND PARTICLE SIZE

Jorge Luis Hernández Escobar, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2009

Water properties (holding water and aeration capacity) of mixtures of growing media (coconut fiber: FC, pumice: PP and tezontle: T) with particle micromorphology and demand of water lettuce plants Var. Summertime were evaluated. The factors were particle size (1-2 mm and 2-3.36 mm) and ratio of mixture (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0, FC: FC and T: PP, respectively). Water retention curves using an equipment with suction funnels crucible were determined, and thin sections of mixtures of growing media to evaluate porosity and distribution of particles were elaborated. Mixtures with higher water holding capacity and aeration were tested in lettuce plants on greenhouse conditions. Results showed that properties of holding water vary in the same material with different particle size, proportion and mixing, because the particles have different distributions pattern (random and banded). The mixture with better development and quality of lettuce plants were FC:T and FC:PP 75:25, where the particles were separated into layers, each one with either higher percentage of available water or aeration capacity. Physical properties of growing media may be additive, subtractive or average depending on the type of mixing and particle size is; therefore, mixture of growing media must be in function of plant holding water necessities.

Keywords: coconut fiber, tezontle, pumice, micromorphology, image analysis, *water holding*.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Programa de Edafología, por darme la oportunidad de avanzar en mi formación académica.

A la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, por guiarme y compartir su experiencia y conocimientos para hacer esta investigación.

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, por aportar sus vastos conocimientos e ideas para hacer un trabajo de calidad.

A la Dra. Rosa Anicua Sánchez, por sus acertadas observaciones a esta investigación.

Un agradecimiento especial a la M.C. María Encarnación Lara Hernández, por su colaboración en esta investigación; por su gran disposición y apoyo incondicional que en todo momento me brindó, por sus sabios consejos.

Al personal del laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, en especial, al Sr. Pedro Torres por todo el apoyo.

DEDICATORIA

A mí adorada Ely.

A mis padres Tirso y Epifania.

A mis hermanos Cesar, Bella, Raúl, Elvira, Tirso y Gabriel.

A mis sobrinos, son muchos así que omitiré mencionarlos.

A mis amigos Misael, Humberto, Jatziry, Anita, Annel.

A todos ellos porque son lo más importante en mi vida.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Definición de sustrato.....	3
2.2 Propiedades físicas de sustratos	4
2.2.1 Porosidad.....	5
2.2.2 Densidad real.....	7
2.2.3 Densidad aparente	7
2.2.4 Conductividad hidráulica.....	8
2.2.5 Retención de agua.....	9
2.3 Problemática en las determinaciones físicas de sustratos.....	10
2.3 Mezclas de sustratos	11
2.4 Propiedades físicas de sustratos y su relación con el desarrollo de cultivos	12
2.5 Descripción de los materiales utilizados	16
2.5.1 Fibra de coco	16
2.5.2 Piedra pómez.....	17
2.5.3 Tezontle	17
2.5.4 Peat moss.....	18
2.6 Análisis de imágenes	18
2.7 Conclusiones de la revisión de literatura.....	18
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivos específicos	20
3.3 Hipótesis	21

IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
4.1 Construcción del equipo de succión con embudos de placa filtrante.....	22
4.2 Materiales empleados para las mezclas.....	24
4.3 Análisis físico de sustratos.....	24
4.3.1 Granulometría.....	24
4.3.2 Densidad aparente.....	25
4.3.3 Densidad real.....	25
4.3.4 Curvas de retención de agua.....	26
4.3.5 Secciones delgadas.....	26
4.3.6 Análisis de imágenes.....	27
4.4 Experimento con planta.....	32
4.4.1 Diseño de tratamientos.....	32
4.4.2 Diseño experimental.....	33
4.4.3 Conducción del experimento.....	33
V. RESULTADOS.....	35
5.1. Construcción del equipo de succión con embudos de placa filtrante.....	35
5.1.1 Observaciones.....	38
5.2 Caracterización física de materiales.....	41
5.2.1 Densidad aparente.....	41
5.2.2 Densidad real.....	43
5.2.3 Distribución de partículas.....	46
5.2.4 Espacio poroso total.....	49
5.2.5 Curvas de retención de agua de sustratos.....	50
Fibra de coco – piedra pómez.....	50

Fibra de coco - tezontle	55
5.3 Producción de plántulas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> Var. Summertime) en diferentes sustratos.....	60
5.3.1 Germinación	61
5.3.2 Altura de planta.....	63
Homogeneidad de planta	65
5.3.3 Peso de materia fresca de la parte aérea.....	65
5.3.4 Peso de materia seca de la parte aérea	66
5.3.5 Peso de materia fresca de raíz	67
5.3.6 Peso de materia seca de raíz	68
5.3.7 Plantas infestadas por hongos.....	68
5.3.8 Calidad de cepellón	69
5.3.9 Distribución de raíces	71
5.3.10 Contenido de agua de los sustratos	75
VI. CONCLUSIONES	77
VII. BIBLIOGRAFÍA	79

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Valores “ideales” de propiedades físicas de sustratos.	7
Cuadro 2. Variación de la porosidad, densidad aparente y retención de agua de acuerdo con el grado de compactación.....	8
Cuadro 3. Componentes de sustratos y sus proporciones de las mezclas.	32
Cuadro 4. Ubicación de tratamientos dentro de los bloques.....	33
Cuadro 5. Densidad aparente, densidad real y espacio poroso total de los sustratos utilizados.	43
Cuadro 6. Porosidad total de mezclas de sustratos en secciones delgadas.....	48
Cuadro 7. Variables respuesta de plantas de lechuga en diferentes sustratos (mezclas y materiales individuales).....	61

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Curva característica de liberación de agua de sustratos (De Boodt <i>et al.</i> , 1974).....	10
Figura 2. Diseño del equipo para determinación de curvas de retención de agua.....	23
Figura 3. Distribución de fotografías de microscopio en la sección delgada.....	27
Figura 4. Edición de imagen para obtener contraste entre poros y partículas.....	28
Figura 5. Segmentación de la imagen.....	28
Figura 6. Asignación de colores a los componentes de la imagen.....	29
Figura 7. Activación del tintero.....	29
Figura 8. Selección de espacios vacíos para cuantificar porosidad.....	30
Figura 9. Registro de valores X1 y X2.....	30
Figura 10. Ajuste de valores de X1 y X2 en el histograma.....	31
Figura 11. Obtención del porcentaje de poros de la imagen.....	31
Figura 12. Equipo de succión con embudos de placa filtrante.....	36
Figura 13. Embudos tapados con película plástica adherible.....	38
Figura 14. Saturación de la fibra de coco en partículas < 1mm \varnothing con el uso de pipeta, para incrementar el nivel de mojabilidad del material.....	39
Figura 15. Determinación de densidad real en mezcla de fibra de coco-tezontle con material triturado. Puede observarse como se sedimentó el tezontle y la fibra de coco flotó, lo cual pudo haber ocasionado error en la lectura al aforar.....	40
Figura 16. Determinación de densidad real en mezcla de fibra de coco-piedra pómez con partículas de 1-2 mm \varnothing	41
Figura 17. Comportamiento de densidad aparente de los sustratos en función de proporción de mezcla y tamaño de partículas.....	42

Figura 18. Determinación de densidad real en piedra pómez con el método del matraz aforado. A) Material triturado, B) 1-2 mm y C) 2-3.36 mm.	44
Figura 19. Comportamiento de la densidad real en piedra pómez y tezontle en diferentes tamaños de partícula.	45
Figura 20. Comportamiento de la densidad real en mezclas de materiales en diferentes tamaños de partícula.	46
Figura 21. Sección delgada de fibra de coco – tezontle 75:25, b y c) detalle de la distribución y separación de partículas.	47
Figura 22. Variación de la porosidad y distribución de partículas en mezclas de sustratos a) FC:T 75:25 2-3.36 mm, b) FC:P 25:75 1-2 mm y c) FC:T 25:75 1-2 mm. .	48
Figura 23. Espacio poroso total de los materiales utilizados.	49
Figura 24. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y piedra pómez 1 – 2 mm Ø.	50
Figura 25. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y piedra pómez. 1-2 mm Ø.	52
Figura 26. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y piedra pómez 2 – 3.36 mm Ø.	53
Figura 27. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y piedra pómez. 2-3.36 mm Ø.	54
Figura 28. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y tezontle 1– 2 mm Ø.	55
Figura .29 Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y tezontle 1-2 mm Ø.	57
Figura 30. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y tezontle 2 – 3.36 mm Ø.	58
Figura 31. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y tezontle. 2-3.36 mm Ø.	59
Figura 32. Porcentaje de germinación de lechuga en diferentes sustratos.	62
Figura 33. Porcentaje de germinación de lechuga en diferentes sustratos.	63

Figura 34. Altura de planta a los 14, 20 y 40 días después de la siembra.	63
Figura 35. Comportamiento de alturas de planta en los diferentes sustratos.....	64
Figura 36. Aspecto de parte aérea de plantas de lechuga. a) tratamiento 6 y b) peat moss.....	65
Figura 37. Pesos de materia fresca de la parte aérea de lechuga en los diferentes sustratos.....	66
Figura 38. Pesos de materia seca de parte aérea de lechuga en los diferentes sustratos.....	67
Figura 39. Comportamiento del peso de material fresca de raíces de lechuga en diferentes sustratos.....	67
Figura 40. Comportamiento del peso de materia seca de raíces de lechuga en diferentes sustratos.....	68
Figura 41. Incidencia de hongos en los diferentes sustratos.....	69
Figura 42. Calidad de cepellón en mezclas de fibra de coco y tezontle.....	70
Figura 43. Calidad de cepellón en materiales individuales.....	71
Figura 44. Calidad de cepellón en mezclas de fibra de coco – pómez y fibra de coco - tezontle.....	72
Figura 45. Calidad de cepellón en los materiales individuales.....	73
Figura 46. Distribución de raíces en diferentes proporciones de mezclas de sustratos.....	74
Figura 47. Distribución y abundancia de raíces en materiales orgánicos.....	74
Figura 48. Contenido de agua en los diferentes tratamientos al final del experimento.	75

I. INTRODUCCIÓN

En México se ha generalizado el uso de turba (peat moss) y tierra de monte como ingredientes principales de los sustratos usados para cultivos ornamentales y hortícolas (García et al., 2001; Flores et al., 2008). El uso de estos materiales ocasiona un impacto ambiental indeseable debido a que las tasas de extracción son mayores que las de reposición. Por otro lado, a causa de una mayor demanda de estos materiales, se ha visto disminuida su calidad e incrementado su costo.

Se han realizado investigaciones para probar diversos materiales orgánicos e inorgánicos y estudiar sus propiedades, de tal manera que puedan usarse en la producción agrícola protegida; no obstante, hace falta generar información que ayude a comprender el comportamiento de materiales usados para sustratos, sobretodo en mezclas, que sirva de base para la preparación de sustratos acordes con los requerimientos de cada cultivo y, de esta forma, eficientar y hacer un uso racional de los recursos agotables.

Las propiedades físicas de los sustratos son las de mayor importancia, ya que deben ser óptimas desde el establecimiento del cultivo, dado que, a diferencia de las propiedades químicas, no pueden modificarse una vez establecido el cultivo.

Se ha reportado que la relación agua-aire está afectada por el tamaño, la forma, la naturaleza y el acomodo de las partículas. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones que se han llevado a cabo en sustratos se realizan en muestras a granel, por lo que resulta difícil comprender el comportamiento de dichos sustratos por la complejidad de los mismos. Si a esto se le suma que el tamaño del contenedor influye directamente sobre las propiedades físicas de los sustratos (Beardsell *et al.*, 1979) y que cada especie vegetal presenta requerimientos hídricos diferentes, entonces la elaboración de un sustrato con características “ideales”, es compleja; por lo

que se debe de modificar el enfoque empírico por otros donde se analicen los procesos.

En la actualidad, no se ha desarrollado una técnica que ayude a predecir el comportamiento de las propiedades físicas en mezclas de materiales para sustratos, debido a la variación de tamaño, forma y naturaleza de las partículas de los materiales utilizados; además, del desconocimiento de las interacciones que ocurren entre los componentes de la mezclas.

Uno de los problemas más importantes en la determinación de las propiedades de los sustratos es que generalmente utilizan metodologías específicas para suelos lo que ha conducido a una sobre o subestimación de la información.

La principal contribución de este trabajo consiste en la construcción y prueba del equipo para la determinación de las curvas de retención de agua, el uso de secciones delgadas para el análisis de la distribución de partículas en las mezclas, así como el control del tamaño de partículas de los materiales utilizados. Uno de los logros de este trabajo fue disminuir la frecuencia de riego en el cultivo bajo condiciones de invernadero y por ende la cantidad de agua utilizada. Sin embargo, todavía es necesario desarrollar investigaciones sobre este tema que sirvan como base para comprender el comportamiento de mezclas de materiales. Sin duda, esto brindará mayor certeza en la preparación de sustratos y contribuirá al uso eficiente del recurso hídrico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición de sustrato

Un sustrato es un material sólido natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un recipiente, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical y desempeña una función de soporte para la planta, pudiendo intervenir o no en el proceso de nutrición mineral de la misma (Noguera, 1997). Este está formado por tres fases: sólida, constituida por las partículas; líquida, constituida por el agua y nutrientes; y gaseosa, responsable del transporte del oxígeno y dióxido de carbono entre las raíces (Lemaire, 1995). Por su parte, Burés (1997) define a un sustrato como cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en contenedor. Se entiende el término contenedor como cualquier recipiente con una altura limitada y su base se encuentre a presión atmosférica, es decir, con drenaje libre.

El medio de cultivo o sustrato debe proporcionar al cultivo cantidades equilibradas de aire, agua y nutrientes minerales, además de servir de soporte o anclaje a la planta (Ansorena, 1994).

Para entender las propiedades de los sustratos y sus repercusiones es necesario considerarlo como un sistema de matriz sólida/porosa, de forma análoga al que se utiliza en edafología para definir a los suelos en forma natural. La diferencia básica respecto a los suelos naturales radica en la composición distinta de la matriz sólida, que a su vez genera una configuración de poros diferentes en ambos casos (Burés, 1997).

La estructura física de un sustrato está formada básicamente por un esqueleto sólido que conforma un espacio de poros, los cuales pueden estar llenos de agua o de aire, y corresponden a espacios situados entre las partículas del sustrato o dentro de ellas. El esqueleto sólido y el espacio poroso de los sustratos están definidos por la naturaleza

del material y por el tipo de empaquetamiento, lo cual dependerá del tipo de material y de su granulometría (tamaño de partícula), mezcla e isotropía (igualdad de las propiedades físicas en todas las direcciones) y del empaquetamiento o configuración espacial (Verdonck *et al.*, 1984). Bajo esta perspectiva, un mismo sustrato presentará distintas propiedades dependiendo de la granulometría y empaquetamiento de las partículas (Burés, 1997).

2.2 Propiedades físicas de sustratos

Las propiedades físicas de los sustratos son consideradas de mayor importancia que las químicas; esto es, si la estructura física del sustrato es inadecuada, difícilmente podrá mejorarse una vez que se ha establecido el cultivo (Ansorena, 1994; Cabrera, 1999; Pastor, 1999). Las propiedades físicas más importantes son aquellas relacionadas con los poros, es decir, la granulometría, la porosidad y el reparto de las fases sólida y gaseosa (Peñuelas y Ocaño, 2000). Por su parte Burés (1997) afirma que las características hídricas de los sustratos dependen de la distribución de poros en el sustrato. Las partículas de distintos materiales se comportan de modos diferentes de acuerdo con su composición, masa, densidad, compresibilidad, rugosidad, estructura interna, forma, características superficiales, isotropía y tamaño (Burés, 1997).

Los estudios relacionados con el empaquetamiento de partículas son escasos; sin embargo, se han llegado a correlacionar las propiedades de los materiales con su modo de empaquetamiento. Al respecto Burés (1997) señala que el tipo de material influye en el empaquetamiento de las partículas de los sustratos.

Por su parte Anicua (2008) encontró que el tamaño de partícula, forma y porosidad interna de los sustratos tanto orgánicos como inorgánicos, influyen directamente sobre la capacidad de aire y retención de agua. No obstante, todavía no se ha estudiado si

estas propiedades se promedian, son aditivas o sustractivas, cuando se realizan mezclas para generar un sustrato.

Orozco *et al.* (1995) trabajaron con perlita y encontraron correlación entre el tamaño de partícula con el tamaño de poro y determinaron que la porosidad interna puede tener un efecto significativo en la retención de agua.

La relación entre el potencial matricial (Ψ_m) y el contenido de agua (θ) es una relación no lineal que depende del sustrato. En los sustratos se toma a la porosidad total o efectiva como punto de saturación (θ_s), la cual se determina mediante la densidad aparente y la densidad real del sustrato. No obstante, queda aire atrapado entre o en las partículas del sustrato; y presencia de poros cerrados, que no se cuantifican, por lo tanto, generan errores importantes en el cálculo (Burés, 1997).

2.2.1 Porosidad

La porosidad total es el volumen de espacio vacío (espacio poroso) ocupado por fluidos en el volumen total. Sin embargo, no es suficiente conocer la porosidad total de un sustrato para describir la accesibilidad de los fluidos en el espacio poroso (Lemaire, 1995).

Los sustratos presentan dos tipos de poros: internos y externos. La porosidad interna está influenciada por la naturaleza de las partículas, y estado e interconexión de los poros; puede ser abierta o cerrada. Los poros abiertos o percolantes son los que tienen conexión con los poros externos. La porosidad efectiva es la porosidad percolante, abierta o interconectada, que es la que contribuye a la retención y movimiento del agua en el sustrato. La porosidad externa es la que se da por el empaquetamiento o acomodo de las partículas, la cual depende de la forma, tamaño y naturaleza de las mismas (Burés, 1997).

Cabrera (1999) menciona que un sustrato debe tener una porosidad total mayor de 70% con base en volumen; por su parte Ansorena (1994) recomienda una porosidad total superior de 85%.

En la porosidad de los sustratos, los microporos son utilizados por el agua y los macroporos por el aire. El intercambio gaseoso tiene lugar en los macroporos, que están en función directa del tamaño, disposición y grado de compactación de las partículas (Peñuelas y Ocaño, 2000).

La porosidad del sustrato y la relación entre la porosidad de aire y retención de humedad son consideradas como las características físicas más importantes para el crecimiento y desarrollo de cultivos (Cabrera, 1999). Al respecto, Anicua (2008), encontró que la porosidad de aire es determinante en el desarrollo adecuado del cultivo de *Lisianthus* (*Eustoma grandiflorum*), debido a que una misma cantidad de agua fácilmente disponible en diferentes materiales y una variación en la porosidad de aire, significó el fracaso o éxito de este cultivo.

Burés (1997) menciona que la adición de un material grueso no aumenta la porosidad interparticular con respecto a los materiales por separado; sin embargo, se puede aumentar esta porosidad si uno o más materiales tienen poros internos, puesto que éstos no se ven afectados por el empaquetamiento de las partículas. Por lo tanto, la importancia del tamaño de las partículas radica en que éste define el tamaño de los poros situados entre ellas.

En el Cuadro 1 se muestran valores “ideales” de propiedades físicas de los sustratos según Zapata *et al.* (2005) y Nappi y Barberis (1993).

Cuadro 1. Valores “ideales” de propiedades físicas de sustratos.

Propiedades	Zapata <i>et al.</i> (2005)	Nappi y Barberis (1993)
Densidad aparente (g cm ⁻³)	< 0.4	0.15 – 0.50
Densidad real (g cm ⁻³)	1.45 – 2.65	1.50
Porosidad (%)	> 85	85 – 90
Agua fácilmente disponible (%)	20 – 30	20 – 30
Agua difícilmente disponible (%)	25 – 31	60 – 75
Agua de reserva (%)	4 – 10	4 – 10

2.2.2 Densidad real

La densidad real (D_r) se define como el cociente entre la masa de las partículas del sustrato y el volumen que ocupa, sin considerar a poros y huecos; ésta no depende del grado de compactación ni del tamaño de partícula (Ansorena, 1994). Las sustancias minerales pueden presentar valores de densidad real de 2.65 g mL^{-1} , mientras que los compuestos orgánicos presentan valores promedios de 1.50 g mL^{-1} . Hay una discusión sobre este tema, ya que algunos autores consideran a la D_r como el peso del material entre el volumen que ocupa, excluyendo aquellos huecos ocupados por aire o agua; mientras que otros autores (Burés, 1997) consideran que la D_r se entiende como el cociente entre el peso del material y su volumen correspondiente, incluyendo aquellos poros cerrados. Estas diferencias de términos pueden causar un error cuando se determina esta propiedad; la primera consideración propone que el material al que se le va a determinar la D_r sea triturado; la segunda, menciona que el material no debe ser modificado para no alterar sus propiedades al momento de hacer dicha determinación.

2.2.3 Densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre la masa o peso de las partículas y el volumen aparente que ocupan, es decir, incluyendo al espacio poroso total. El volumen aparente es el volumen ocupado por un sustrato considerando materiales sólidos y los poros internos y externos, tanto abiertos como cerrados (Burés, 1997). La densidad aparente

tiene relación directa con la porosidad del material; es decir, si se ejerce una presión sobre un sustrato, disminuirá el volumen de poros; al disminuir el volumen total, aumenta la densidad aparente (Ansorena, 1994). La reducción del tamaño de poros, producida por la compactación del sustrato, hace que disminuya la porosidad ocupada por aire y aumente la retención de agua (Cuadro 2).

Nappi y Barberis (1993) indican que valores altos de densidad aparente implican un incremento en el peso del sustrato y disminución de la porosidad y volumen de aire; mientras que bajas densidades son causa de excesiva aireación y disminución de la cantidad de agua disponible para las plantas.

Cuadro 2. Variación de la porosidad, densidad aparente y retención de agua de acuerdo con el grado de compactación.

Nivel de compactación	Porosidad total (%)	Densidad aparente (g mL ⁻¹)	Porosidad de aire (%)	Retención de agua (%)
Nulo	58	1.13	42	16
	54	1.23	37	17
	50	1.33	30	20
	46	1.43	28	18
	42	1.54	24	18
	38	1.64	19	19
Máximo	34	1.74	9	25

Fuente: Ansorena (1994).

2.2.4 Conductividad hidráulica

El conocimiento de las propiedades físicas de los sustratos es fundamental, ya que ayudan a desarrollar de manera eficaz las estrategias de riego y fertilización (Fonteno, 1993).

La conductividad hidráulica es la habilidad del sustrato para transmitir (conducir) el agua (Burés, 1997). Está definida según la ley de Darcy, que describe el flujo de agua a través de un medio poroso en condiciones de saturación; el flujo es directamente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico (caída del potencial hidráulico). La conductividad está en función del contenido de agua del sustrato, de la geometría de sus poros y de las propiedades del fluido; en condiciones de saturación el movimiento del agua es a través de los poros grandes; en cuanto disminuye el contenido de humedad, el movimiento del agua se da por los poros pequeños (Fonteno, 1993).

2.2.5 Retención de agua

Vargas (2007), indica que para suelos agrícolas, la curva de retención de humedad se mide a succiones de 0 a 1.5 MPa, mientras que en sustratos no pueden ser sometidas a estos valores de tensión, por lo que las curvas de liberación de agua se realizan entre 0 y 100 cm de columna de agua (0 a 0.1 MPa). Peñuelas y Ocaño (2000) mencionan que a valores de pF de 4.2 (1600 cm de columna de agua) la planta no puede absorber más el agua.

El concepto de agua disponible incluye tres factores: tipo de planta, condición de la rizósfera y la conductividad hidráulica del sustrato. El tipo de planta incluye la especie y/o cultivar usado, la condición física de la planta, la etapa de madurez, y la distribución de la raíz; la condición de la rizósfera implica el gradiente potencial que existe en la interface sustrato – raíz (Nappi y Barberis, 1993).

De Boodt *et al.* (1974) desarrollaron la curva de liberación de agua para sustratos, fijando los límites de esta curva entre 0 y 100 cm de tensión (Figura 1) y clasificaron el agua en el sustrato de la siguiente manera:

- a) Agua difícilmente disponible (ADD): es el porcentaje de agua en volumen que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm (10 Kpa) de columna de agua.
- b) Agua de reserva (AR): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 (5 Kpa) y 100 cm (10 Kpa) de columna de agua de tensión sobre el sustrato.
- c) Agua fácilmente disponible (AFD): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 10 (1 Kpa) y 50 cm (5 Kpa) de columna de agua de tensión sobre el sustrato.
- d) Capacidad de aire (CA): es el porcentaje en volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cm (1 Kpa) de columna de agua.
- e) Material sólido (MS): es el porcentaje en volumen ocupado por la matriz sólida del sustrato.
- f) Espacio poroso total (EPT): es el espacio de aire y agua, formado por la suma de ADD, AR, AFD y CA que se determina a partir de las densidades real y aparente.

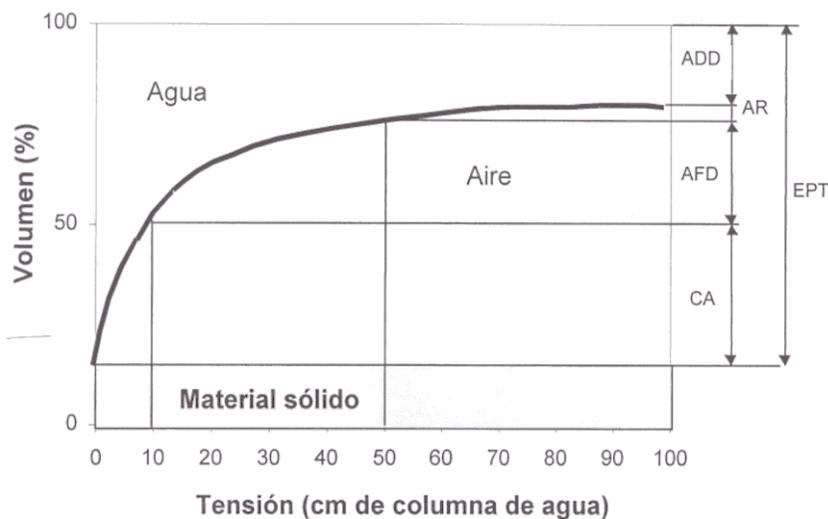


Figura 1. Curva característica de liberación de agua de sustratos (De Boodt *et al.*, 1974).

2.3 Problemática en las determinaciones físicas de sustratos

Uno de los principales problemas que se tienen en la caracterización física de sustratos, es el uso de diversas metodologías, debido a que cada una arroja resultados

diferentes. Al respecto, Ansorena (1994) menciona: “los resultados de análisis de sustratos dependen en gran medida de los métodos utilizados, que son muy variados”.

Es importante señalar que las metodologías usadas para sustratos son las mismas que las utilizadas para suelos o han sido modificadas y adaptadas de éstas (Baumgarten, 2008). Aunque pueden hacerse analogías, los sustratos son diferentes de los suelos; la diferencia principal estriba en la composición de la matriz sólida, que genera un arreglo y configuración distinta en cada caso (Burés, 1997). Los sustratos podrían ser vistos como un equivalente a la zona de la rizosfera donde la densidad de raíces es alta. Las características del sustrato tienen más influencia directa en la planta que en los parámetros similares determinados para suelos (Baumgarten, 2008).

Esta situación lleva a pensar que es necesario probar los métodos y verificar la confiabilidad de los resultados obtenidos, para garantizar datos de calidad, que sirvan para comprender el comportamiento del sistema sustrato tan complejo de estudiar, por las interacciones que se manifiestan entre sus componentes (materiales, naturaleza, tamaño y empaquetamiento de partículas, forma y tamaño del contenedor, requerimientos de la planta, etc.).

2.3 Mezclas de sustratos

Cuando dos materiales de granulometría distinta se mezclan, las partículas más pequeñas llenan los poros situados entre las partículas gruesas, reduciendo el espacio poroso, además del volumen total de la mezcla. El volumen final de las mezclas y sus propiedades son una función no lineal, por lo que es difícil predecir las propiedades de éstas con el simple conocimiento de las partes que lo integran (Burés, 1997).

Por su parte, Cabrera (1999) indica que las propiedades físicas de un sustrato no pueden predecirse en forma sencilla a partir de sus componentes, debido a las interacciones que ocurren entre los materiales que integran las mezclas, provocando

que las propiedades físicas no sean la media óptima de las propiedades de los componentes.

Desde el punto de vista físico, un sustrato consiste en un empaquetamiento de sus partículas constituyentes. El volumen de los componentes de una mezcla es mayor al volumen final de esta, debido a que las partículas de distintos tamaños se empaquetan, de modo que los espacios interparticulares son llenados por las partículas más pequeñas. La reducción del volumen depende de la granulometría de los materiales de manera que cuando mayor sea la diferencia de tamaños, mayor será la reducción del volumen final (Burés, 1997).

Si se combinan dos materiales de diferente granulometría, la máxima reducción de volumen se presenta cuando el material de mayor tamaño de grano se encuentra en la mezcla en una proporción entre 50 y 70% en volumen. Sin embargo, ésta depende de las características de los materiales constituyentes (Burés, 1997).

2.4 Propiedades físicas de sustratos y su relación con el desarrollo de cultivos

Meerow (1994) al evaluar la fibra de coco como sustituto de la turba en dos cultivos ornamentales (*Pentas lanceolata* e *Ixora coccínea*), encontró que el sustrato a base de turba presentó el más alto porcentaje de aire y el más bajo porcentaje de retención de agua al inicio del experimento; sin embargo, al final del experimento los valores se invirtieron, es decir, los valores de porcentaje de aire disminuyeron mientras que los valores de retención de agua se incrementaron. Se pudo observar que la disminución del contenido de aire fue más drástica en la turba que en la fibra de coco. En relación a las variables de productividad de las especies evaluadas se encontraron diferencias en *Pentas lanceolata*, mostrando una mejor respuesta al sustrato de fibra de coco; mientras que en *Ixora coccínea*, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas.

Por su parte, Yahya y Mohd (1997) encontraron diferencias en el contenido de agua en sustratos solos y mezclados. El contenido de agua en el sustrato se incrementó conforme se aumentó la proporción polvo de coco: turba. También encontraron que el sustrato con el mayor porcentaje de porosidad de aire (turba) correspondió al mayor valor de compactación (1.37%), mientras que la proporción 75% polvo de coco: 25% turba, fue la que menor nivel de compactación presentó (0.24%). En las especies de *Zinnia elegans* y *Tagetes erecta* los valores de peso de materia seca y número de flores fueron mayores en cuanto se incrementó la proporción polvo de coco: turba. En *Celosia plumosa* no hubo una tendencia clara, sin embargo, los valores fueron mayores en las mezclas y en polvo de coco que en la turba sola. En *Catharantus roseus* no hubo diferencias significativas. Los valores más altos en número de flores y peso de materia seca correspondieron a los porcentajes más altos de contenido de agua y a los porcentajes menores de compactación. Estos resultados indican la factibilidad de usar a la fibra de coco como sustituto del sustrato a base de turba.

En un estudio realizado para determinar la porosidad, agua disponible y la penetración de raíces en sustrato de corteza de pino en plantas de rábano, *Coleus blumei* y *Vaccinium ashei*, Pokorny y Wetzstein (1984) encontraron que las raíces de las plantas fueron bien ancladas en las partículas de corteza de pino saturada con agua, indicando que las raíces más finas penetraron las partículas y absorbieron el agua contenida dentro de los poros. La porosidad interna de las partículas fue de 42.7% a 44.0%. Concluyeron que la reducción del tamaño de partícula de su tamaño original no afectó la porosidad interna.

El crecimiento de las raíces (pelos radicales) de *Coleus blumei* en la corteza de pino fue abundante, no obstante, disminuyó cuando las partículas se molieron. Las raíces de *Vaccinium ashei* presentaron pocos pelos radicales, casi desprovistas de ellos. Las raíces fibrosas penetraron entre las partículas y, las raíces laterales a menudo se encontraron en áreas superficiales.

Nappi y Barberis (1993) estudiaron las propiedades físicas, densidad aparente, porosidad y disponibilidad de agua en corteza álamo composteada, lodos de aguas urbanas y tallos de uva. Estas propiedades las correlacionaron con las variables peso fresco y materia seca de raíz y tallo y número de flores. La densidad aparente de las compostas estudiadas estuvo en el rango ideal ($0.15 - 0.50 \text{ g cm}^{-3}$). Los dos tipos de turba y la composta de corteza de álamo procesada durante ocho meses tendieron hacia el límite inferior (dentro del rango óptimo) en los valores de densidad aparente. En los sustratos a base de composta, el porcentaje de agua fácilmente disponible estuvo por debajo de los valores ideales (20% – 30%); los dos tipos de turbas estuvieron en el rango ideal. La porosidad total de los sustratos de composta de álamo, composta de tallos de uva + lodos de aguas urbanas y un tipo de turba, presentaron valores óptimos de porosidad total (85% – 90%).

El crecimiento de la especie *Tagetes* en los sustratos de composta y turba, fueron similares; la floración fue mayor en la composta. En *Dieffembachia* la altura de planta fue superior en mezcla de composta (tallos de uva + lodos de aguas urbanas) que en la turba. Los valores de peso fresco y peso seco de *Cucumis* fueron más altos para todas las concentraciones de composta con respecto al control (turba).

García *et al.* (2001) realizaron un estudio en el que evaluaron diferentes sustratos para la producción de dos plantas ornamentales (*Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii*) cultivadas en maceta. En este trabajo se estudiaron las características físicas de los sustratos y se correlacionaron con el rendimiento y calidad del producto. Encontraron que los sustratos que contenían piedra pómez presentaron valores de densidad aparente y densidad real inferiores a aquellos que contenían tezontle en combinaciones con arena. A pesar de encontrar diferencias significativas en porosidad total y retención de humedad en los sustratos, el uso de piedra pómez o tezontle no produjo diferencias mayores que 4% entre estas variables.

La retención de humedad de los sustratos orgánicos y sus combinaciones polvo de coco, composta de jardinería, turba, polvo de coco + composta de jardinería, polvo de coco + corteza de pino, polvo de coco + cascarilla de arroz, polvo de coco + arena y composta de jardinería + arena, estuvieron en rangos de porosidad total, porosidad de aire y retención de humedad de 60% a 80%, de 10% a 30% y de 40% a 60% respectivamente (con base en volumen). El polvo de coco + composta de jardinería y el polvo de coco + arena estuvieron por debajo del mínimo sugerido en la literatura (10%). Los sustratos a base de cascarilla de arroz, además de la turba + agrolita, se aproximaron o rebasaron el límite máximo de 30%.

La especie *Epipremnum aureum* se vio favorecida por el polvo de coco, polvo de coco + corteza de pino composteada y polvo de coco + arena, por arriba del sustrato universal turba + agrolita; por su parte la cascarilla de arroz y la mezcla con 30% de piedra pómez, 30% de polvo de coco y 40% de composta fueron los que presentaron un comportamiento desfavorable.

En *Spathiphyllum wallisii* el mayor rendimiento y calidad se presentó en turba + agrolita, seguido por polvo de coco + arena, turba y polvo de coco. Los resultados de este estudio corroboran la existencia de alternativas viables para la situación tanto de turba (costosa), como de la tierra de monte, en la elaboración de sustratos a usarse en la producción de plantas ornamentales. Comparando con sustratos basados en turba (turba-agrolita y turba), sustratos y combinaciones basadas en polvo de coco, en particular polvo de coco, polvo de coco + arena mineral y polvo de coco + corteza de pino composteada, fueron los más prometedores.

Zapata (2005) halló que la mezcla de corteza de pino composteada con diferentes residuos orgánicos (composta de residuos sólidos urbanos, composta de lodo y lodo granulado) no mejoró el porcentaje de agua fácilmente disponible. Este resultado se le atribuyó a la baja porosidad de la corteza de pino o porque sus poros son grandes y la

mayor parte del agua se pierde por gravedad, o por una combinación de las situaciones anteriores. La capacidad de aireación o espacio de aire se vio favorecida al mezclar los diferentes componentes orgánicos con la corteza de pino composteada.

El porcentaje de agua difícilmente disponible fue bajo en el tratamiento que contenía sólo corteza de pino composteada. En cambio, en las mezclas efectuadas con los materiales orgánicos se observaron valores dentro del rango óptimo, excepto en la mezcla que contenía lodo granulado al 30% que superó el 38% de agua difícilmente disponible, lo que demuestra la escasa capacidad de este material para liberar el agua absorbida.

2.5 Descripción de los materiales utilizados

2.5.1 Fibra de coco

Es un material que se obtiene de mesocarpio del fruto del coco (*Cocos nucifera* L.). Está constituida principalmente por lignina y celulosa. Presenta cualidades que la hacen un posible sustituto del peat moss: alta retención de agua (puede llegar a retener más de 9 veces su peso en agua), excelente drenaje, hidrofílico, buena mojabilidad, ausencia de malezas y patógenos y es un recurso renovable con bajo impacto ambiental (Meerow, 1994). El rango de pH de la fibra de coco es de 5.5 a 6.8. Contiene de 6 a 60 ppm de fósforo, de 170 a 600 ppm de potasio (Robbins & Evans, 2008). El principal problema que presenta es que tiene un alto contenido de Na, K y Cl (Aendekerk *et al.*, 2000).

La fibra de coco forma poros de empaquetamiento compuesto, sobretodo en partículas mayores de 1 mm; cavidades y vesículas en partículas menores que 0.50 mm. Es un material complejo en cuanto su forma, aunque la diversidad de éstas disminuye conforme el tamaño de partícula se reduce (Anicua, 2008).

2.5.2 Piedra pómez

Es un tipo de roca volcánica extrusiva que se forma cuando la lava con un alto contenido de agua y gases es expulsada del volcán. Cuando la lava se enfría y endurece, el resultado es un material ligero y poroso (Robbins & Evans, 2008) que la convierte en la roca con la más baja densidad aparente (0.4 g cm^{-3}). Tiene una baja cantidad de agua fácilmente disponible, especialmente cuando el tamaño de partícula se incrementa (Gunnlaugsson & Adalsteinsson, 1995). Presenta, frecuentemente, coloraciones claras. Ésta coloración indica que contiene un alta cantidad de silicio y bajas cantidades de hierro y magnesio. Tiene baja capacidad de intercambio catiónico, sus valores de pH están entre 6.5 y 8.0 (Aendekerk *et al.*, 2000). La piedra pómez puede ser fácilmente esterilizada con vapor y reutilizada, lo que la convierte en un sustrato económico y de bajo impacto ambiental (Gunnlaugsson & Adalsteinsson, 1995).

Las partículas de la piedra pómez forman poros de empaquetamiento simple, vesículas internas y externas (Anicua, 2008).

2.5.3 Tezontle

Es una roca volcánica extrusiva, con una moderada cantidad de poros. Presenta coloración negra o rojiza. Es un material que retiene una baja cantidad de agua y tiene un pH de 7.0 a 8.0 (Aendekerk *et al.*, 2000). La densidad real y densidad aparente de esta material oscilan entre 2.45 – 2.75 y 0.82 – 1.43, respectivamente (Anicua, 2008).

Las partículas de tezontle forman poros de empaquetamiento simple y vesículas, la formación de mesoporos se presenta en partículas mayores que 0.25 mm. Anicua (2008) encontró que a medida que el tamaño de partícula disminuye los poros vesiculares tienden a desaparecer. Los poros son de tipo irregular, conectados y no conectados.

En México, el tezontle es uno de los materiales inorgánicos más usados en la producción de hortalizas y ornamentales, debido principalmente a su bajo costo y disponibilidad (Anicua, 2008).

2.5.4 Peat moss

El peat moss se forma a partir de la descomposición de musgos y juncos en condiciones de fío y pobre drenaje; además, presenta una alta capacidad de retención de agua y es un material hidrofóbico. Tiene un rango de pH entre 3.5 y 4.3 (Aendekerk *et al.*, 2008; Robbins & Evans, 2008). En la actualidad se está limitando la extracción de este material en los países productores, por ser reservas no renovables y por los costos elevados en los países no productores (Anicua, 2008). En los últimos años los usuarios demandan atención por el impacto ambiental de la producción de materiales para sustratos. En el Reino Unido quieren minimizar el uso de peat moss (Verhagen & Boon, 2008) y buscan usar sustratos que no estén constituidos con este material (“peat free”).

2.6 Análisis de imágenes

Se han realizado análisis de imágenes para cuantificar los poros y los agregados, específicamente en cuanto a su rugosidad. Sin embargo, no se han realizado análisis de imágenes en secciones delgadas para cuantificar las partículas de sustratos (orgánicas e inorgánicas), la distribución de poros y su relación con las variables hídricas.

2.7 Conclusiones de la revisión de literatura

Las propiedades físicas de los sustratos son determinantes en el desarrollo de los cultivos. Se han encontrado correlaciones del tamaño y empaquetamiento de partículas, densidad aparente y porosidad con la disponibilidad de agua para las plantas; no obstante, estas correlaciones no son claras y las tendencias no han sido contundentes. Las metodologías usadas para las determinaciones físicas en sustratos,

son las utilizadas para análisis de suelos y éstas no han sido evaluadas, por lo que se desconoce la reproducibilidad de los resultados.

Es clara la necesidad de realizar mayor investigación, sobre todo en mezclas de materiales para la preparación de sustratos, ya que en general se desconoce el comportamiento de las propiedades resultado de estas mezclas. Las investigaciones realizadas han sido encaminadas al conocimiento de las propiedades físicas de sustratos en forma particular y en pocos casos se considera el tamaño de partícula; se ha trabajado con tamaños a granel y bajo el esquema de ensayo y error para la selección de mezclas de materiales.

Actualmente los trabajos realizados para analizar y determinar el comportamiento de las propiedades físicas de las partículas en mezclas de sustratos para saber si son aditivas, sustractivas o bien si solo promedian sus valores son escasos. Si se determina su comportamiento se pueden realizar mezclas de acuerdo con las necesidades hídricas de las plantas, es decir la capacidad de aire y de retención de humedad que cada una de ellas requiere. Esto facilitaría la generación de mezclas, mayor eficiencia del uso del agua y nutrimentos, y reducción en los costos de producción (de sustratos y del cultivo).

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivo general

Evaluar la metodología de las propiedades hídricas de capacidad de aire y retención de agua en diferentes mezclas de sustratos.

3.2 Objetivos específicos

- a) Analizar las propiedades hídricas (D_a , D_r , retención de agua a 0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua) de sustratos solos y mezclados en diferentes proporciones.
- b) Determinar si las propiedades hídricas (retención de agua y capacidad de aire) en mezclas de sustratos orgánicos – inorgánicos (fibra de coco: piedra pómez y fibra de coco: tezontle) son aditivas, sustractivas o se promedian.
- c) Elaborar mezclas con partículas del mismo tamaño, con diferente forma y composición, para determinar la distribución y porosidad inter e intra partícula.

3.3 Hipótesis

- a) Las propiedades hídricas como retención de agua y capacidad de aire en mezclas de sustratos orgánicos – inorgánicos se promedian.
- b) El porcentaje de macroporos es constante en mezclas de materiales de tamaños y formas iguales.
- c) El porcentaje de microporos en partículas con iguales tamaños está en función de la naturaleza del material (orgánico e inorgánico) y sus proporciones.
- d) Si las mezclas generan resultados reproducibles se podrá generar un modelo de predicción de sus propiedades hídricas.
- e) Si las mezclas producen datos dispersos, la capacidad de aire y retención de agua están en función de la distribución de las partículas orgánicas e inorgánicas.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La parte experimental se realizó en dos fases: la primera consistió en construir un equipo de succión para las determinaciones de las curvas de retención de agua de los materiales, y se realizó la caracterización física de los sustratos utilizados. En la segunda fase, se realizó un experimento con plántulas de lechuga para probar materiales de 1-2 mm de diámetro y las mezclas resultantes.

Las determinaciones hídricas de los sustratos individuales y sus mezclas se realizaron en el laboratorio de Génesis Morfología y Clasificación de Suelos del Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

4.1 Construcción del equipo de succión con embudos de placa filtrante

Con base en el diseño elaborado por de Boodt *et al.* (1974) para obtener la curva de retención de agua de sustratos orgánicos, se construyó un equipo para determinar las relaciones agua – aire en las mezclas de materiales para sustratos. Se realizaron algunas modificaciones en cuanto a materiales para su construcción.

El equipo propuesto consta de un sifón conectado a una serie de embudos, en los cuales es depositada la muestra de sustrato a estudiar. El sifón cuenta con llaves de paso a diferentes alturas (10, 20, 30, 50 y 100 cm), que son las tensiones a las que se somete la muestra.

Para la construcción de equipo se utilizaron materiales de PVC, tubos, llaves de paso, T's y codos de ½" de diámetro, pegamento para PVC y embudos Buchner de porcelana de 10 cm de diámetro interior (Figura 2).

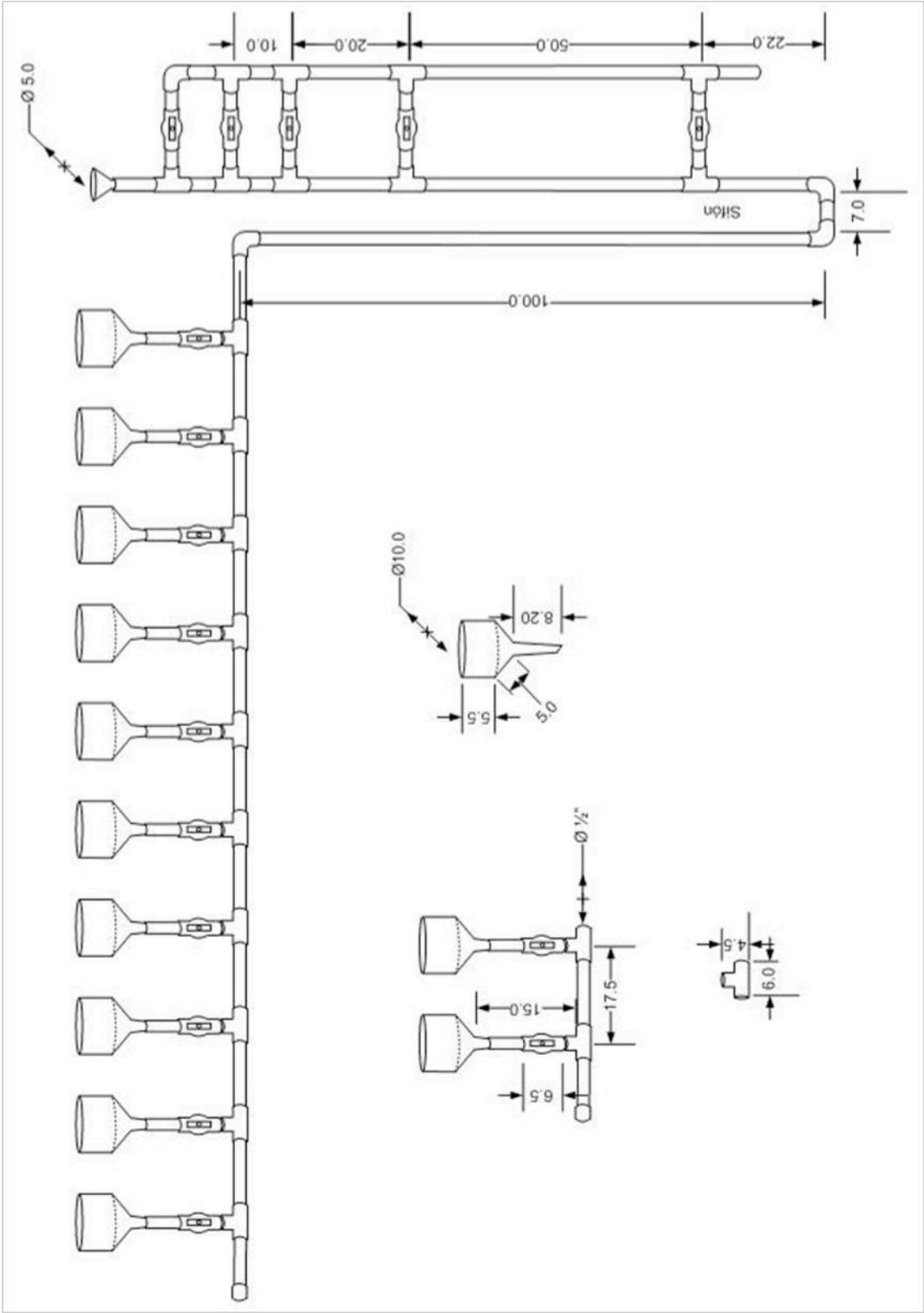


Figura 2. Diseño del equipo para determinación de la curva de retención de agua de sustratos.

Se cortaron los tubos de acuerdo con las dimensiones que se muestran en la Figura 2, y se lijaron los extremos de éstos, con el fin de asegurar una buena unión al momento de pegar. La unión se hizo con pegamento para PVC; ésta se llevó a cabo por partes para permitir que el pegamento secase. Una vez que se terminó de pegar, se procedió a fijar el equipo, con abrazaderas de hierro tipo omega, a una mesa de laboratorio.

4.2 Materiales empleados para las mezclas

Se emplearon tres materiales para las mezclas de los sustratos: fibra de coco (FC), piedra pómez (PP) y tezontle (T). Los factores de estudio fueron proporciones de mezclas y tamaños de partícula. Se trabajó con dos tamaños de partícula: 1 – 2 y de 2 – 3.36 mm de diámetro. Las proporciones (en % de volumen) fueron 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0 FC: PP y FC: T, respectivamente.

4.3 Análisis físico de sustratos

Para la caracterización de los materiales se utilizó la metodología para análisis de sustratos propuesta por Warncke (1988), modificada por Ansorena (1994). Se hicieron determinaciones de densidad aparente, densidad real y porosidad; se generaron las curvas de retención de agua con succiones de 0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua; se realizaron análisis morfológico a través de secciones delgadas y análisis de imágenes para caracterizar forma y distribución de poros internos y externos para relacionarlos con retención de agua, capacidad de aire y desarrollo del cultivo de lechuga.

4.3.1 Granulometría

Los materiales se hicieron pasar por tamices de 3.36, 2.0 y 1 mm de diámetro; el material que pasó el tamiz de 3.36 y que se detuvo en el de 2.0 mm formó el tamaño de 2-3-36 mm y el que pasó por los orificios de 2.0 mm y se detuvo en la apertura de 1.0 mm formó el tamaño de 1-2 mm. El material se colectó en bolsas de plástico para su posterior caracterización física.

4.3.2 Densidad aparente

La densidad aparente se determinó a un volumen conocido del sustrato secado en estufa a 80°C hasta peso constante (Beardsell *et al.*, 1979). Una vez seco el material, se pesaron 10 g de sustrato, se agregó a una probeta de 100 mL de capacidad, se le dieron tres golpes suaves a la probeta sobre una mesa para lograr un acomodo uniforme del material, posteriormente se midió el volumen ocupado.

4.3.3 Densidad real

Se pesó un matraz aforado de 100 mL (P_m), se añadió una cantidad de sustrato secado a 105° C durante 24 horas y se pesó nuevamente (P_s). La cantidad de sustrato añadido fue un tercio del volumen del matraz.

Se añadió agua destilada y hervida hasta aproximadamente la mitad del volumen del matraz; el agua se vertió de manera que no quedaran partículas adheridas a las paredes. Después de 24 horas de reposo, para expulsar el aire, se hirvió lentamente el contenido del matraz durante unos minutos y se agitó suavemente para evitar la pérdida de sustrato por formación de espuma. Se enfrió y se enrasó con agua destilada previamente hervida y enfriada a 20° C. Se secó el exterior del matraz y pesó (P_{sa}), posteriormente se vació y limpió.

El matraz se llenó hasta la mitad del volumen con agua destilada y hervida. Se puso en baño termostático a 20° C, y se enrasó con agua destilada y hervida, enfriada a 20° C. Cuando el contenido se sacó del baño termostático, se secó el exterior del matraz y se pesó (P_a). Los valores de la densidad real de los sustratos se obtuvieron con la fórmula siguiente:

$$D_r = d_a(P_s - P_m) / (P_s - P_m) - (P_{sa} - P_a)$$

Donde:

D_r = Densidad real.

d_a = Densidad del agua a 20° C.

4.3.4 Curvas de retención de agua

La determinación de las curvas de retención de agua se realizó a través un equipo de succión, con embudos de placa filtrante de porosidad No. 4.

Se tomó una muestra representativa de los sustratos para determinar el contenido de humedad. Se enumeraron y pesaron los embudos. Se pesó la cantidad de sustrato a depositar en el embudo (aproximadamente 3 cm de altura en el embudo). Se saturó la muestra, añadiendo agua al sistema de tubos durante 24 horas. Tras saturar las muestras se procedió a tapar los embudos con plástico adherible y se sujetaron con ligas. Se procedió a abrir la primera llave del sifón (succión a 10 cm). La succión se mantuvo por 12 horas, después se procedió a cerrar las llaves de paso situadas bajo los embudos y se retiraron los embudos del sistema. Se pesaron y se registraron los pesos de cada embudo. Se volvieron a colocar los embudos en el sistema de succión, se rellenó con agua el sistema de tubos, se taparon los embudos con el plástico adherible y se abrió la siguiente llave del sifón (50 cm) dejándola en succión durante 12 horas. Posteriormente, se retiraron los embudos, se pesaron y registraron los pesos. Este proceso se repitió para la succión a 100 cm.

4.3.5 Secciones delgadas

Se hicieron secciones delgadas de las mezclas de los materiales utilizados; cada material se depositó en tubos de PVC de 7.5 cm de largo y 5.5 cm de diámetro. Las muestras se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero de estireno en una relación 7:3; posteriormente se dejaron en gelación a la sombra por un lapso de 30 días. Una vez endurecidas se procedió a cortarlas con un disco de punta de diamante, se pulieron con abrasivos de carburo de silicio

(carborondum) y óxido de aluminio (aloxita) hasta tener un espesor de 30 μm y se fabricaron las secciones delgadas de 5 x 7.5 cm.

4.3.6 Análisis de imágenes

Se realizaron secciones delgadas, con el fin de analizar la distribución de partículas, porosidad intra e interpartícula de las mezclas de sustratos y de los materiales individuales. De cada lámina se obtuvieron 9 fotografías de microscopio a 2x, las imágenes fueron distribuidas en toda la lámina para obtener representatividad de la misma.

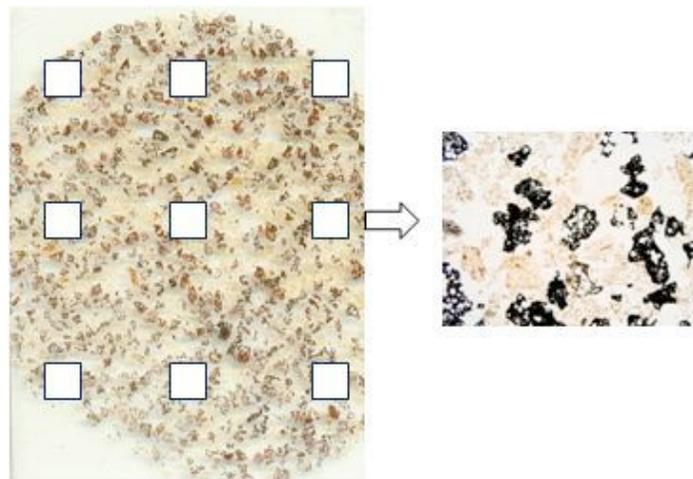


Figura 3. Distribución de fotografías de microscopio en la sección delgada.

Las imágenes obtenidas fueron procesadas en el programa Image Pro Plus versión 5.0. A continuación se detalla el procedimiento para obtener la porosidad de las secciones delgadas.

Se abrió la imagen deseada desde el programa Image Pro Plus versión 5.0. Antes de comenzar a trabajar sobre ésta, se editó para tener contraste entre partículas y espacios vacíos (poros), después se procedió a obtener una copia de la misma imagen, con el fin de trabajar sobre una de ellas y comparar con la original (Figura 4).

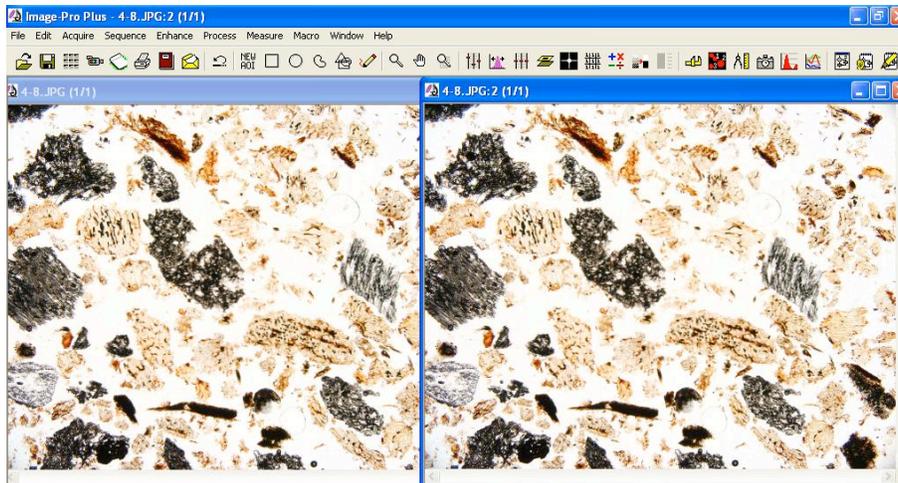


Figura 4. Edición de imagen para obtener contraste entre poros y partículas.

En el menú *process* se seleccionó *segmentation* (Figura 5).

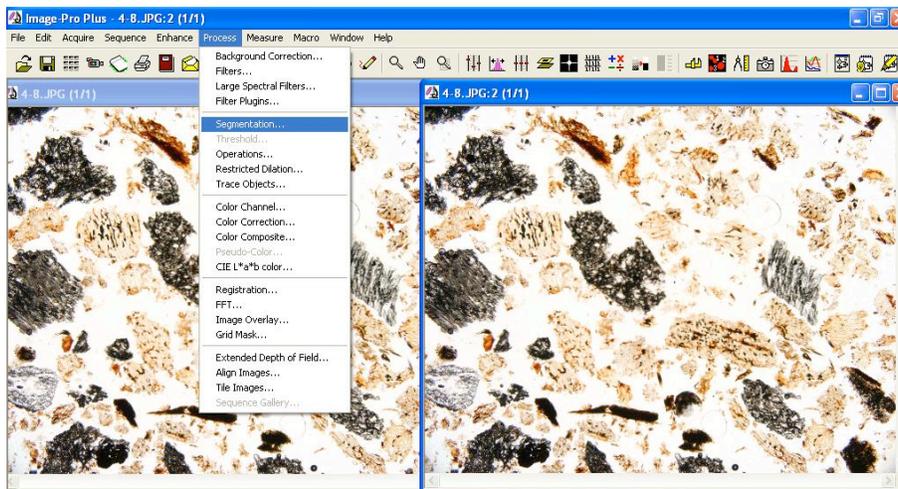


Figura 5. Segmentación de la imagen.

Una vez seleccionado *segmentation*, en el cuadro desplegado se seleccionó el color a asignarle a los espacios vacíos (poros). También se seleccionó el canal al que se le asignó dicho color (R, G o B), en este caso fue seleccionado el canal "R" (Figura 6).

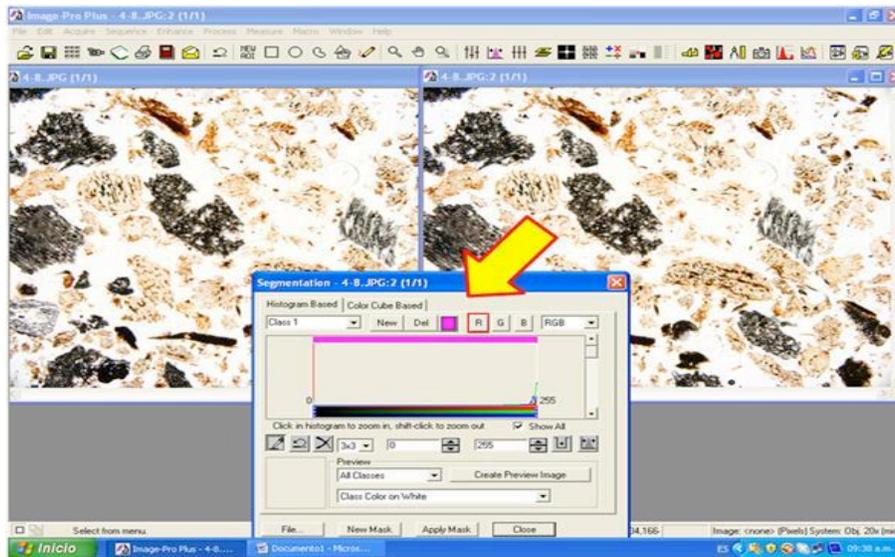


Figura 6. Asignación de colores a los componentes de la imagen.

Se activa el tintero para proceder a seleccionar las áreas blancas de la imagen, correspondientes a poros (Figura 7).

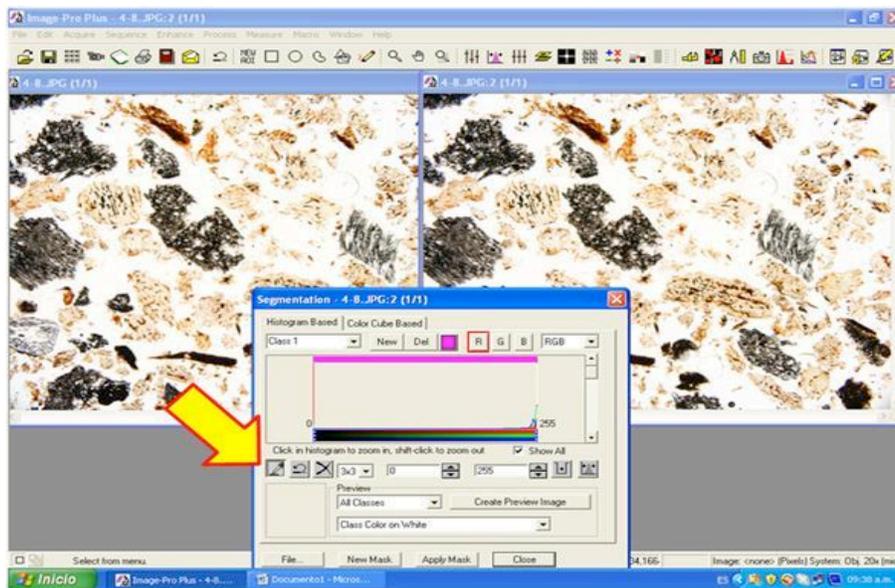


Figura 7. Activación del tintero.

Se seleccionaron los espacios en la imagen que presentaban color blanco, verificando en la imagen original que todos los espacios con ese color estuvieran incluidos (Figura 8).

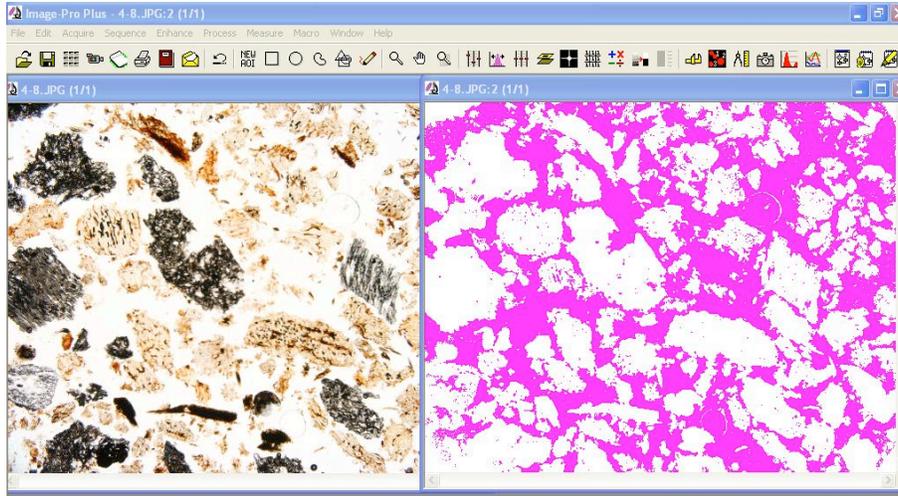


Figura 8. Selección de espacios vacíos para cuantificar porosidad.

Una vez que se terminó de seleccionar todos los poros, se registraron los valores del rango asignado por el programa para el color de selección (X1 y X2), con los cuales se obtiene el porcentaje de área que ocupan las secciones coloreadas (Figura 9).

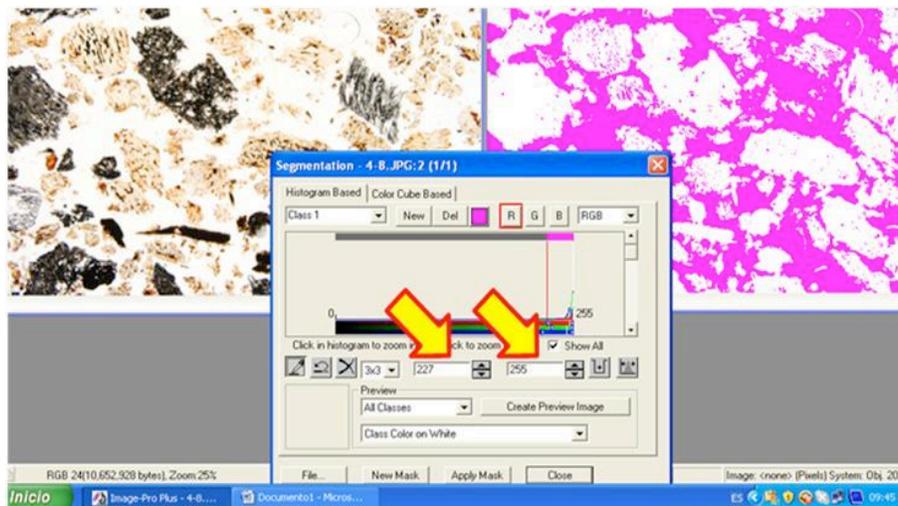


Figura 9. Registro de valores X1 y X2.

Se activó el ícono del histograma. Una vez que se desplegó el cuadro del histograma, se procedió a ubicar los valores del rango registrado en el paso anterior. Esto se hace moviendo las líneas en la gráfica hasta ajustar a los valores de X1 y X2, designadas para el canal "R" (Figura 10).

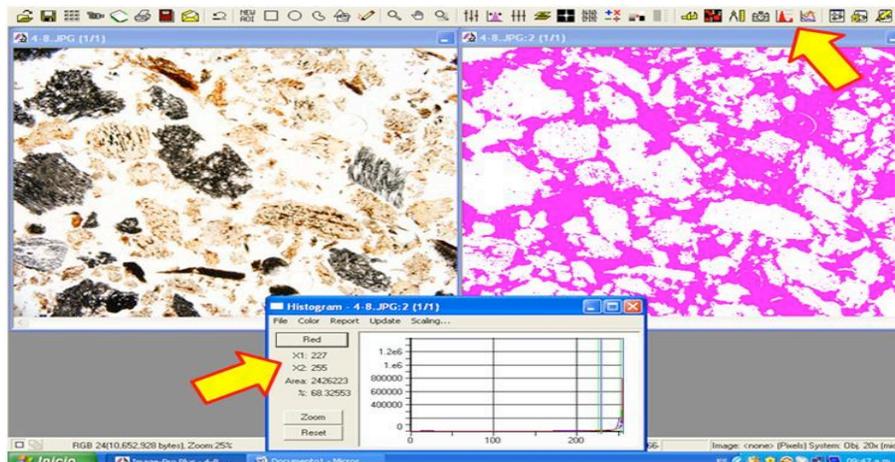


Figura 10. Ajuste de valores de X1 y X2 en el histograma.

Cuando se ajustaron las líneas del histograma a los valores de X1 y X2, el programa mostró el valor en % de área de la imagen seleccionada como espacios vacíos y que corresponde a la porosidad (Figura 11).

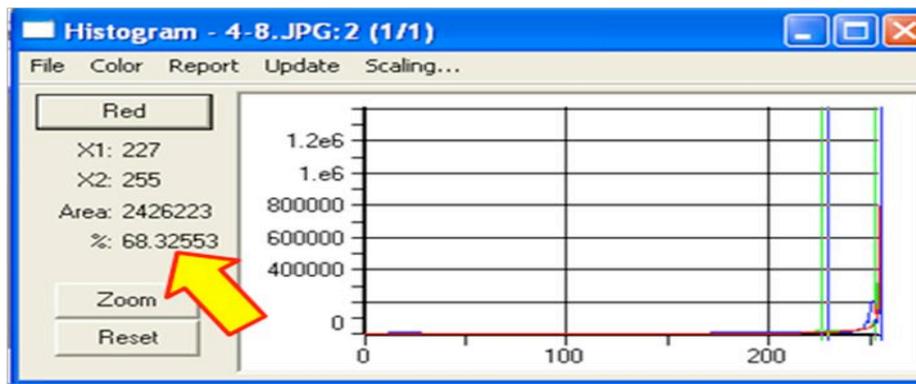


Figura 11. Obtención del porcentaje de poros de la imagen.

Este procedimiento se repitió para las 9 imágenes de cada sección delgada.

4.4 Experimento con planta

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de doble capa de vidrio del Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Texcoco.

Se trabajó con plántula de lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Summertime. Se utilizaron cuatro materiales como bases de sustrato: fibra de coco, piedra pómez, tezontle y peat moss; este último fungió como testigo. El tamaño de partícula fue de 1–2 mm de diámetro.

4.4.1 Diseño de tratamientos

Se utilizaron tres proporciones de mezclas (25:75, 50:50 y 75:25 FC:T y FC: PP, respectivamente) que generaron seis mezclas y los materiales individuales; teniendo un total de 10 tratamientos.

En el Cuadro 3 se presentan los tratamientos con los materiales y las proporciones de mezclas utilizadas.

Cuadro 3. Componentes de sustratos y sus proporciones de las mezclas.

Tratamiento	Materiales	Proporción
T1	fibra de coco-piedra pómez	25:75
T2	fibra de coco-piedra pómez	50:50
T3	fibra de coco-piedra pómez	75:25
T4	fibra de coco-tezontle	25:75
T5	fibra de coco-tezontle	50:50
T6	fibra de coco-tezontle	75:50
T7	Fibra de coco	100
T8	Piedra pómez	100
T9	Tezontle	100
T10	Peat moss (Testigo)	100

Se utilizaron charolas de germinación de poliestireno expandido con cavidades de 20 mL de capacidad; cada unidad experimental se conformó de 25 plántulas, con 4 repeticiones. En total se tuvieron 40 unidades experimentales.

Las variables respuesta fueron: días a germinación, porcentaje de germinación, altura de plántula, peso de materia fresca y seca de la parte aérea de la planta y peso de materia fresca y seca de raíz. Se evaluaron dos variables extras, distribución de raíces en el cepellón y daños por hongos. También se determinó contenido de humedad de los sustratos al momento de la extracción de la planta del contenedor (24 horas después del último riego).

4.4.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño en bloques completamente al azar (cuatro bloques), considerando como factor de bloqueo altura de invernadero y nivel de ventilación (Cuadro 4).

Cuadro 4. Ubicación de tratamientos dentro de los bloques.

BLOQUE I		BLOQUE II		BLOQUE III		BLOQUE IV	
3	10	2	10	4	7	4	1
9	1	6	7	8	9	7	9
6	7	1	5	10	1	3	5
2	4	4	9	3	6	8	10
5	8	3	8	5	2	6	2

4.4.3 Conducción del experimento

Se tamizaron los materiales con tamices de 1 y 2 mm de diámetro; el material que pasó por el tamiz de 2 mm y que se detuvo en el de 1 mm se recolectó en bolsas de plástico. Se desinfectaron los materiales con formol comercial diluido en agua a una proporción 1:50. Para asegurar homogeneidad en las proporciones de materiales en las mezclas, se midieron los volúmenes correspondientes y éstos fueron pesados para cada uno de las cavidades en las charolas de germinación.

La siembra se realizó el 6 de octubre de 2008. Se efectuó un riego de 5 mL por planta por día. Para garantizar que cada tratamiento recibiera la misma cantidad de agua, se utilizó un repipet para dosificar. Se realizaron aplicaciones dos veces por semana de Bayfolan® (fertilizante foliar) a razón de 2 mL por litro de agua.

El experimento finalizó a los 40 días después de la siembra (16 de noviembre). Se extrajeron las plántulas de las cavidades para observar desarrollo de raíces y grado de formación del cepellón. Se cortaron las plántulas (se separó la raíz de la parte aérea de la planta) y se pesaron para obtener el peso de materia fresca. Posteriormente, se pusieron a secar en una estufa durante 24 horas a 80 °C, hasta peso constante, para obtener peso de materia seca.

Para conocer la distribución de raíces en el cepellón, se extrajeron tres plantas de cada unidad experimental y se seccionaron en tres los cepellones. Se separaron las raíces del sustrato y se obtuvieron los pesos de materia fresca y materia seca.

V. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos planteados se abordan en el apartado respectivo.

En el primer apartado se reporta la primera fase de investigación en la que se construyó un equipo para la determinación de curvas de retención de agua de sustratos de acuerdo con el diseño elaborado por de Boodt *et al.* (1974). Aquí se discute sobre los problemas encontrados en la elaboración del equipo y como se solucionaron estos detalles técnicos para lograr un adecuado funcionamiento del sistema de succión.

De la segunda fase se presenta la caracterización física de los sustratos con los que se trabajó en la investigación. Se incluyen láminas de secciones delgadas de las mezclas generadas y de los materiales individuales, como una herramienta que ayuda a interpretar el comportamiento de las relaciones agua - aire de los sustratos. Se presentan los resultados del experimento con plantas de lechuga (*Letuca sativa* variedad Summertime) que se realizó del 6 de octubre al 16 de noviembre de 2008, en el que se probaron mezclas de fibra de coco - piedra pómez, fibra de coco – tezontle, los materiales individuales y peat moss como testigo, con partículas de 1-2 mm de diámetro.

5.1. Construcción del equipo de succión con embudos de placa filtrante

En la Figura 12 se muestra el equipo de succión construido en el laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos del Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados.



Figura 12. Equipo de succión con embudos de placa filtrante.

El procedimiento para la determinación de las curvas de retención de humedad de sustratos, especifica que los embudos deben ser desmontados del sistema de tensión (sifón con llaves de paso) una vez que se alcanza el equilibrio de la tensión en curso.

El sistema de tensión debe estar sellado una vez que se pone a funcionar. En el diseño original se menciona que se deberá sellar los embudos con parafilm; sin embargo, también se pueden utilizar otro tipo de materiales; por ejemplo, Ansorena (1994) muestra una imagen en la que se observa el uso de caucho. En las casas comercializadoras de material para laboratorio, no se encontraron tapas de caucho de las dimensiones del embudo (10 cm de diámetro), por lo que se probaron otras opciones. Se probó con unicel (poliestireno expandido) recortado con diámetro ligeramente mayor al de los embudos para lograr que ajustaran; sin embargo, se presentaron fugas que se observaron al momento de poner en funcionamiento el equipo. También se observó que al colocar la tapa de unicel en el embudo, ésta ejercía una presión de aire sobre el sustrato, situación que se consideró como una posible

fuente de error en las mediciones, ya que esta fuerza iba a “empujar” el agua del sustrato y con esto provocar un drenado mayor a la succión ejercida por el sistema de tensión (sifón).

Las uniones entre el vástago del embudo y el tubo presentaron fugas las cuales no se podían sellar con pegamento debido a que los embudos deben ser desmontados del equipo para realizar las mediciones. La manguera de látex fue uno de los materiales probados, sin embargo, no resultó un material práctico, ya que para desmontar los embudos del equipo, se requería aplicar una fuerza excesiva que ocasionaba movimiento del sustrato y posibles modificaciones en sus propiedades de retención de agua.

Otro material que se probó fue el plástico adherible (película adherible); con éste se taparon los embudos y se sellaron las uniones del vástago de los embudos y los tubos que van conectados a las llaves de paso. Para asegurar el sellado, se usaron ligas sobre el plástico del embudo. Al poner en succión el sustrato, la película adherible se hundió. En las tensiones de 50 y 100 cm de columna de agua, la película plástica se hundió hasta tocar el sustrato; este hecho llevó a colocar doble capa de plástico para evitar una posible ruptura del mismo al tocar las partículas puntiagudas como las de tezontle y piedra pómez. El hundimiento del plástico se usó como indicio de que no había fugas, por lo que se infirió que el equipo funcionaba correctamente.

Finalmente, se decidió utilizar el plástico adherible para el experimento ya que con éste se logró sellar el sistema de tensión (Figura 13).



Figura 13. Embudos tapados con película plástica adherible.

Otro problema que se presentó fueron los poros de los embudos. La base de los embudos presenta orificios, por los que pasaban las partículas más pequeñas de los materiales utilizados (partículas < 1 mm de diámetro). Para solucionar este problema se utilizó papel filtro recortado al tamaño de los embudos. El papel utilizado fue el que se usa para las cafeteras, debido a que los filtros comerciales resultaron demasiado gruesos y podrían representar un problema para la succión del sistema, además de elevar los costos de los análisis.

5.1.1 Observaciones

En el diseño original del sistema de succión con embudos de placa filtrante, no se especifican dimensiones de separación entre embudos, por lo que se decidió colocarlos a una distancia tal que permitiera maniobrar en el momento de las determinaciones. No se especifican los materiales que se deben usar, por lo que se utilizaron tubos de PVC y embudos de porcelana. Ansorena (1994) muestra una imagen de un equipo de succión que se encuentra en la Facultad de Agronomía de Gante, Bélgica, en el que se aprecia que los embudos utilizados son de vidrio. No se hallaron embudos de las

dimensiones exactas que se especifican en el diseño original; sin embargo, los utilizados son de dimensiones cercanas.

La metodología propuesta por de Boodt *et al.* (1974) especifica que el sustrato debe permanecer en saturación durante 24 horas, transcurridas, se abre la llave correspondiente para poner en succión al sustrato. Para el caso de la fibra de coco fue necesario dejar en saturación por 48 horas o más.

Los materiales inorgánicos no presentaron problemas de saturación, sin embargo, en fibra de coco y en las mezclas se presentaron problemas de mojabilidad y saturación. Este efecto se notó más en las mezclas con partículas < 1-2 mm de diámetro y en las mezclas con los valores más altos de material orgánico (fibra de coco) respecto al inorgánico (pómez o tezontle). La saturación de la fibra de coco y de las mezclas se realizó con un atomizador (Figura 14), ya que agregando el agua en forma de chorro, la fibra de coco flotaba y se tardaba más en saturar. Se observó que a medida que el material estaba más seco, la saturación se realizaba de manera más lenta.



Figura 14. Saturación de la fibra de coco en partículas < 1mm \varnothing con el uso de piseta, para incrementar el nivel de mojabilidad del material.

Se presentaron problemas de uniformidad de mezcla, con mayor efecto en las proporciones 50:50 y 75:25 (FC: PP y FC:T). Landis (1990) menciona que la homogeneidad de mezclado es difícil de lograr debido a diferencias en la densidad, tamaño de partículas y contenido de humedad de los componentes. Para mejorar la homogeneidad se pueden humedecer los materiales antes de realizar la mezcla (Beardsell *et al.*, 1979).

En las determinaciones de densidad real la fibra de coco flotó cuando se agregó el agua al matraz, por lo que se asume que el aforo, no fue preciso (Figura 15).



Figura 15. Determinación de densidad real en mezcla de fibra de coco-tezontle con material triturado. Puede observarse como se sedimentó el tezontle y la fibra de coco flotó, lo cual pudo haber ocasionado error en la lectura al aforar.

En las mezclas con partículas de 1-2 mm y de 2-3.36 mm \varnothing , la fibra de coco no flotó como en el material triturado (Figura 16).



Figura 16. Determinación de densidad real en mezcla de fibra de coco-piedra pómez con partículas de 1-2 mm \varnothing .

5.2 Caracterización física de materiales

5.2.1 Densidad aparente

La densidad aparente es el factor más importante en la determinación de las propiedades físicas y químicas de sustratos y el volumen constituye la base para su manejo (Park *et al.*, 2004).

Los resultados obtenidos demostraron que la densidad aparente de los sustratos evaluados estuvo en función del tamaño de sus partículas, naturaleza del material y de la proporción de mezcla, la cual es mayor en partículas de menor tamaño (Cuadro 5). Tal es el caso del material orgánico (fibra de coco), mismo que al incrementar su proporción con respecto al inorgánico (pómez o tezontle), su densidad aparente disminuyó (Figura 17).

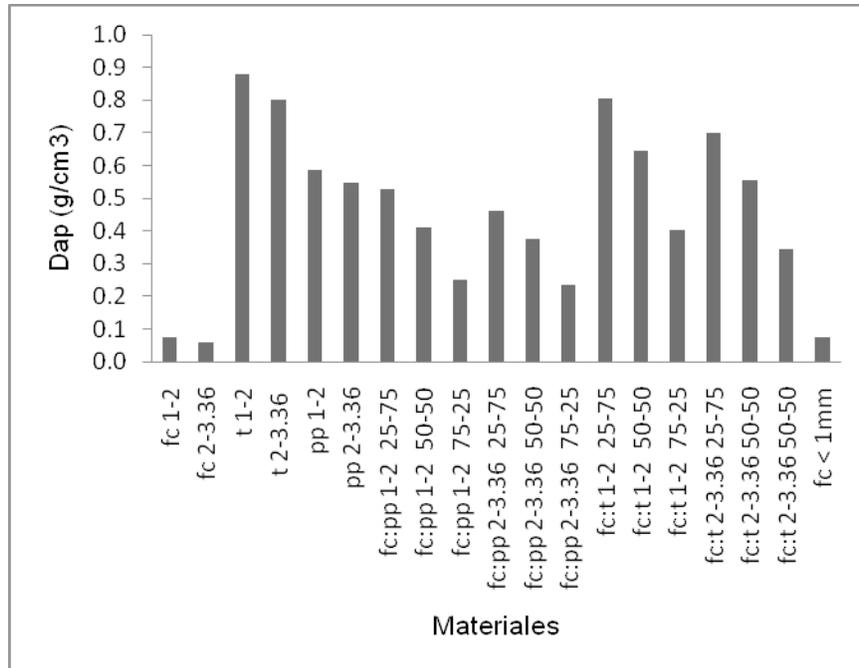


Figura 17. Comportamiento de densidad aparente de los sustratos en función de proporción de mezcla y tamaño de partículas.

El tezontle con partículas de 1-2 mm de diámetro fue el que presentó el valor más alto de densidad aparente (0.88 g cm^{-3}), mientras que la fibra de coco con partículas de 2-3.36 mm presentó la densidad aparente más baja (0.05 g cm^{-3}).

En el Cuadro 5 se muestran los valores de densidad aparente, densidad real y espacio poroso total (EPT) de las mezclas y de los materiales individuales.

Cuadro 5. Densidad aparente, densidad real y espacio poroso total de los sustratos utilizados.

Sustrato	dap (g cm ⁻³)	Dr (g cm ⁻³)	EPT
FC 1-2	0.0765	1.5	94.9
FC 2-3.36	0.0583	1.47	96.03
T 1-2	0.8809	2.71	67.49
T 2-3.36	0.8005	2.71	70.46
PP 1-2	0.5856	1.92	69.5
PP 2-3.36	0.5476	1.72	68.16
FC:PP 1-2 25-75	0.5296	2.29	76.87
FC:PP 1-2 50-50	0.4109	2.22	81.49
FC:PP 1-2 75-25	0.2504	2.11	88.13
FC:PP 2-3.36 25-75	0.4609	-	79.87
FC:PP 2-3.36 50-50	0.3743	-	83.14
FC:PP 2-3.36 75-25	0.2345	-	88.89
FC:T 1-2 25-75	0.8056	2.7	70.16
FC:T 1-2 50-50	0.6458	2.68	75.9
FC:T 1-2 75-25	0.4040	2.07	80.48
FC:T 2-3.36 25-75	0.6992	-	74.1
FC:T 2-3.36 50-50	0.5547	-	79.3
FC:T 2-3.36 75-25	0.3426	-	83.45

5.2.2 Densidad real

Con base en las recomendaciones de Ansorena (1994) y Anicua (2008), se hicieron pruebas para determinar la variación de la densidad real en diferentes tamaños de partícula del material. Los tamaños de partícula empleados fueron: triturado, de 1 – 2 mm y de 2 – 3.36 mm de diámetro (Figura 18). Teóricamente no debía haber variaciones, dado que la densidad real es definida como la relación de la masa o peso del material y el volumen real que ocupa, sin considerar la porosidad total (interna y externa, abierta y cerrada). Hay una discusión (contradictoria) a cerca de esta definición. Al respecto Burés (1997), define a la densidad real como la relación entre la masa o peso de las partículas y el volumen real que ocupan, éste es el volumen ocupado por la materia sólida del sustrato incluyendo los poros internos cerrados.



Figura 18. Determinación de densidad real en piedra pómez con el método del matraz aforado. A) Material triturado, B) 1-2 mm y C) 2-3.36 mm.

En una de las definiciones de densidad real, la medición del volumen excluye la porosidad total, mientras que en otra, se excluye únicamente a la porosidad abierta; por lo que en la práctica se obtienen resultados diferentes según la definición empleada.

Al triturar las partículas de los materiales se destruye la porosidad cerrada y el agua que se le agrega al sustrato en el matraz, tiene libre acceso a los espacios vacíos entre partículas. Si la determinación se realiza en materiales de partículas grandes (>1 mm de diámetro), el agua no tiene acceso a los poros cerrados, por lo que los valores de densidad real son menores, este efecto es más grande en cuanto la porosidad cerrada es mayor.

En la Figura 19 se muestran los resultados de densidad real de la piedra pómez y tezontle en sus diferentes tamaños obtenidos mediante una variante del método de picnometría, con el uso de matraz aforado de 100 mL (Ansorena, 1994 y Burés, 1997).

Se aprecia de manera tangible el efecto del tamaño de partícula en los valores de densidad real: a menor tamaño de partícula, mayor densidad real. Para el caso del

tezontle, sus valores variaron de 2.7 g cm^{-3} para partículas de 2 – 3.36 mm a 2.9 g cm^{-3} con material triturado (polvo). La piedra pómez presentó variaciones mayores, de tal manera que el material con partículas de 2 – 3.36 mm presentaron una densidad real de 1.1 g cm^{-3} , mientras que en el triturado, sus valores se incrementaron hasta 2.4 g cm^{-3} .

En piedra pómez es más importante el efecto que en tezontle, esto puede deberse a la mayor presencia de poros en la piedra pómez, en la que al disminuir el tamaño de partícula, su nivel de poros internos decrece y favorece el acceso de agua entre las partículas. También puede deberse a una mayor presencia de poros cerrados en la piedra pómez que en tezontle, lo que ocasiona una mayor variación en los valores en los tres tamaños de partícula.

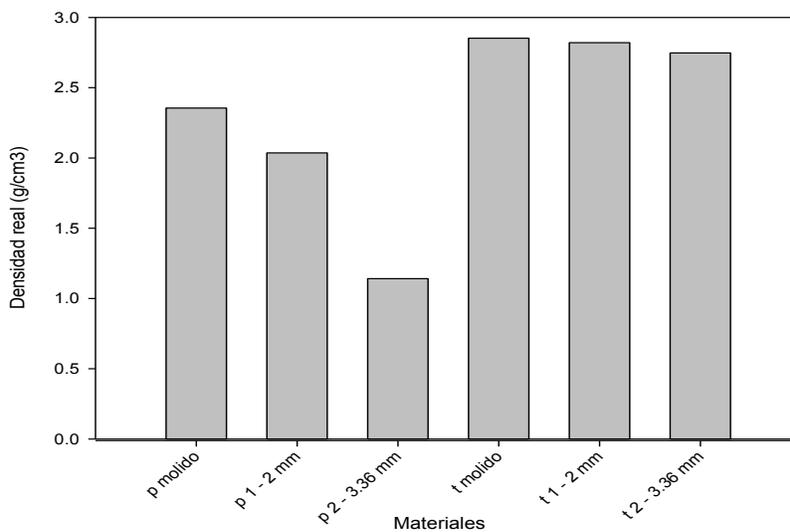


Figura 19. Comportamiento de la densidad real en piedra pómez y tezontle en diferentes tamaños de partícula.

Ansorena (1994) y Anicua (2008) mencionan que la determinación de la densidad real es más precisa en tanto se disminuye el tamaño de partícula, debido a que se disminuyen los poros internos (abiertos y cerrados), que permite un libre acceso del agua en los poros del material. Las determinaciones de D_r se realizaron en partículas de 1-2 mm de diámetro.

En las mezclas de materiales a medida que se incrementó la proporción de fibra de coco respecto a piedra pómez o tezontle, la densidad real disminuyó. Este efecto es más notorio en la mezcla con piedra pómez. En las mezclas de fibra de coco – tezontle las diferencias de densidad real son mínimas, aunque sigue la misma tendencia (Figura 20).

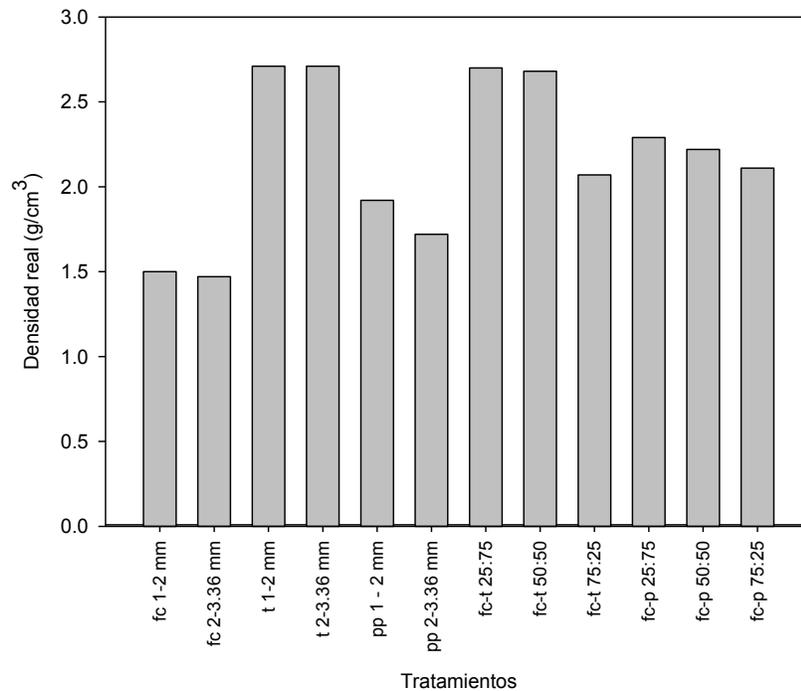


Figura 20. Comportamiento de la densidad real en mezclas de materiales en diferentes tamaños de partícula.

5.2.3 Distribución de partículas

Se realizó el análisis y determinación de porosidad de las mezclas con el software Image-Pro Plus versión 5.0. En el Cuadro 6 se presentan los resultados de este análisis. La distribución de partículas en las mezclas presentó variación dentro de la misma lámina, esto se observa en la variabilidad de los valores de porosidad que se muestran en el Cuadro 6.

En la mezcla FC:T 75:25 de 2-3.36 mm la variación de porosidad estuvo en el rango de 41.01 – 88.27 %, con una desviación estándar de 14.8. Las mezclas que presentaron menor variabilidad en la distribución de partículas y en valores de porosidad fueron FC:PP y FC:T en las proporciones 25:75 (Figura 22), respectivamente, debido a que en bajas proporciones de material orgánico la distribución de partículas fue homogénea; mientras que al incrementar la cantidad de fibra de coco, la distribución de partículas fue heterogénea con la separación de materiales (separación en bandas), formación de grietas y poros en unas zonas de la lámina y, cerradas en otras (Figura 21).

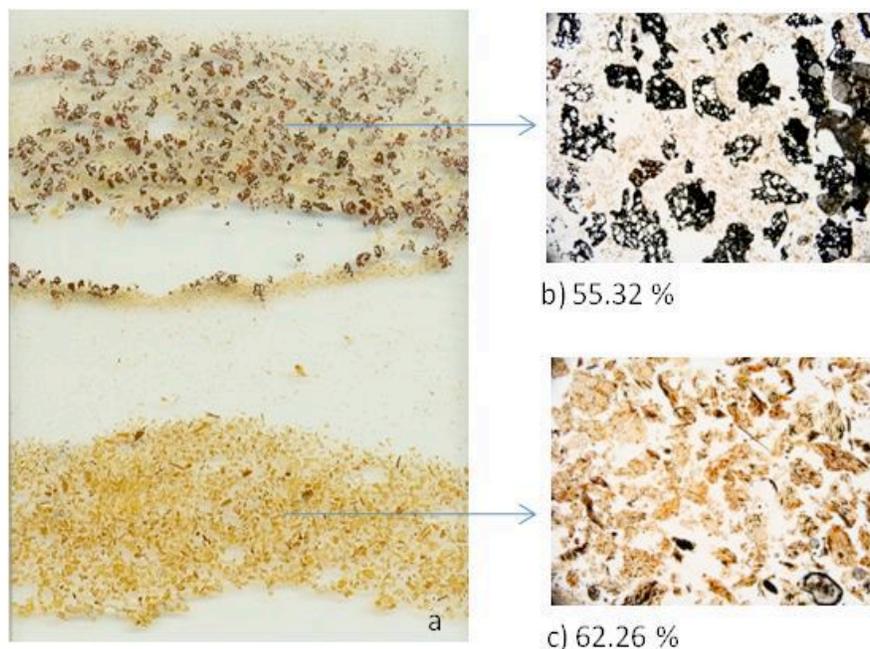


Figura 21. Sección delgada de fibra de coco – tezontle 75:25, b y c) detalle de la distribución y separación de partículas.

La variación en la distribución de partículas en las mezclas tuvo efectos en las propiedades hídricas de los sustratos, porque al empaquetarse, se formaron poros de diferente tamaño por los que, se asume, percoló el agua y causaron cambios en las relaciones agua – aire del sustrato.

Cuadro 6. Porosidad total de mezclas de sustratos en secciones delgadas.

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Des. Est.
FC:PP 25:75 1-2	64.65	62.45	71.39	68.53	72.42	69.57	59.93	60.93	63.53	4.6
FC:PP 50:50	62.69	65.03	54.76	40.21	73.03	67.97	54.29	62.64	65.57	9.7
FC:PP 75:25	78.5	82.5	67.49	65.34	72.25	54.44	81.62	68.32	74.92	8.9
FC:PP 25:75 2-3.36	50.89	59.59	69.7	63.7	62.92	62.36	53.19	59.78	77.7	8.1
FC:PP 50:50	67.05	64.66	58.17	60.91	68.46	66.48	73.45	75.35	64.62	5.5
FC:PP 75:25	81.63	87.32	77.78	68.71	79.22	79.67	48.9	58.72	72.39	12.2
FC:T 25:75 1-2	75.44	65.9	63.83	74.26	68.11	70.87	66.61	65.43	63.71	4.3
FC:T 50:50	66.24	69.73	57.13	67.61	73.99	72.04	70.38	67.4		5.1
FC:T 75:25	76.71	55.32	69.61	63.31	65.93	70.87	62.26	73.01	79.71	7.6
FC:T 25:75 2-3.36	62.98	65.39	73.05	61.09	56.68	62.9	74.98	63.65	64.86	5.7
FC:T 50:50	62.32	57.98	69.29	68.59	68.3	66.63	68.31	79.6		6.2
FC:T 75: 25		71.25	80.75	66.46	68.32	41.01	88.27	70.25	53.66	14.8

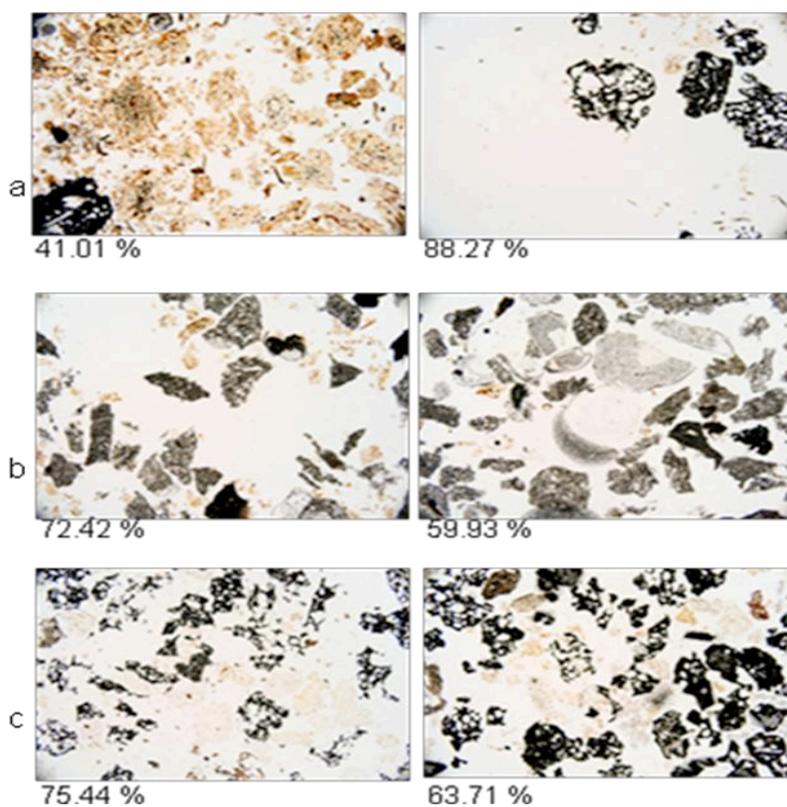


Figura 22. Variación de la porosidad y distribución de partículas en mezclas de sustratos a) FC:T 75:25 2-3.36 mm, b) FC:PP 25:75 1-2 mm y c) FC:T 25:75 1-2 mm.

5.2.4 Espacio poroso total

El espacio poroso total se calculó con la fórmula $EPT = 1 - (D_{ap}/D_r) * 100$. En la Figura 23, se presentan el comportamiento del espacio poroso total (EPT) de los sustratos. El EPT estuvo en función del tamaño de partícula y de la proporción de mezcla. El incremento en el tamaño de partícula se vio reflejado en un incremento en la porosidad total; este efecto no se presentó en piedra pómez, ya que en este material la porosidad total disminuyó cuando se aumentó el tamaño de partícula. El valor más alto de EPT lo presentó la fibra de coco de 2-3.36 mm de diámetro con 96%, seguido de la fibra de coco de 1-2 mm con 94.9%. El tezontle con partículas de 1-2 mm de diámetro presentó el valor más bajo de EPT, con 67.4%.

En la proporción de mezclas, la tendencia fue: a mayor proporción de material orgánico respecto al inorgánico, menor porosidad total.

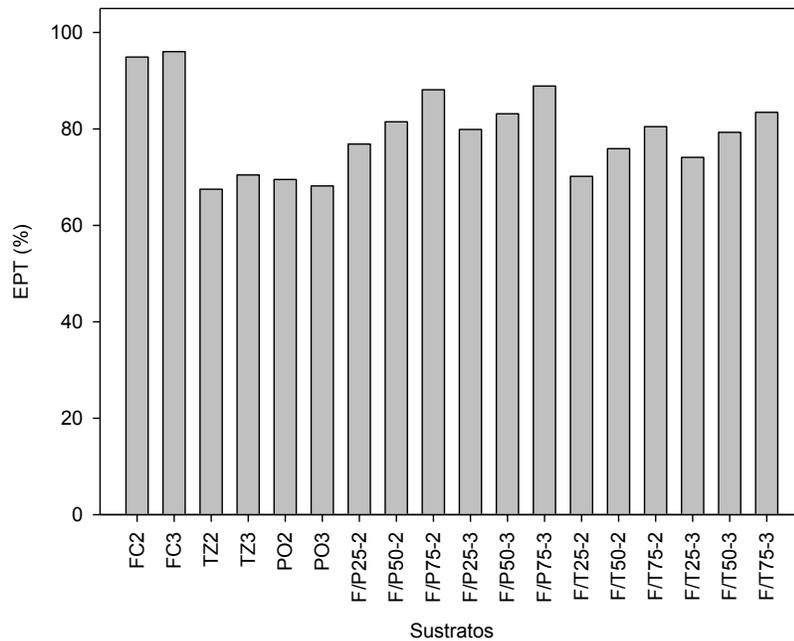


Figura 23. Espacio poroso total de los materiales utilizados.

5.2.5 Curvas de retención de agua de sustratos

La retención de agua y porosidad de aire de los sustratos son de las propiedades físicas más importantes en el éxito de un cultivo en contenedor y una vez que se encuentra la planta establecida es, en la práctica, imposible modificar, por lo que deben considerarse antes del establecimiento del cultivo. En el siguiente apartado se presentan los resultados de las propiedades hídricas de los materiales utilizados en la presente investigación.

Fibra de coco – piedra pómez

En teoría al agregar un material orgánico a un inorgánico, la capacidad de retención debería de incrementarse. Sin embargo, en el caso de la mezcla fibra de coco – pómez en una relación 25-75 % en base a volumen, no se presentó dicho comportamiento; por el contrario, la capacidad de retención de agua se redujo respecto a los materiales individuales. Para las proporciones 50:50 y 75:25 FC:PP, se incrementó la cantidad de agua retenida con respecto a los materiales individuales (Figura 24) y por ende se redujo la capacidad de aire. La propiedad de retención de agua es aditiva en la proporción 75:25 FC:PP; es sustractiva para la mezcla 25:75 y para la proporción 50:50, no es posible ubicarla, por no presentar una tendencia visible.

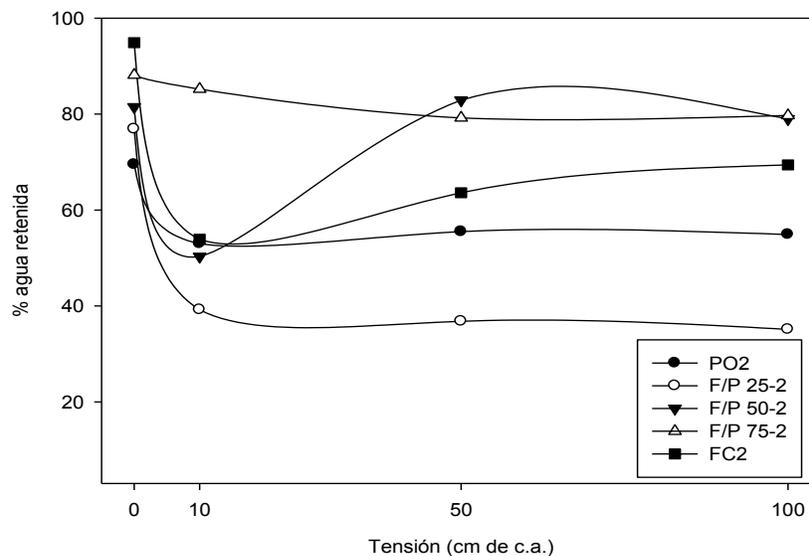


Figura 24. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y piedra pómez 1 – 2 mm Ø.

El comportamiento de las mezclas antes descritas puede explicarse con las secciones delgadas que se muestran a continuación. En la Figura 25d puede notarse que se abrieron grietas en los extremos de la lámina, sin embargo, el acomodo de las partículas resultó en un decremento de la porosidad externa, ya que los espacios entre partículas de piedra pómez fueron ocupados por partículas de fibra de coco. Por otro lado, en las proporciones 25:75 y 50:50 se abrieron poros de percolación que pueden ser los responsables de la baja retención de agua.

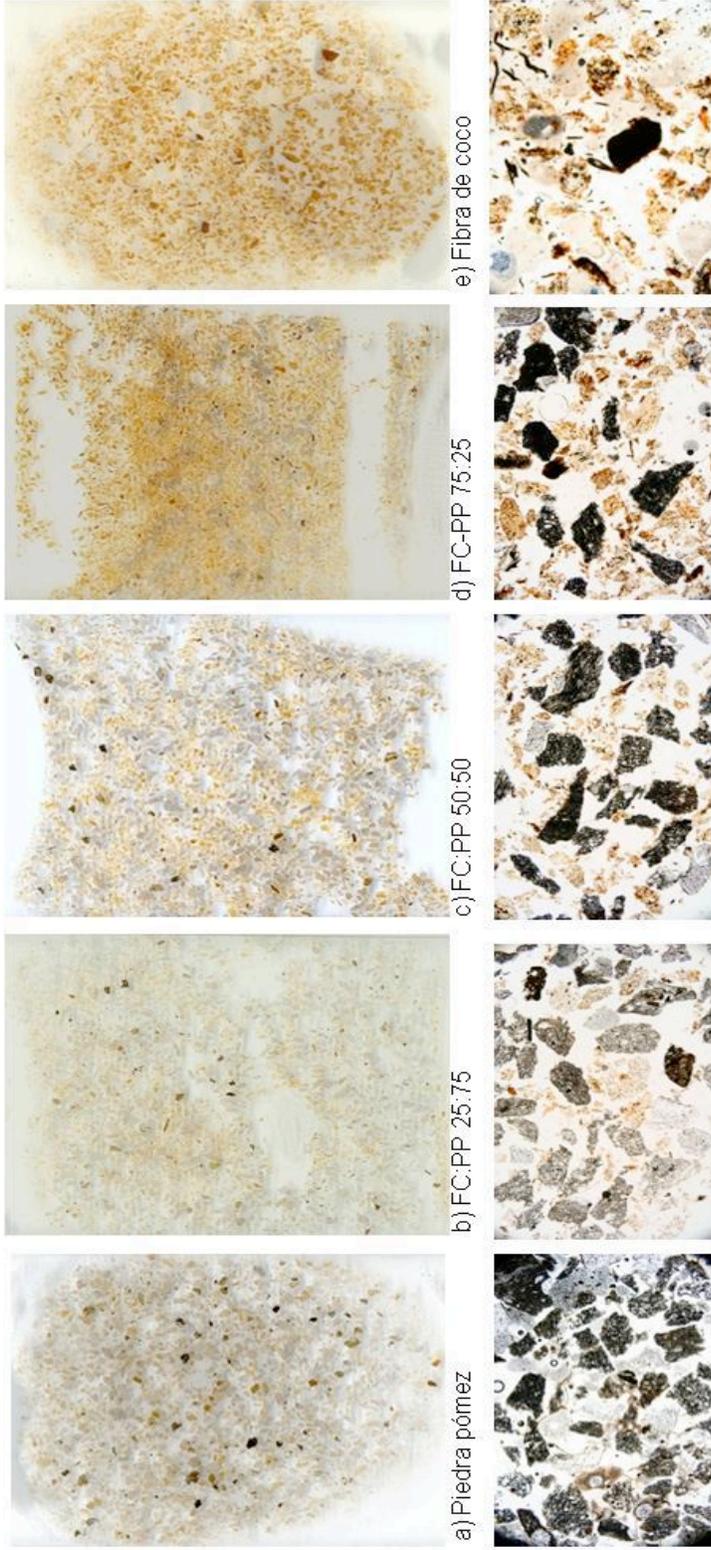


Figura 25. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y piedra pómez, partículas de 1 – 2 mm ϕ . Distribución de partículas orgánicas e inorgánicas a) monica gruesa inorgánica, b) enaulica iguales de espacio simple, c) transición, d) enaulicas iguales de espacio doble y d) monica gruesa orgánica.

Se observó un comportamiento diferente de retención de agua al variar el tamaño de partícula de 1 – 2 a 2- 3.36 mm de \emptyset , con los mismos materiales y proporciones de mezcla. En la Figura 26 se puede notar que tanto los materiales individuales, como las proporciones de mezcla 50:50 y 75:25, muestran valores de retención similares; sin embargo, en la mezcla con la menor porción de fibra de coco fue la que presentó una mayor cantidad de agua retenida. Este es un comportamiento atípico, si se considera que teóricamente al incrementar la porción de material orgánico, la mezcla incrementa su capacidad de retención de agua.

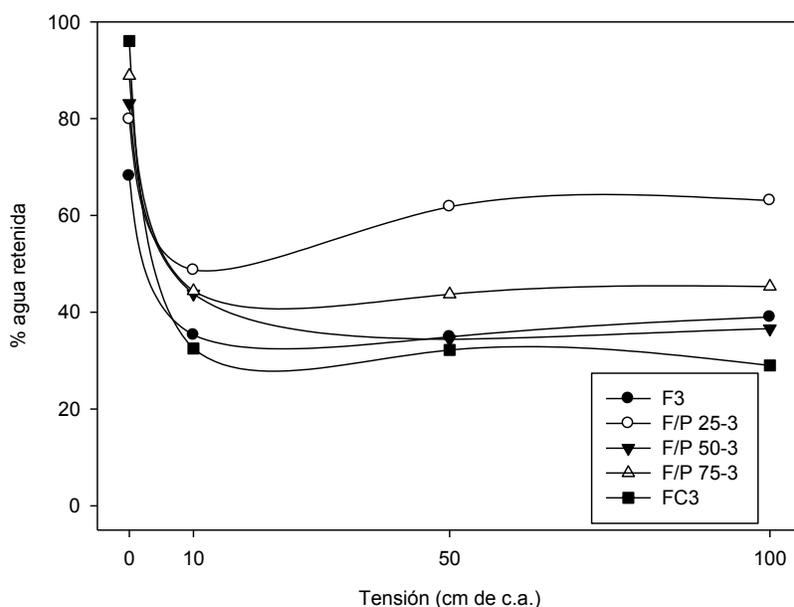


Figura 26. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y piedra pómez 2 – 3.36 mm \emptyset .

La mezcla con la menor porción de material orgánico fue la que presentó la mayor cantidad de agua retenida, comportamiento que pudo explicarse a través de la distribución de partículas en las secciones delgadas (Figura 27). En la Figura 27b, correspondiente al material de mayor retención de agua, la distribución de partículas y la porosidad fueron uniformes, situación que favorece una mayor retención de humedad. Las otras mezclas presentaron distribuciones heterogéneas y separación de materiales, fenómeno que propició la formación de poros grandes y continuos, favoreciendo la probabilidad del drenado de agua.

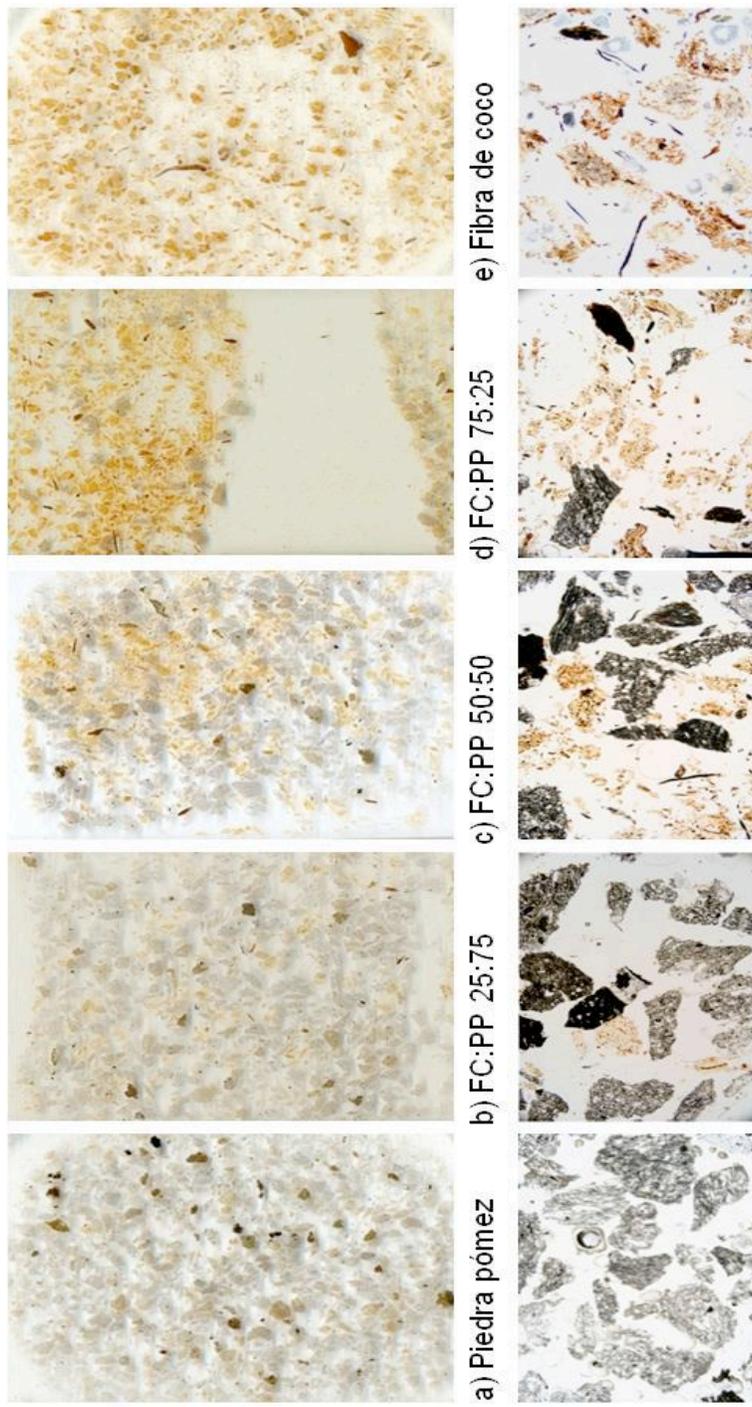


Figura 27. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y pómez, partículas de 2 – 3.36 mm ϕ . Distribución de partículas orgánicas e inorgánicas a) monica gruesa inorgánica, b) enaulica iguales de espacio simple, c) transición, d) enaulicas iguales de espacio doble y d) monica gruesa orgánica.

Fibra de coco - tezontle

En las mezcla fibra de coco – tezontle, con 1 – 2 mm de diámetro de partícula, el comportamiento de retención de agua es variable.

La mezcla que retuvo una mayor cantidad de agua fue la de mayor proporción del material orgánico (fibra de coco a 75% en volumen); éste valor fue mayor que los materiales individuales. La mezcla con la menor cantidad de fibra de coco (25% en volumen) presentó la menor cantidad de agua retenida, incluso por debajo de los materiales individuales. Para estos materiales analizados, proporciones de mezcla y tamaño de partícula, se puede indicar que la capacidad de retención de agua es aditiva para la mezcla que contiene 75% de fibra de coco y 25% de tezontle. Es sustractiva para la proporción 25% de material orgánico y 75% de inorgánico y variable para la proporción 50:50. Como puede notarse en la Figura 28, la mezcla en proporción 50:50 fibra de coco – tezontle presentó un comportamiento irregular.

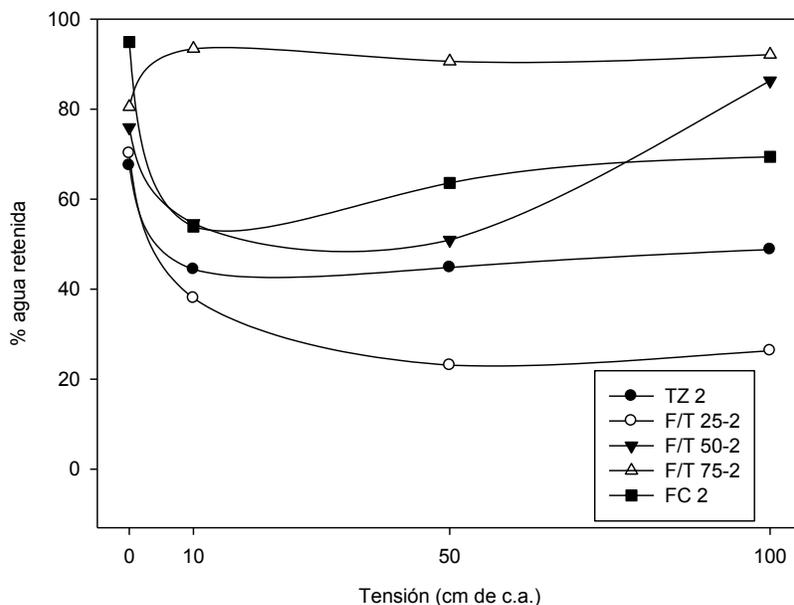


Figura 28. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y tezontle 1– 2 mm Ø.

En la Figura 29d puede observarse una separación de componentes de la mezcla, excepto en una de las fracciones donde se mantuvieron los materiales mezclados. La presencia de grietas horizontales observadas en la sección delgada reflejan que el agua que drenó y pasó la fracción superior, se retuvo en la fracción inferior. De esta forma la mezcla con el valor más alto de fibra de coco fue la de mayor retención. Las otras proporciones de mezcla, a pesar de que presentaron una distribución homogénea de partículas, perdieron más agua por la baja cantidad de material orgánico.

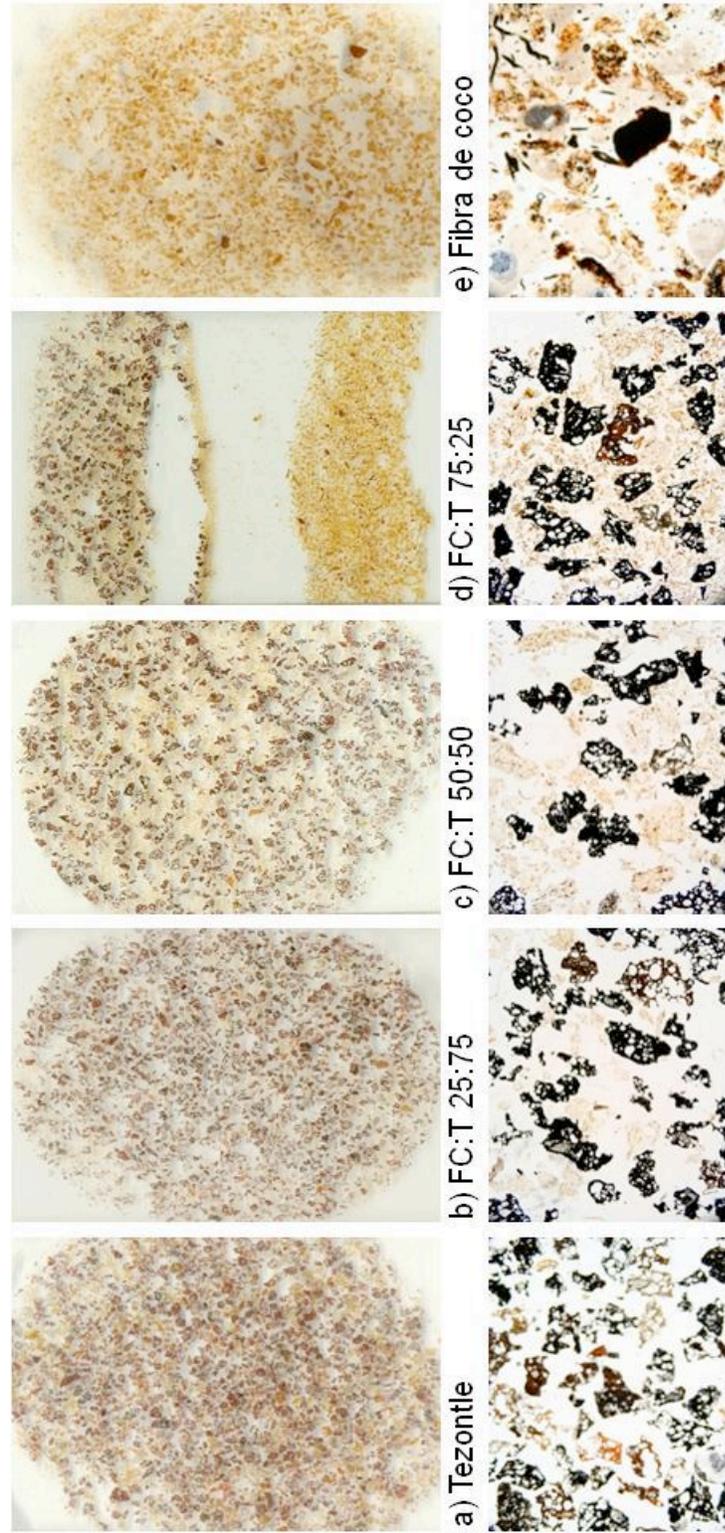


Figura 29. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y tezontle, partículas de 1 – 2 mm ϕ . Distribución de partículas orgánicas e inorgánicas a) monica gruesa inorgánica, b) enaulica iguales de espacio simple, c) transición, d) enaulicas iguales de espacio doble y d) monica gruesa orgánica.

Para las mezclas de FC: T de 2-3.36 mm, la mezcla con la mayor porción de material orgánico (75% fibra de coco) fue la que presentó el valor más alto de agua retenida (Figura 30). Las otras proporciones de mezclas y los materiales individuales, presentaron valores similares de retención de agua. Con estos materiales y tamaño de partículas, el único caso en el que es aditiva la propiedad de retención de agua es en la proporción 75:25.

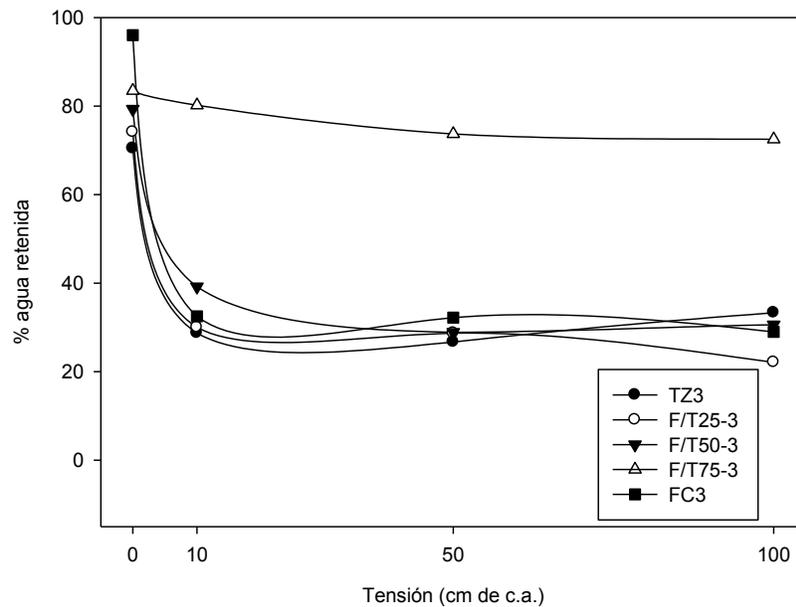


Figura 30. Comportamiento del agua en proporciones de mezclas de fibra de coco y tezontle 2 – 3.36 mm Ø.

De acuerdo con los resultados que se muestran en la gráfica anterior, el sustrato que mayor cantidad de agua conservó fue la mezcla 75:25 fibra de coco – tezontle. A pesar de la formación de grietas, predominó la propiedad del material que se encuentra en mayor proporción. En la lámina 31c puede observarse que las partículas se separaron formando grietas verticales, no obstante que esta mezcla tuvo más fibra de coco que la 31b; sus valores de agua retenida fueron similares. Cabrera (1999) afirma que la adición de componentes orgánicos en las mezclas ayuda a mejorar la retención de agua, porosidad de aire y disminución de peso húmedo.

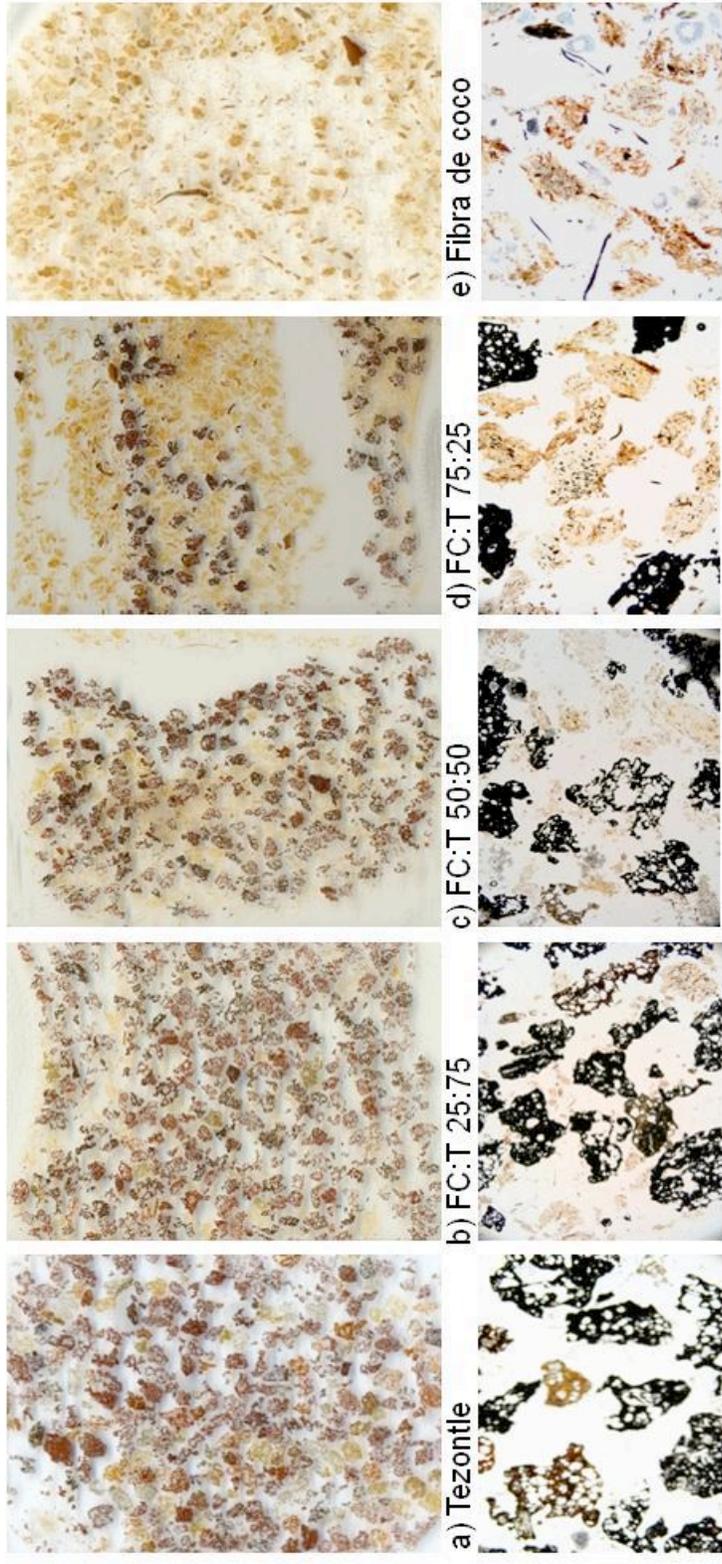


Figura 31. Secciones delgadas de mezclas de fibra de coco y tezontle, partículas de 2 – 3.36 mm ϕ . Distribución de partículas orgánicas e inorgánicas a) monica gruesa inorgánica, b) enaulica iguales de espacio simple, c) transición, d) enaulicas iguales de espacio doble y d) monica gruesa orgánica.

En general, en las proporciones 25:75 en ambos tamaños, hubo una distribución homogénea de partículas. En las mezclas 50:50 se presentaron grietas verticales, mientras que en las mezclas 75:25 hubo separación de materiales sobre todo en la parte inferior de la lámina que dieron lugar a la formación de grietas horizontales. En la mayoría de los casos, esta última mezcla fue la que presentó los valores más altos de retención de agua y, como se verá en apartados posteriores, fueron coincidentemente los mejores tratamientos para el desarrollo de plántulas de lechuga. Resultados similares encontró Anicua (2008) utilizando mezclas a base de fibra de coco con piedra pómez, tezontle, perlita, vermicomposta y peat moss, concluyó que las mezclas con fibra de coco mostraron las mejores características físicas, aunque tuvieron una menor retención, en especial las partículas mayores de 3.36 mm.

De acuerdo con la información generada, se puede decir que la distribución de partículas de los materiales en la mezcla es determinante en la capacidad de retención de agua del sustrato generado. La adición de fibra de coco a los materiales inorgánicos (tezontle y pómez) incrementó la capacidad de retención de agua.

5.3 Producción de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* Var. Summertime) en diferentes sustratos

El experimento se llevó a cabo durante 40 días en un invernadero de doble capa de vidrio. Las variables evaluadas fueron: % de germinación, altura de planta, peso de materia fresca y seca de parte aérea y raíz, desarrollo y distribución de raíces. Los resultados de las variables respuesta determinadas se presentan en el Cuadro 7. Los mejores tratamientos fueron el 6 (FC:T 3:1) y el 3 (FC:PP 3:1) que correspondieron a las mezclas con la más alta proporción de fibra de coco.

La mezcla de fibra de coco y tezontle 75:25 presentó los mejores valores en las variables respuesta a excepción de altura de planta. El testigo (peat moss) presentó la

mayor altura de planta, y los valores más bajos en % de germinación y en PMFR. El tratamiento 9 (tezontle) presentó los valores más bajos en PMFA, PMFR y PMSR.

Cuadro 7. Variables respuesta de plantas de lechuga en diferentes sustratos (mezclas y materiales individuales).

Tratamientos	G (%)	Altura (cm)	PMFA	PMFR	PMSA	PMSR	PIH
T1 FC:PP 25:75	96 a	6.37 b ¹	0.73 abc	0.14 abc	0.060 a	0.021 ab	7.75 a
T2 FC:PP 50:50	95 a	6.31 bc	0.76 ab	0.15 abc	0.055 ab	0.020 ab	4.25 abc
T3 FC:PP 75:25	88 a	6.29 bc	0.85 a	0.20 ab	0.049 abc	0.020 ab	2.75 abc
T4 FC:T 25:75	97 a	6.50 b	0.76 ab	0.13 bc	0.058 ab	0.021 ab	6.25 ab
T5 FC:T 50:50	97 a	6.38 b	0.86 a	0.16 abc	0.057 ab	0.022 ab	3.25 abc
T6 FC:T 75:25	82 a	6.18 bc	0.85 a	0.22 a	0.059 a	0.025 a	3.75 abc
T7 FC	40 b	5.91 bc	0.68 abc	0.15 abc	0.039 c	0.014 ab	2.0 bc
T8 PP	94 a	5.06 c	0.62 bc	0.12 bc	0.048 abc	0.016 ab	2.5 abc
T9 T	94 a	5.42 bc	0.56 c	0.09 c	0.043 bc	0.013 b	0.25 c
T10 PM	11 c	8.55 a	0.81 ab	0.11 c	0.052 abc	0.019 ab	0.25 c

¹Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (DMS, p<0.05).

G: % de germinación 4 días después de la siembra. PMFA: peso de materia fresca de la parte aérea (g), PMFR: peso de materia fresca de raíz (g), PMSA: peso de materia seca de parte aérea (g), PMSR: peso de materia seca de raíz (g) y PIH: plantas infestadas por hongos.

5.3.1 Germinación

El análisis de varianza se realizó para el número de plantas germinadas 4 días después de la siembra, debido a que en este periodo se presentaron tratamientos con el 100% de germinación.

Hay una ligera tendencia en % de germinación de plantas. Al aumentar la cantidad de fibra de coco respecto a piedra pómez y tezontle, el % de germinación disminuyó (Figura 31). Fue menor la cantidad de germinación de plantas en fibra de coco al 100% que en las mezclas. El tratamiento en el que menos plantas germinaron fue el peat moss con un promedio de 2.75 plantas (11%) de cada 25. Yahya & Mohd (1997) reportaron que las proporciones más altas de polvo de coco respecto a tropical peat,

retrasaron la emergencia de *Celosia plumosa*, pero fueron más grandes que las desarrolladas en tropical peat al 100%.

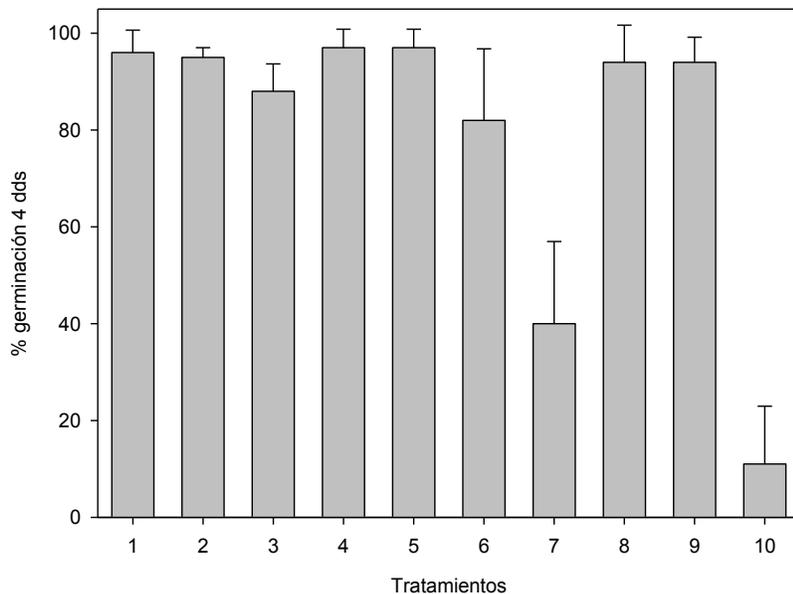


Figura 32. Porcentaje de germinación de lechuga en diferentes sustratos.

Se realizó el registro de % de germinación a los 4, 6, 8 y 10 días después de la siembra (dds) para determinar el periodo en el que se alcanzaba la mayor cantidad de plantas germinadas. A los 6 dds todos los tratamientos, a excepción del peat moss y la fibra de coco, presentaron arriba de 94% de germinación, mientras que la fibra de coco presentó el 86% y el peat moss alcanzó sólo el 34%.

En peat moss se logró el 94% de germinación hasta los 10 días después de la siembra; lo cual no es económicamente rentable en el proceso de producción (Figura 33).

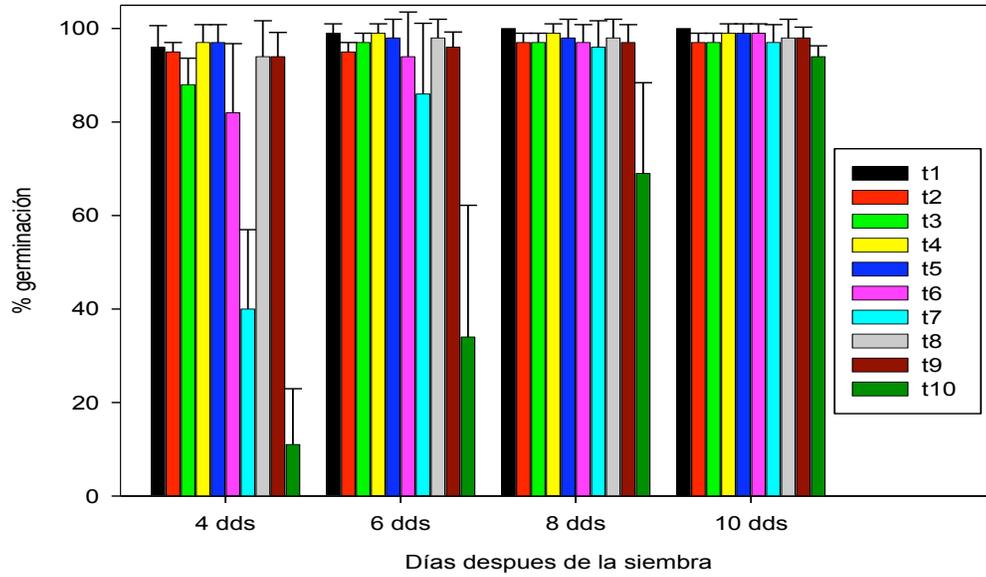


Figura 33. Porcentaje de germinación de lechuga en diferentes sustratos.

5.3.2 Altura de planta

De acuerdo con el análisis de varianza de altura de planta, con un nivel de significancia de 95%; se concluye que hay diferencias significativas en esta variable dadas por el factor sustrato.

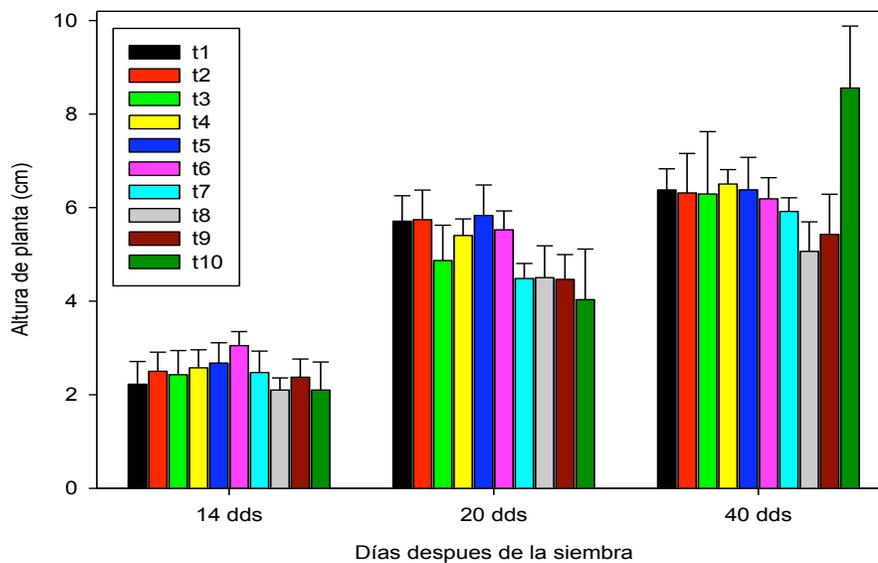


Figura 34. Altura de planta a los 14, 20 y 40 días después de la siembra.

Considerando la prueba de medias de diferencia mínima significativa (DMS), el tratamiento 10 (peat moss) fue el que presentó el valor de mayor altura con una media de 8.55 cm, seguido de los tratamientos 4 (FC:T 25:75), 5 (FC:T 50:50) y 1(FC:PP 25:75) con medias de 6.5, 6.3 y 6.3 cm, respectivamente (Figura 35). La piedra pómez (tratamiento 8) fue la que presentó menor altura con una media de 5.06 cm. Yahya & Mohd (1997) encontraron resultados similares en el comportamiento de altura de *Celosia plumosa* de acuerdo a las proporciones de mezclas de polvo de coco y tropical peat, en cuanto se incrementó la cantidad de polvo de coco respecto a tropical peat, la altura de planta fue mayor. Sin embargo, en los materiales individuales, la mayor altura de planta se presentó en polvo de coco.

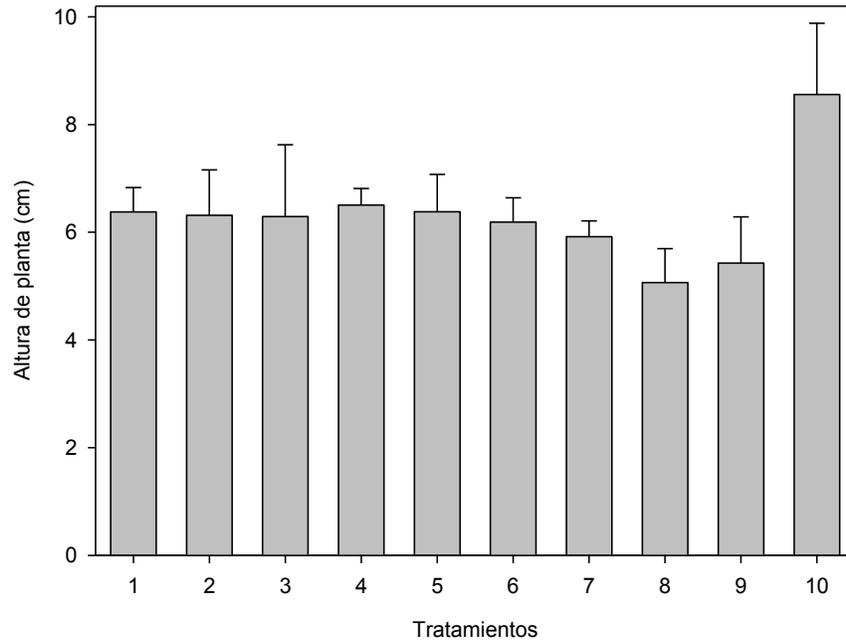


Figura 35. Comportamiento de alturas de planta en los diferentes sustratos.

A pesar que en peat moss se presentó el mejor valor de altura de planta, las plantas se acamaron, esto pudo deberse a que los tallos y las hojas crecieron delgados y alargados (Figura 36).



Figura 36. Aspecto de parte aérea de plantas de lechuga. a) tratamiento 6 y b) peat moss.

Homogeneidad de planta

Si se consideran los valores de desviación estándar de altura de planta, se observa que los tratamientos que presentaron altura de planta más homogénea fueron T2, T3 y T7. Sin embargo, el análisis de varianza de los datos de desviación estándar muestra que no hay diferencia significativa, con $p < 0.05$.

Cuando se analizan las gráficas de las variables respuesta en las que se muestran las barras de error de cada tratamiento, puede notarse que el tratamiento 7 (fibra de coco) presenta las barras de error más pequeñas, por lo que puede interpretarse como el material que presenta comportamiento más homogéneo en las variables respuesta. Las mezclas de materiales y el peat moss son los que presentan la mayor variabilidad, esto pudo deberse a la heterogeneidad de mezclado, que origina un comportamiento variable en los mismos materiales y proporciones.

5.3.3 Peso de materia fresca de la parte aérea

De acuerdo con el análisis de varianza para la variable peso de materia fresca de la parte aérea, se concluye que hay diferencias entre los sustratos (tratamientos), con un nivel de significancia $p < 0.01$.

Considerando la prueba de medias de DMS (diferencia mínima significativa), los tratamientos 3, 5 y 6 fueron los que presentaron los valores más altos de peso de hoja, mientras que el tratamiento con el menor peso fue el 9 (Figura 37). Los sustratos que corresponden a los mejores tratamientos son mezclas de fibra de coco: pómez (75:25), fibra de coco: tezontle (50:50) y fibra de coco: tezontle (75:25).

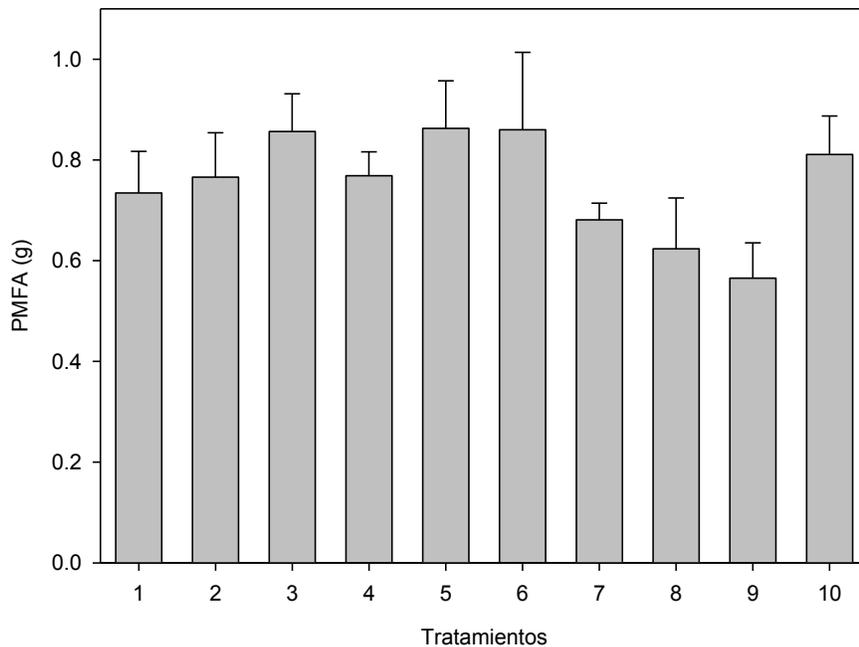


Figura 37. Pesos de materia fresca de la parte aérea de lechuga en los diferentes sustratos.

5.3.4 Peso de materia seca de la parte aérea

Los resultados mostraron diferencias significativas en la variable peso de materia seca de la parte aérea con un nivel de significancia $p < 0.01$. Según la prueba de medias, los mejores tratamientos para esta variable fueron el T1 y T6, con medias de 0.060 y 0.059 g/ planta, respectivamente (Figura 38).

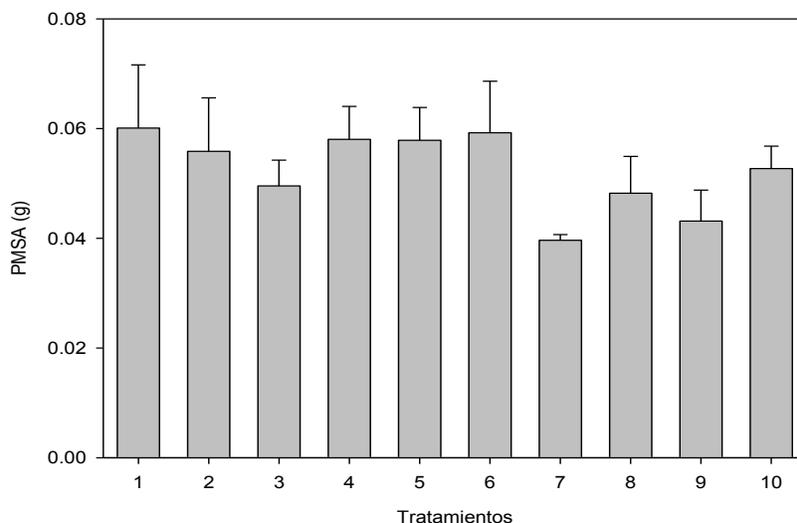


Figura 38. Pesos de materia seca de parte aérea de lechuga en los diferentes sustratos.

5.3.5 Peso de materia fresca de raíz

En la Figura 39 se muestra el comportamiento del peso de materia fresca en raíces de lechuga en diferentes sustratos; mostrando diferencias significativas con un nivel de significancia $\alpha=0.01$. El tratamiento 6 (FC:T 75:25) y el tratamiento 3 (FC:PP 75:25) fueron los que presentaron el mejor peso con medias de 0.22 y 0.20 g/planta, respectivamente (Figura 39).

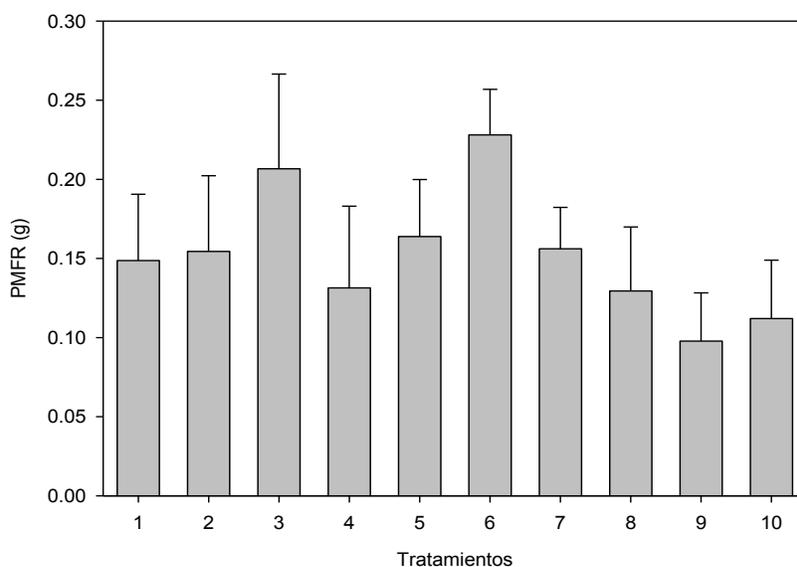


Figura 39. Comportamiento del peso de material fresco de raíces de lechuga en diferentes sustratos.

5.3.6 Peso de materia seca de raíz

A través del análisis de varianza se encontró que hay significancia estadística por efecto de tratamientos, con un $\alpha=0.01$ (Figura 40). De acuerdo con la prueba de medias el tratamiento con mejor peso de materia seca de raíz fue el t6. Resultados similares reportaron Yahya & Mohd (1997) en la variable peso de materia seca de planta de *Tagetes erecta* el valor más alto correspondió a la mayor proporción de polvo de coco respecto a tropical peat.

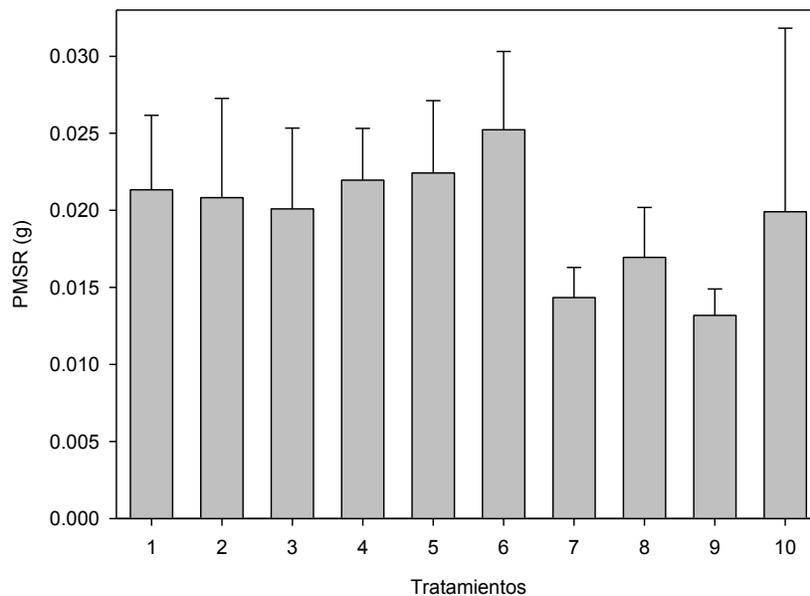


Figura 40. Comportamiento del peso de materia seca de raíces de lechuga en diferentes sustratos.

5.3.7 Plantas infestadas por hongos

De acuerdo con el análisis de varianza de plantas de lechuga infestadas por hongos, se encontraron diferencias significativas entre los sustratos usados, con 95% de confiabilidad. Considerando la prueba de medias, los tratamientos que presentaron menor incidencia de hongos fueron los tratamientos 7, 9 y 10 (fibra de coco, tezontle y peat moss) con medias de 2, 0.25 y 0.25 plantas infestadas por unidad experimental (25 plantas), respectivamente (Figura 41). El tratamiento con mayor incidencia de hongos fue la mezcla 25% fibra de coco – 75% pómez con una media de 7.75 plantas por unidad experimental.

Aunque el análisis de varianza y la prueba de medias no es válida para bloques, la significancia sirve de indicio para corroborar que el diseño fue el adecuado. El análisis de varianza para bloques muestra que hubo diferencias significativas entre bloques. Se observó que hubo diferencias en la incidencia del hongo entre bloques, la mayor incidencia se presentó en los bloques que se encontraban en la parte central del invernadero, disminuyendo en los bloques que se encontraban cerca de las ventilas. Esto pudo deberse a que la humedad relativa es mayor en la parte central, lo que favoreció el desarrollo de hongos.

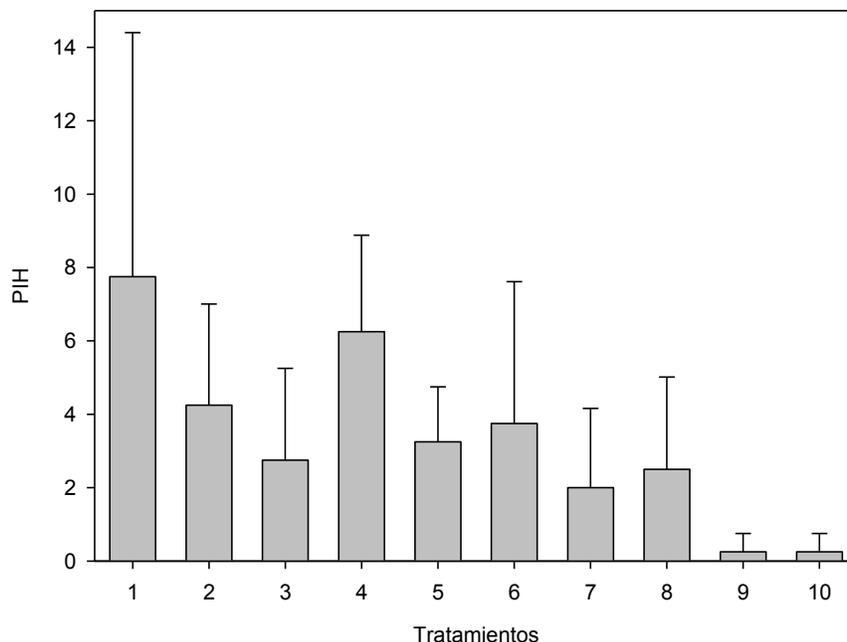


Figura 41. Incidencia de hongos en los diferentes sustratos.

5.3.8 Calidad de cepellón

La distribución de raíces y la cantidad de material orgánico en las mezclas fueron determinantes en la formación de cepellón, en cuanto se incrementó la cantidad de fibra de coco con respecto al material inorgánico (pómez y tezontle) fue mayor la calidad del cepellón (Figura 42). Las raíces, en las mezclas con proporciones grandes de fibra de coco, fueron más gruesas y mejor distribuidas que en las mezclas con menor cantidad materia orgánica así como en los materiales individuales inorgánicos. Landis (1990); Quesada y Méndez (2005) mencionan que un cepellón de calidad debe

permitir un buen desarrollo radical, mantener la integridad de las raíces y una fácil extracción del contenedor, sin dañar la plántula al jalar de la base del tallo, otro indicador de calidad de cepellón es la distribución de raíces alrededor del sustrato.



Figura 42. Calidad de cepellón en mezclas de fibra de coco y tezontle.

Las mezclas con 75% de fibra de coco y 25% de material inorgánico presentaron una distribución uniforme y abundante a lo largo del cepellón, mientras que los materiales inorgánicos individuales presentaron una menor cantidad de raíces, las cuales fueron más delgadas. En el testigo (peat moss) las raíces se concentraron en la primera parte del cepellón, en tanto que en la parte basal no desarrollaron raíces y esa fue la causa de la ruptura del cepellón al momento de extraerlo del contenedor (Figura 43).



Figura 43. Calidad de cepellón en materiales individuales.

Los materiales inorgánicos fueron los que presentaron menor formación de agregados y por lo tanto la calidad del cepellón fue baja; los materiales orgánicos presentaron buena agregación; sin embargo, puede notarse que al extraer el cepellón del contenedor, éste no se desprendió completamente. La fibra de coco y el peat moss presentaron un comportamiento similar en agregación y en calidad de cepellón. Al respecto, Landis (1999) menciona que es preferible el uso de contenedores con paredes lisas, ya que el crecimiento de las raíces entre las grietas y rugosidades dificulta la remoción de la planta.

5.3.9 Distribución de raíces

La distribución de raíces presentó diferencias entre tratamientos (Figuras 44, 45 y 46). En peat moss la mayor parte de la raíz se concentró en el primer tercio del cepellón (60%), alrededor de 30% en la parte media y menos de 10% del total de raíces se desarrollaron en la parte baja. Los tratamientos que presentaron distribución más uniforme fueron el 1, 3, 4, 5 y 6. Estos resultados corroboran lo observado en la formación de cepellón, en el que se observó un pobre desarrollo en los tratamientos 8, 9 y 10.

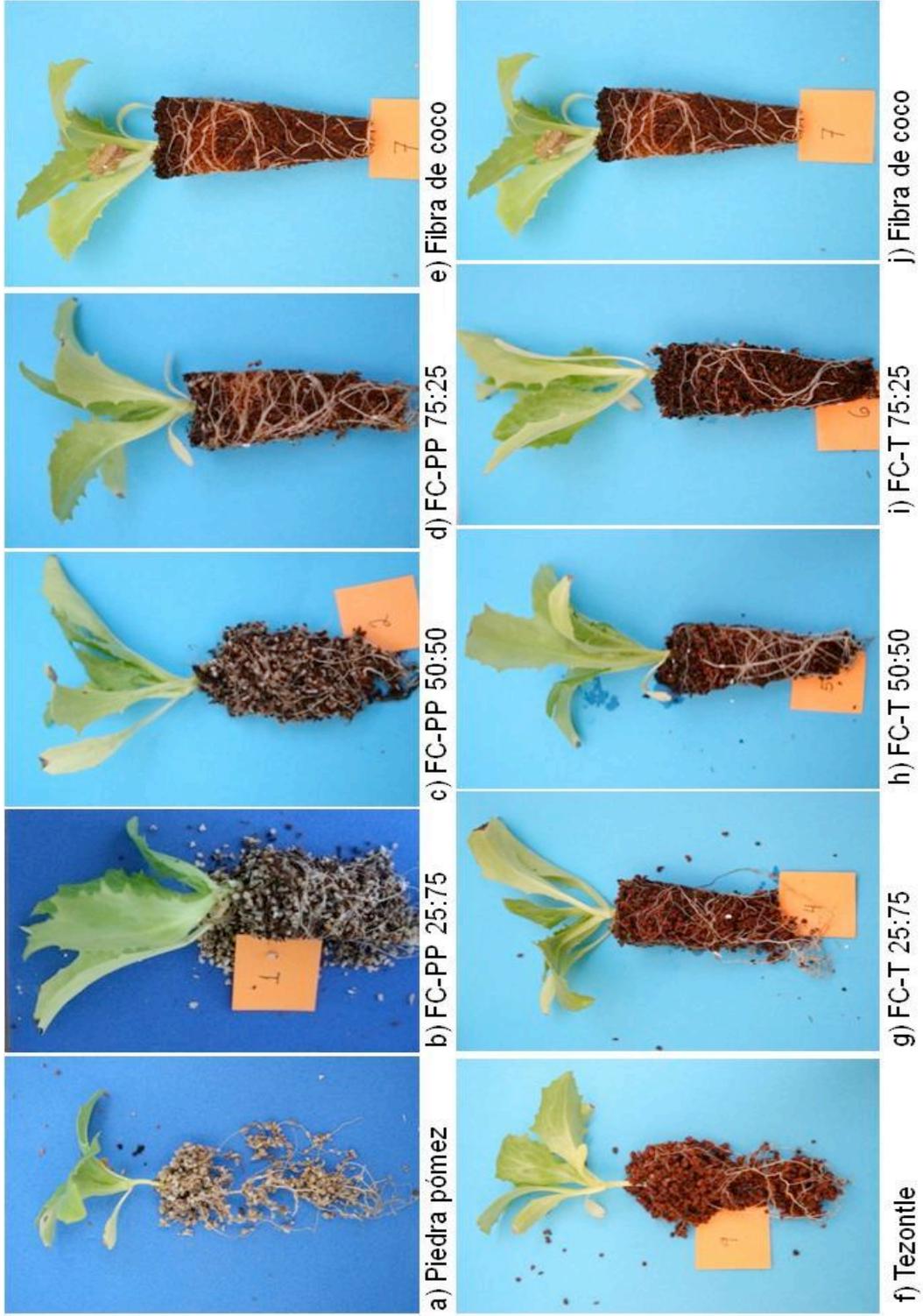


Figura 44. Calidad de capellón en mezclas de fibra de coco – pómez y fibra de coco – tezontle.

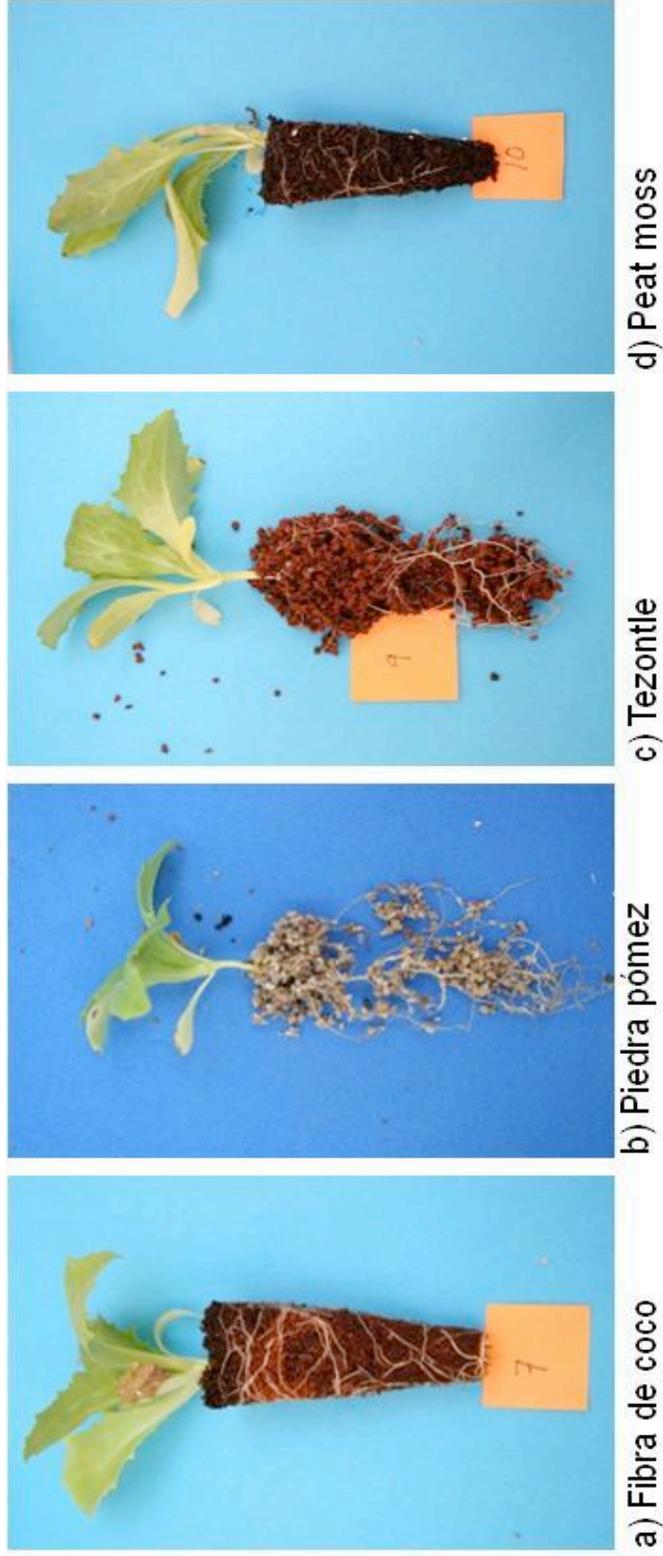


Figura 45. Calidad de cepellón en los materiales individuales.

A pesar que los materiales orgánicos presentaron comportamiento similar (Figura 47), la fibra de coco mostró una mejor distribución de raíces a lo largo del cepellón (58% en el primer tercio, 25% en la parte media y 17% en la zona baja), mientras que las raíces en peat moss se concentraron en el primer tercio del cepellón (cerca del 70%) y menos del 10% en la zona baja.

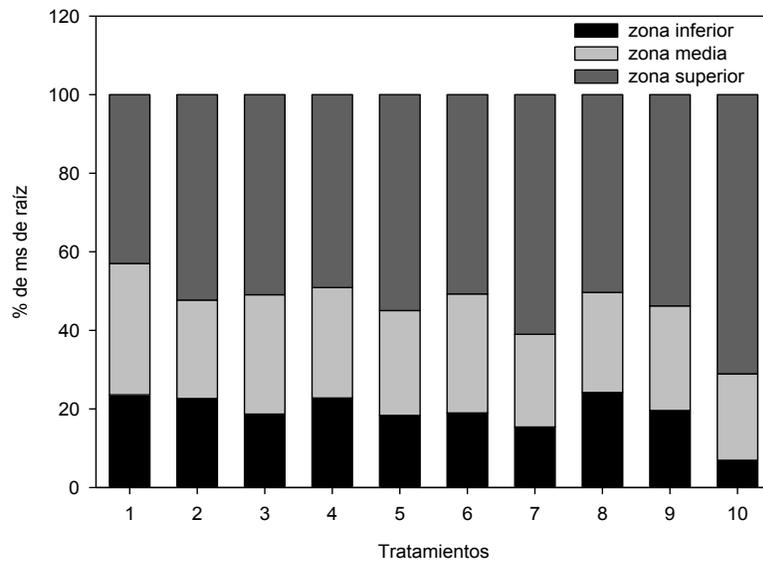


Figura 46. Distribución de raíces en diferentes proporciones de mezclas de sustratos.



Figura 47. Distribución y abundancia de raíces en materiales orgánicos.

5.3.10 Contenido de agua de los sustratos

En la Figura 48 se reporta el contenido de agua de las mezclas y de los materiales individuales al momento de la extracción de la planta del contenedor. El último riego (5 mL de agua por planta) se aplicó 24 horas antes del corte de las plantas, por lo que el contenido de agua reportado corresponde a la humedad retenida por el sustrato después de 24 horas. Como era de esperarse, el comportamiento del contenido de humedad fue que en cuanto se incrementó la cantidad de fibra de coco con respecto a los materiales inorgánicos, se incrementó la cantidad de agua retenida. La fibra de coco fue la que presentó los valores más altos de agua, seguida del peat moss. Los materiales inorgánicos individuales fueron los que menor contenido de humedad presentaron, de estos el tezontle presentó el valor más bajo.

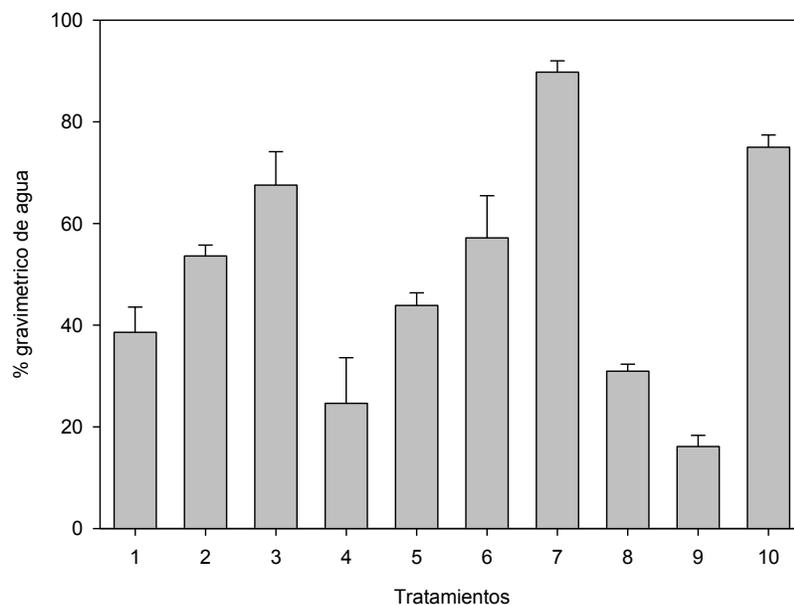


Figura 48. Contenido de agua en los diferentes tratamientos al final del experimento.

En general, con el uso de mezclas en las que predominó la fibra de coco sobre tezontle o piedra pómez, la germinación de lechuga fue más rápida que en el testigo (peat moss). Esto representa un ahorro en términos económicos y de mano de obra, debido que las plantas se pueden obtener en menos tiempo. Las mezclas a base de fibra de coco fueron las que mostraron mejor calidad de plántula (calidad de cepellón, desarrollo radicular, distribución de raíces, porte de planta, entre otros). Resultados

similares encontró Anicua (2008) utilizando mezclas de fibra de coco con tezontle, piedra pómez y perlita en *lisianthus*, determinó que los mejores resultados de las variables respuesta se presentaron en fibra de coco combinada con cualquier material inorgánico en tamaños de partícula homogénea en comparación con el testigo (peat moss).

También se observó que a medida que se incrementó la proporción de fibra de coco respecto a los materiales inorgánicos, fueron mejores las variables respuesta; sin embargo, cuando se llegó a 100% de fibra de coco, se vieron afectadas negativamente estas variables. Esto indica que el uso de un bajo porcentaje de tezontle o piedra pómez en la mezcla, potencia las propiedades del sustrato y por ende el desarrollo del cultivo. Estos resultados muestran además, que la fibra de coco y la piedra pómez o tezontle presentan características complementarias, condición que es deseable en las mezclas (Burés, 1997).

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados generados en la presente investigación, se concluye que las propiedades hídricas varían en función de la proporción de la mezcla y el tamaño de partícula. Esto se debe a la complejidad de interacciones que se presentan entre las partículas de los materiales mezclados. Por lo que se debe de elegir la mezcla de acuerdo con las necesidades hídricas de la planta.

La retención de agua varía en función de las mezclas en aditivas, sustractivas o promedios.

Las propiedades de retención de agua y capacidad de aireación en mezclas fibra de coco: tezontle y fibra de coco: piedra pómez, no son el promedio de las propiedades de los materiales individuales, éstas se comportan de diferente forma en función de la proporción de mezcla.

El comportamiento de las propiedades hídricas no es constante con los mismos materiales, tamaños de partícula y proporciones de mezcla. Esta variación se le puede atribuir a la distribución aleatoria de las partículas en las mezclas de los materiales.

Las propiedades físicas como la retención de agua, densidad aparente y porosidad con afectadas considerablemente con la variación del tamaño de partículas de los materiales que componen las mezclas.

Un incremento en la concentración de fibra de coco respecto al tezontle o piedra pómez, significó una mejor distribución y calidad del sistema radicular de plantas de lechuga Var. Sumer Time. Sin embargo, el desarrollo radicular se ve afectado negativamente cuando se usa fibra de coco al 100%. Es decir, la adición de bajos

porcentajes de tezontle o piedra pómez al material orgánico (fibra de coco) mejora el desarrollo y calidad de planta de lechuga.

La distribución de partículas en capas, influyó positivamente en el desarrollo de plantas de lechuga Var. Sumertime.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Aendekerk, Th. G. L.; Cevat, H.; Dolmans, N.; van Elderen, C.; Kipp, J. A.; de Kreij C.; Sonneveld, C.; Verhagen, J. B. G. M. and Wever, G. 2000. International substrate manual. Elsevier International. Netherlands. 94 p.
- Anicua, S. R. 2008. Caracterización física y micromorfológica de materiales orgánicos e inorgánicos para la generación de mezclas de sustratos en la producción de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*). Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 198 p.
- Ansorena M. J. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Mundi Prensa. Madrid, España. 172 p.
- Baumgarten, A. 2008. Analytical methods for growing media- challenges and perspectives. Acta Hort. 779: 97-104.
- Beardsell, D. V.; Nichols, D. G.; Jones, D. L. 1979. Physical properties of nursery potting-mixtures. Scientia Horticulturae 11: 1-8.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- 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): 5-12.
- De Boodt, M.; Verdonck, O.; Cappaert, I. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. Acta Hort. 37: 2054-2062.
- Flores A., R.; Livera M., M.; Colinas L., M. T; Gaytán A., E. A; Muratalla L., A. 2008. Producción de plántulas de ciclamen (*Cyclamen persicum* Mill.) en sustratos basados en bonote de coco. Revista Chapingo. Serie Horticultura 14 (3): 309-318.
- Fonteno W. C. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. Acta Hort. (ISHS) 324: 197 – 204.

- García C., O.; Alcántar G., G.; Cabrera, R. I.; Gavi R., F.; Volke H., V. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. *Terra Latinoamericana* 19: 249 – 258.
- Gunnlaugsson, B. and Adalsteisson, S. 1995. Pumice as environment-friendly substrate –a comparison with rockwool. *Acta Horticulturae* 401: 131-136.
- Landis, T. D. 1990. Growing media In: Landis, T.D.; Tinus, R. W.; McDonald, S. E.; Barnett, J. P. *The container tree nursery manual, volume 2. Agric. Handbk.* 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 41-87.
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical, and biological properties of growing medium . *Acta Hort. (ISHS)* 396: 273-284.
- Meerow, A. W. 1994. Growth of two subtropical ornamentals using coir (coconut mesocarp pith) as a peat substitute. *Hortscience* 29 (12): 1484 - 1486.
- Nappi, P. y Barberis, R. 1993. Compost as growing medium: chemical, physical and biological aspects. *Acta Hort. (ISHS)* 342: 249-257.
- Noguera, P.; Abad, M.; Puchades, R.; Noguera, V.; Maquieira, A. y Martínez, J. 1997. Physical and chemical properties of coir waste and their relation to plant growth. *Acta Horticulturae* 450:365-374.
- Orozco, R.; Marfa, O.; Burés, S. 1995. Water status of graded perlites. *Acta Hort.* 401: 137-144.
- Park, H. J., Jung, Y. K., Kim, K. H. and Son, J. E. 2004. Comparison of physical and chemical properties of growing media based on the European Standard Method and the self-compaction method. *Acta Horticulturae.* 664: 225-230.
- Pastor S., J. N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Terra* 17 (3): 231-235.
- Peñuelas R., J. L.; ocaño B., L. 2000. Cultivo de plantas forestales en contenedor. 2ª edición. Mundi Prensa. Madrid, España. 190 p.
- Pokorny, F. A. y Wetzstein, H. Y. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience* 19(3): 447-449.

- Quesada R., G.; Méndez S., C. 2005. Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana* 16 (002): 171-183.
- Robbins, J. A. & Evans, M. R. 2008. Growing media for container production in a greenhouse or nursery part I (components and mixes). *Greenhouse and nursery series*. Division of agriculture. University of Arkansas.
- The R Foundation for Statistical Computing. 2007. R. Versión 2.8.0. ISBN 3-900051-07-0
- Verdonck, O.; Penninck, R. y De Boodt, M. 1984. The physical properties of different horticultural substrate. *Acta Horticulturae* 150:155-160.
- Verdonck, O.; Demeyer, P. 2004. The Influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hort.* 644: 99-101.
- Verhagen, J. B. G. M. and Boon, H. T. M. 2008. Classification of growing media on their environmental profile. *Acta Horticulturae* 779: 231-238.
- Warncke, D. 1988. Recommended test procedure for greenhouse growth media. In: Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. Bulletin No. 499. North Dakota Agricultural Experiment Station.
- Yahya A. y Mohd R. I. 1997. The growth and flowering of some annual ornamental son coconut dust. *Acta Hort.* (ISHS) 450: 3 –38.
- Zapata N., F. Guerrero., y A. Polo. 2005. Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustratos de cultivo. *Agricultura Técnica* 65: 378–387.