



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Instituto de Ciencias

Centro de Agroecología

Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

MANEJO DE LA HUMEDAD EN EL SUELO,
CON MATERIALES ORGÁNICOS, POR EFECTO
DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

TESIS

Para obtener el grado de

Maestro en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

Presenta

ING. MARÍA DEL REFUGIO BERUMEN BAÑUELOS

Director de la Tesis

DR. DIONICIO JUÁREZ RAMÓN

Puebla, Pue.

Enero, 2021




La presente tesis, titulada: "MANEJO DE LA HUMEDAD EN EL SUELO, CON MATERIALES ORGÁNICOS, POR EFECTO DE TAMAÑO DE PARTÍCULA", realizada por la alumna Ing. María del Refugio Berumen Bañuelos, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


**MAESTRA EN CIENCIAS EN
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS**

COMITÉ TUTORAL:

DIRECTOR: _____


Dr. Dionicio Juárez Ramón


ASESOR: _____


Dr. José Circo Patrón Ibarra

ASESOR EXTERNO: _____


Dr. Joel Pineda Pineda

REVISOR EXTERNO: _____


Dr. Javier Cruz Hernández

Puebla, Pue., Enero de 2021.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante el periodo de desarrollo del posgrado.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), al Instituto de Ciencias (ICUAP) y al Centro de Agroecología (CENAGRO), por haberme permitido realizar mis estudios de Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas.

A los integrantes de mi comité tutorial, por la contribución de conocimiento, su paciencia y apoyo; así como a toda la planta docente y administrativa que me aportó conocimiento y ayudó en este trabajo de investigación.

A mis compañeros BUAP, a mis roomies y a toda la comunidad poblana que me recibió con cariño.

Dedicatoria

A Dios por permitirme llegar, una vez más, al fin de una de mis metas.

A mis padres, por su apoyo y motivación incondicional para cumplir mis sueños.

A mis hermanos, por ser mi motivación y mayor ejemplo.

A mis compañeros y nuevos amigos, que conocí en este camino.

¡Gracias!

Índice General

I. Introducción	1
II. Antecedentes	2
III. Marco teórico	4
3.1 El agua en la agricultura.....	4
3.2 La agricultura en México	6
3.3 El suelo y la agricultura.....	6
3.4 Propiedades del suelo que afectan el comportamiento de la humedad	8
3.4.1 Tamaño de partícula y porosidad	9
3.5 Curvas de liberación de humedad.....	10
3.6 Materiales orgánicos.....	14
IV. Justificación	15
V. Objetivos	16
5.1 General.....	16
5.2 Específicos.....	16
VI. Hipótesis	17
VII. Métodos.....	18
7.1 Área de estudio	18
7.2 Diseño de la investigación	19
7.2.1 Caracterización física por partículas	20
7.2.2 Caracterización física por contenido de humedad	21
7.2.3 Caracterización por pérdida de humedad en los sustratos	23
7.2.4 Diseño de tratamientos.....	24
7.2.5 Diseño experimental	25
7.2.6 Análisis estadístico	25
VIII. Resultados y discusión.....	26
8.1 Caracterización de suelo.....	26
8.1.1 Análisis de fisisorción de N ₂ para caracterización del suelo en porosidad	27

8.1.2 Superficie específica o superficie de contacto.....	29
8.1.3 Análisis de elementos químicos por microscopia electrónica.....	30
8.2 Caracterización de materiales orgánicos.....	32
8.2.1 Curvas de liberación de humedad de materiales orgánicos y suelo.....	32
8.2.2 Evaluación de comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos, por el método de porómetro	38
8.3 Pérdida de humedad de los sustratos por estrés hídrico.....	41
IX. Conclusiones	46
X. Literatura citada.....	47
XI. Anexos	56

Índice de Figuras

Figura 1. Extracción de agua dulce por continente (FAO, 2002).....	4
Figura 2. Zonas ecológicas de México (Toledo y Ordóñez, 2009).	5
Figura 3. Porosidad del suelo (Weil, 2017).....	9
Figura 4. Curvas de retención de agua de la textura del suelo (Valverde, 2007).	10
Figura 5. Curvas de liberación de agua de cinco mezclas de sustratos (Pineda et al., 2012). ...	13
Figura 6. Ubicación del punto de muestreo (18°93'51" N, 98°15'87" O)	18
Figura 7. Materiales orgánicos utilizados en el análisis del comportamiento de la humedad.....	19
Figura 8. Cromatógrafo de gases (Quantachrome AutoSorb-As1).	20
Figura 9. Microscopio electrónico de barrido (SEM).	21
Figura 10. Embudos con muestras de materiales orgánicos sometidos a tensión.....	22
Figura 11. Sustratos: suelo/material orgánico % (V/V).....	23
Figura 12. Porómetros con muestras de materiales orgánicos en estado de saturación.	23
Figura 13. Isotherma de adsorción N ₂ a 77K en suelo de EcoCampus Valsequillo.....	28
Figura 14. Distribución de tamaño de poro de suelo de EcoCampus Valsequillo.	29
Figura 15. Análisis de Espectroscopia de Dispersión de Energía del suelo en estudio.....	31
Figura 16. Curvas de liberación de agua (CLA) de materiales orgánicos de ≤2 mm y 2.1-5 mm, y suelo; a diferentes tensiones.	37
Figura 17. Rangos de humedad aprovechable (PMP-CC) de los tratamientos en estudio, (mezclas de 70% suelo y 30% de materia orgánica, y suelo) por el método de ollas de presión.	38
Figura 18. Variables del comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos de partículas de ≤2 mm.	39
Figura 19. Variables del comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos de partículas de 2.1-5 mm.....	40
Figura 20. Pérdida diaria de humedad en mL por tratamiento, con el punto de inicio cuando la muestra estuvo en punto de saturación.....	43
Figura 21. Pérdida de humedad promedio por día por tratamiento.....	44
Figura 22. Comportamiento de temperatura ambiental, máxima y mínima, en invernadero durante 25 días sin aplicar riego.....	45

Índice de cuadros

Cuadro 1. Diseño de tratamientos de mezclas de sustratos de suelo con materiales orgánicos.	24
Cuadro 2. Distribución de unidades experimentales por bloque.	25
Cuadro 3. Caracterización fisicoquímica del suelo de EcoCampus (NOM-021-0 RECNAT-2000).	27
Cuadro 4. Métodos para determinación de superficie específica y volumen total de poro.	30
Cuadro 5. Contenido de elementos (% peso) en suelo de Ecocampus Valsequillo.	31
Cuadro 6. Caracterización fisicoquímica de los materiales orgánicos.....	32
Cuadro 7. Densidad aparente de materiales orgánicos, suelo y sustratos por tamaño de partículas (≤ 2 mm y 2.1-5 mm).	41
Cuadro 8. Pérdida de humedad (mL) de los sustratos en proporción 70% suelo/30% material orgánico (≤ 2 mm y 2.1-5 mm), a los 25 días sin aplicar riego.	42

RESUMEN

Las sequías que se han presentado variablemente en los últimos años en México se han vuelto un tema de interés y de alerta, ya que afecta severamente la producción agrícola; convirtiéndose en una situación de estudio importante. Es por ello que se buscan soluciones agroecológicas, en las que se impacte positivamente en el área ambiental, con productos locales y económicos, repercutiendo socialmente en el patrimonio de los productores del campo. En el presente trabajo se realizó la caracterización física de las partículas del suelo, por adsorción de nitrógeno y espectroscopia de dispersión de energía; además, se realizaron las curvas de liberación de humedad de tres materiales orgánicos (carbón vegetal, lombricomposta y estiércol de bovino) a dos diferentes tamaños de partícula (≤ 2 mm y 2.1-5 mm), por el método de embudos. Asimismo, se evaluaron sustratos de los materiales orgánicos, a los dos diferentes tamaños de partícula, con suelo y a tres diferentes proporciones: 30/70, 50/50, 70/30% (suelo/material orgánico, v/v), donde se obtuvo la caracterización hidrofísica por medio de la técnica del porómetro. Posteriormente se eligieron los seis sustratos de la mezcla (70/30%) de esta prueba, además, del suelo, donde se evaluó la pérdida de humedad gravimétrica en invernadero, después de la saturación del sustrato. Los resultados por el método BET resaltan al suelo como un material mesoporoso con una superficie específica de $28.47 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Mientras que, para la capacidad de retención de humedad de los sustratos, la mejor mezcla fue de lombricomposta de tamaño de partícula ≤ 2 mm con suelo. Con los datos reportados se observó que el material orgánico mezclado con suelo mejora la retención de humedad, así como la aireación en este; además, el tamaño de partícula de estos materiales, modifican el acomodo de las partículas de los sustratos y alteran el volumen ocupado por éstas, por lo tanto, la densidad aparente, el espacio poroso total y la capacidad de aireación se ven afectados.

Palabras clave: *sequía, capacidad de retención de humedad, aireación*

ABSTRACT

The droughts that have been presenting variably in recent years in Mexico have become a topic of interest and alertness, since it sternly affects agricultural production; becoming a quite important study situation. That is why agroecological solutions are sought, in which we get to have a positive impact on the environmental area, by the means of local and economic products, having a social impact on the heritage of the farmers. In the present work, the physical characterization of the soil particles was carried out, by nitrogen adsorption and energy dispersive spectroscopy; In addition, the moisture release curves of three organic materials (charcoal, vermicompost and bovine manure) were made at two different particle sizes (≤ 2 and 2.1-5 mm), by the funnel method. Likewise, substrates of organic materials were evaluated, to both of the different particle sizes, with soil and at three different proportions: 30/70, 50/50 and 70/30% (soil/organic material, V/V), where the hydrophysical characterization was obtained by means of the porometer technique. Subsequently, the six substrates of the mixture (70/30%) of this test were chosen, in addition to the soil, where the gravimetric moisture loss in the greenhouse was evaluated, after substrate saturation. The results by the BET method highlight the soil as a mesoporous material with a specific surface of $28.47 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. While, for the moisture retention capacity of the substrates, the best mixture was the ≤ 2 mm particle size vermicompost with soil. With the reported data, it was observed that organic material mixed with soil improves moisture retention, as well as aeration in it; In addition, the particle size in which these materials are used, modifies the arrangement of the substrate particles and alter the volume occupied by them, therefore, the apparent density, the total pore space and the aeration capacity are affected.

Keywords: *drought, moisture retention capacity, aeration*

I. Introducción

Cada ciclo de cultivo, los productores en el campo se enfrentan a dificultades para la producción de alimentos, por lo tanto, sus ingresos económicos se ven afectados; esto debido a fenómenos naturales como las sequías (FAO, 2005).

Actualmente, se reconoce que las aplicaciones de materia orgánica le proporcionan al suelo mayor capacidad para la retención de humedad; sin embargo, no se sabe en qué proporciones se logran las mejores condiciones para las plantas. Solamente se ha estimado que un suelo de clima templado puede estar en buenas condiciones si este presenta un 5% de materia orgánica y para los suelos tropicales 3.5% (Núñez, 2000; Sánchez, 1981).

En agroecología, donde la aplicación de todo tipo de materiales orgánicos al suelo es bien vista, especialmente como fertilizante y como retenedores de humedad (Félix *et al.*, 2008; Aguilar *et al.*, 2012; Cruz *et al.*, 2009), es importante conocer qué tipo de materiales y en qué proporciones pueden construir medios más efectivos, que posean las condiciones ideales para mantener la humedad en el suelo y permitir que las plantas no sufran estrés hídrico.

En este sentido, el presente trabajo busca evaluar la porosidad del suelo y el comportamiento de humedad de los materiales orgánicos: carbón vegetal, lombricomposta y estiércol, en diferentes tamaños de partícula; así como un acercamiento a las mejores condiciones físicas de humedad de un sustrato de suelo mezclado con los materiales orgánicos ya mencionados.

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Agroecología de la BUAP, de donde se obtuvo la muestra de suelo para la experimentación, y se realizó la evaluación de las características hidrofísicas de los materiales.

Así, en el presente proyecto se hizo la caracterización física del suelo por adsorción de nitrógeno, además, logró conocer el efecto del tamaño de partícula de los materiales orgánicos en la retención de humedad y la variación en el comportamiento de la humedad debido a las proporciones en que los materiales orgánicos son agregados al suelo.

II. Antecedentes

La demanda de alimentos se encuentra en aumento constante, y en los próximos tiempos éstos tendrán que provenir de la agricultura de secano, en donde se tendrá que aplicar agua para garantizar las cosechas o establecer métodos que hagan más eficiente el uso de la poca humedad disponible (W. Kijne, 2003).

Ya que es difícil incrementar las áreas de cultivo con métodos de irrigación, es importante atender zonas de bajos niveles de precipitación, que por falta de agua baja la producción, especialmente en donde las lluvias no son muy frecuentes (Postel, 1991); y, por lo tanto, someten a las plantas a un estrés hídrico por disminución de la humedad disponible en el suelo, con afectaciones directas en los procesos fisiológicos y en una disminución de los rendimientos de los cultivos (Velasco *et al.*, 2005).

El agricultor de temporal siembra cuando la tierra está humedecida y cultiva si los periodos de lluvia lo permiten, es decir, está sujeto al patrón de lluvias del lugar. Con los fenómenos del cambio climático global es probable que las oportunidades de producir alimentos también sean afectadas. Generalmente se pueden perder las cosechas si las lluvias se interrumpen, durante el periodo de crecimiento, la floración y fructificación de las plantas, afectando la llegada al estado de madurez y llenado del grano (Davies y Albrigo. 1994).

La evaporación es otro factor que debe tomarse en cuenta, porque en lugares donde son frecuentes los vientos secos o días muy soleados, ésta puede ser mayor (Escobar, 2014) y someter a las plantas con facilidad a condiciones de estrés por insuficiencia de humedad, que afectan las funciones de crecimiento y desarrollo para garantizar la producción de los cultivos.

El número de eventos de lluvia en las regiones áridas y semiáridas es mínimo y este viene determinado por las condiciones climatológicas del lugar. En la agricultura de secano, por lo tanto, los esfuerzos deben ser concentrados en el uso eficiente del agua, en el incremento de la proporción de agua para infiltración, y en la minimización de la pérdida de humedad por escorrentía y evaporación (Shaxson y Richard, 2005).

Según el Manual de Agricultura de Conservación de la FAO (2007), los materiales orgánicos protegen físicamente al suelo del sol, de la lluvia y del viento, y además alimentan a la biota del suelo de forma permanente o semipermanente. Asimismo, conducen a una mayor agregación de suelo y más porosidad, con los que tienden a aumentar la aireación, la infiltración y la retención del agua.

La disponibilidad de humedad en el suelo puede ser mejorada con la incorporación de materiales orgánicos; pero el tamaño de partícula y la porosidad de los materiales pueden lograr efectos en la retención de humedad cuando están solos o cuando se mezclan con el suelo (Gutiérrez *et al.*, 2011). Esto puede ser importante, tanto en espacios controlados como a campo abierto, para mejorar la fertilidad física del suelo, que unida a la fertilidad química y biológica se generarían suelos con características más ideales para la producción de alimentos (FAO, 2012).

III. Marco teórico

3.1 El agua en la agricultura

El uso del agua en la agricultura a nivel mundial aumenta y está relacionado con el crecimiento de la población por la demanda de alimentos. En el 2002 la FAO ya reconocía que el 69% era de uso agrícola, el 12% municipal y el 19% industrial; sin embargo, existen países que utilizan menos del 25% del agua dulce disponible, mientras que otros pueden utilizar hasta el 98% (Figura 1).

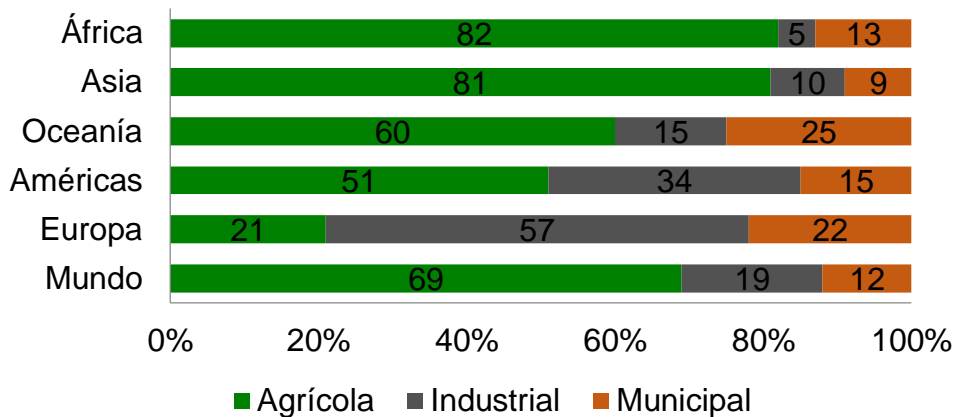
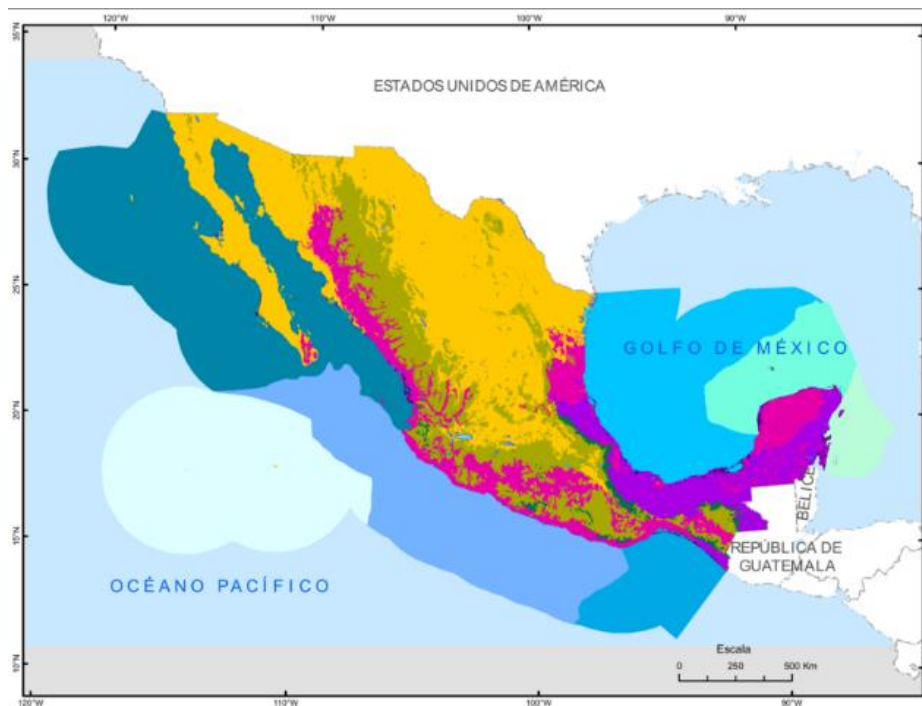


Figura 1. Extracción de agua dulce por continente (FAO, 2002).

A nivel mundial, la importancia de la extracción de agua agrícola, proveniente de ríos y acuíferos, depende en gran medida del clima y del lugar que ocupe la agricultura en la economía (FAO, 2016), de modo que en tanto más frío sea el lugar, la cantidad extraída es menor. Y la eficiencia del uso del agua está determinada por el tipo de irrigación aplicada: en un sistema de riego por surcos o inundación, se pierde entre el 45-50% del agua aplicada; en el sistema por aspersión se pierde un 30%; y en el riego por goteo, solamente se pierde un 5% (Vélez, 1993).

Se reconoce que los sistemas de irrigación son tecnologías muy apreciables para garantizar las cosechas de alimentos, pero estos solamente existen si se tienen volúmenes considerables de agua, de modo que, si ésta es escasa, es necesario buscar

otras alternativas tecnológicas que hagan eficiente el uso del agua, a través de la retención de humedad y no por la aplicación, logrando la disponibilidad en el sistema radicular cuando las plantas lo requieran. Esto es especialmente importante en México, ya que el 48% del país presenta condiciones áridas y semiáridas, en donde la precipitación pluvial no rebasa los 380 mm anuales (Figura 2) y, por lo tanto, en esas regiones la agricultura puede ser imposible, a menos que exista un periodo de concentración de lluvias que permitiera cultivos de ciclo corto y de escaso requerimiento de humedad.



Zona ecológica	% del territorio nacional
■ Árida y semiárida	48
■ Tropical subhúmeda	17
■ Templada subhúmeda	14
■ Tropical húmeda	13
■ Templada húmeda	3
■ Transición mar-tierra	5

Figura 2. Zonas ecológicas de México (Toledo y Ordóñez, 2009).

Y las zonas ecológicas subhúmedas (tropical y templada), que tienen precipitaciones anuales del orden de 600-1600 mm (CONAFOR, 2012), pueden presentar cierta vulnerabilidad a la pérdida de cosechas, especialmente si presentan periodos de menor precipitación intermedias, como el fenómeno climatológico llamado canícula, que es la temporada del año con mayores niveles de calor, la cual dura entre cuatro y siete semanas, entre los meses de julio y agosto (UNESCO, 2018).

Por lo tanto, resulta muy importante buscar tecnologías que permitan alargar la retención de humedad en el suelo, para brincar periodos cortos de sequía, y así salvar o garantizar las cosechas.

3.2 La agricultura en México

A pesar de las condiciones extremas de disponibilidad de humedad en el suelo, en la mitad del territorio nacional, en México el sector agropecuario juega un papel muy importante en la producción de alimentos, tan sólo de maíz se producen un poco más de 21 millones de toneladas y de frijol, más de 800 mil toneladas (SIAP, 2019), cultivos con los que se generan empleos e ingresos para los mexicanos; pero este sector tiene que enfrentar situaciones adversas como la presencia de fenómenos naturales entre los que figuran sequías (Rodríguez y Juárez, 2011).

Además, debe tomarse en cuenta que nuestro país no tiene soberanía ni autosuficiencia alimentarias, por cuanto importa la tercera parte del maíz que se consume en México. Si bien el maíz producido alcanza para el consumo humano, para el consumo animal es insuficiente (SAGARPA, 2017). Por lo tanto, se hace necesario enfocar objetivos sobre las áreas áridas y semiáridas del país para integrarlas a la producción de alimentos.

3.3 El suelo y la agricultura

El suelo cultivado es el medio que sostiene sostener y alimenta a las plantas con objetivos de producción; en donde el suelo ideal se reconoce como aquel que contiene un 45% de

rocas intemperizadas, 5% de materia orgánica, 25% de agua y 25% de aire (Gliessman, 2002). Y sólo en clima tropical el suelo ideal tendría 3.5% de materia orgánica, de modo que si algún suelo contiene menor cantidad de materia orgánica sería un suelo degradado.

En el concepto de fertilidad del suelo se conjugan las partes: física, química y biológica; y si alguno de ellos no está en condiciones óptimas, ese tipo de suelo no tiene las capacidades suficientes para la sostenibilidad productiva (Navarro y Navarro, 2014) y, por lo tanto, requiere de actividades de rehabilitación para su mejoramiento.

De la parte física del suelo (Julca, 2006), la estructura y textura, que le proporcionan estabilidad, y define la distribución del espacio poroso, y determina la densidad aparente del suelo, que influye en el movimiento del agua y la presencia de aire. Con ellos se dan fenómenos como la infiltración del agua, el crecimiento radicular, la solución de minerales y la nutrición de las plantas.

Las reacciones químicas en el suelo van a depender en gran medida de la presencia de humedad y sustancias mineralizables que puedan formar parte de la solución del suelo, y dependiendo de su riqueza en nutrimentos que las plantas utilizan (López *et al.*, 2001), se podría reconocer el nivel de fertilidad química de ese suelo. Solamente cuando existan otras condiciones como la alcalinidad y la acidez, pueden favorecer o disminuir la disponibilidad de nutrimentos, que provocan deficiencias, condiciones óptimas o condiciones de toxicidad, las cuáles se manifiestan el rendimiento final de los cultivos (De las Heras, 2003).

La parte biológica del suelo comprende la presencia de organismos macro, meso y microbiológicos que cumplen funciones en los diferentes ciclos biogeoquímicos, hasta lograr un estado dinámico del suelo, que muchos investigadores le otorgan el concepto de suelo vivo (Roger, 1985; Ferrer-Cerrato y Alarcón, 2001; Sánchez, 2018). La biodiversidad puede infundirle al suelo un nivel de calidad, de modo que un suelo con biomasa alta puede estar relacionadas con la presencia de materiales orgánicos susceptibles de descomposición y, por lo tanto, mayor capacidad para la producción de alimentos.

En muchos casos se reconoce a la actividad microbiana como un indicador directo de la calidad del suelo (Jaurixje *et al.*, 2013), debido a que el 80% de la biomasa del suelo corresponde a microorganismos; sin embargo, también debe reconocerse que la macrofauna, por su tamaño y su actividad, puede modificar las características físicas del suelo al inducir una redistribución de los materiales orgánicos, con influencia en los movimientos de agua y en la presencia de microorganismos, especialmente de aquellos que conforman el grupo funcional de ingenieros del ecosistema (Cabrera, 2012).

Las características físicas, químicas y biológicas del suelo, conforman un medio óptimo para las plantas, un hábitat para los organismos y un suelo con altas potencialidades para la producción de alimentos (Solórzano, 1997).

En Agroecología, el mejoramiento físico del suelo se aprecia al influir en la aireación, con la aplicación de materiales orgánicos en diferentes estados de descomposición y con el mejoramiento de capacidades de retención de humedad (García *et al.*, 2012). A la vez que estas aplicaciones de materiales orgánicos son fenómenos de alimentación para la biota del suelo, inician el proceso con los organismos descomponedores, hasta lograr todas las interacciones ecológicas que pueden darse en ese suelo (Larios *et al.*, 2014).

3.4 Propiedades del suelo que afectan el comportamiento de la humedad

El comportamiento del agua en el suelo es considerado como el problema más importante entre los problemas físicos del suelo y tiene que ver con las formas de introducción del agua al suelo y el mecanismo de retención (Fernández *et al.*, 2020). Además, de los fenómenos de extracción por las plantas (transpiración) y por los factores ambientales (evaporación) (Escobar, 2014).

Las características básicas del suelo dependen principalmente de la cantidad relativa de los componentes físicos del mismo, y de la distribución por tamaño de las partículas de la fracción mineral, de la estructura o modo como están organizadas, de la clase de minerales arcillosos presentes, así como de la cantidad de materia orgánica. La fracción

arcillosa es una de las que controlan más las propiedades químicas y físicas del suelo, así como la textura, la estructura y porosidad (López, 2000).

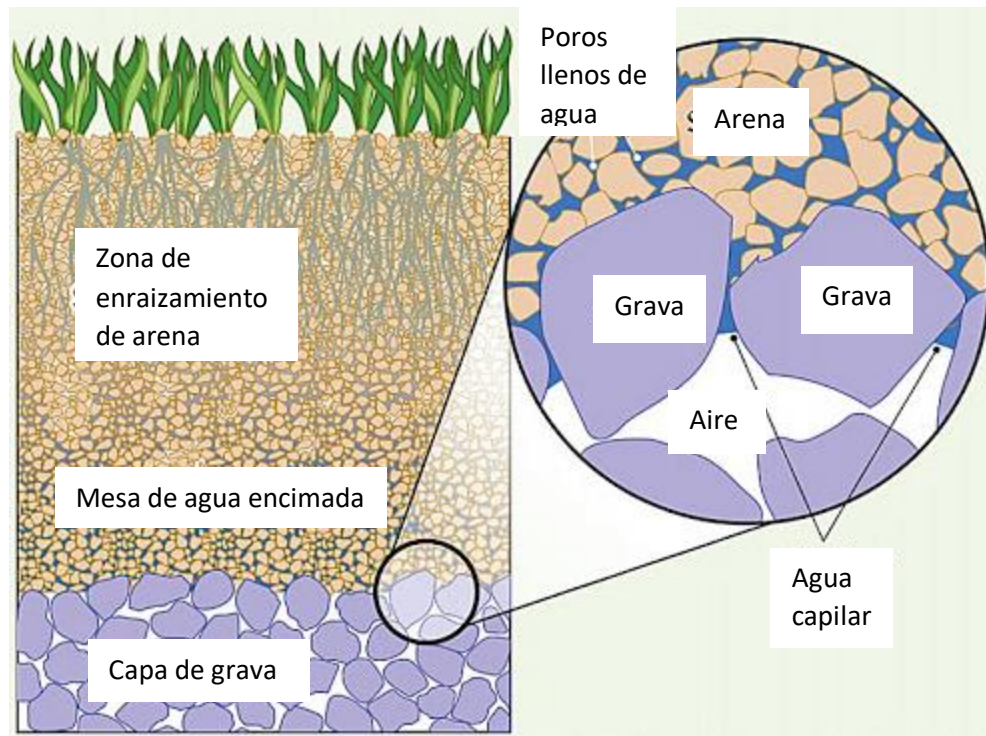


Figura 3. Porosidad del suelo (Weil, 2017).

3.4.1 Tamaño de partícula y porosidad

El aumento de la porosidad del suelo es inversamente proporcional a la capacidad del suelo para retener el agua y al mismo tiempo incrementa la velocidad de infiltración de la misma en el suelo. De igual manera, la compactación del suelo disminuye el tamaño de los poros, disminuye la velocidad de infiltración y la densidad del suelo se incrementa. La capacidad del suelo para el movimiento del agua está determinada por la textura; así los suelos arenosos presentan una alta permeabilidad, en comparación con los suelos arcillosos (Villalobos, 2017).

El tamaño y distribución de los poros y la proporción agua-aire está dada por la granulometría del sustrato (Vargas *et al.*, 2008) y, por lo tanto, influye en el desarrollo de las plantas.

La granulometría es la distribución de partículas según su tamaño; y generalmente si estas aumentan su dimensión también, el espacio poroso lo hará. Tiene importante efecto sobre la proporción humedad-aire. El tamaño de partícula se relaciona con la capacidad de retención de agua, facilidad de circulación de la misma, y capacidad de almacenar nutrimentos. El espacio poroso de un sustrato está definido por la naturaleza del material, configuración espacial y de su distribución granulométrica (Villegas, 2017).

Como se muestra en la figura 4, un suelo arenoso retiene menor cantidad de humedad que un suelo franco o arcilloso, ya que el tamaño de sus partículas es mayor, por lo tanto, posee poros de mayor tamaño (Valverde, 2007) y la superficie de contacto es menor.

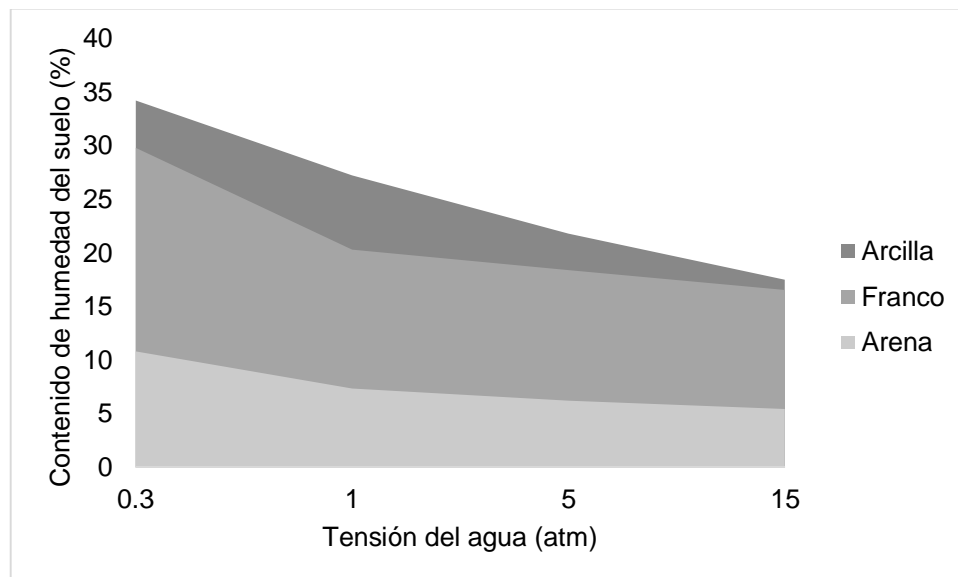


Figura 4. Curvas de retención de agua de la textura del suelo (Valverde, 2007).

3.5 Curvas de liberación de humedad

Cada sustrato presenta su propia curva de liberación de humedad, ésta derivada de la aplicación de diferentes succiones, en la cual el material perderá una determinada

cantidad de agua y representa la humedad disponible en el medio para cada tensión aplicada o el potencial matricial (López *et al.*, 2015).

El rango de succión, para determinar la distribución de agua-aire y los sólidos, es de 0 a 100 cm de c. a., donde se aplican tensiones de 10, 50 y 100 cm, a partir de las cuales se traza la curva (Ansorena, 2016), y se obtienen las variables (Figura 5): capacidad de retención de humedad (CRH), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD), agua total disponible (ATD), densidad aparente (DA) y material sólido (MS).

El Espacio Poroso Total está condicionado por el tamaño y distribución de las partículas y constituye la zona que puede ser ocupada por la relación aire-agua, los cuales deben ser suficientes y estar disponibles ya que, son esenciales para el desarrollo de las plantas (Villegas, 2017).

La diferencia entre el Espacio Poroso Total y el contenido en humedad a 10 cm de c.a., es la Capacidad de Aireación y es el espacio que da respiración a las raíces, es decir, el volumen de aire contenido en el sustrato después de la saturación y el drenaje libre (Serrano, 2004).

El porcentaje de agua liberada al incrementar la tensión de 10 a 50 cm de c.a. está dada por el Agua Fácilmente Disponible, y como su nombre lo indica es el agua que las raíces pueden obtener fácilmente (Fernández, 2001).

El Agua de Reserva es el porcentaje de agua drenada al aumentar la tensión de 50 a 100 cm de c.a., para la cual, las raíces de la planta requieren de una mayor cantidad de energía para su extracción (Serrano, 2004).

El porcentaje de agua retenida en el sustrato a 100 cm de c.a., y que no puede ser aprovechada por las plantas (San Martín *et al.*, 2012), es el Agua Difícilmente Disponible.

El Agua Total Disponible es el agua liberada al incrementar la tensión de 10 a 100 cm de c.a., es decir, $ATD = AFD + AR$

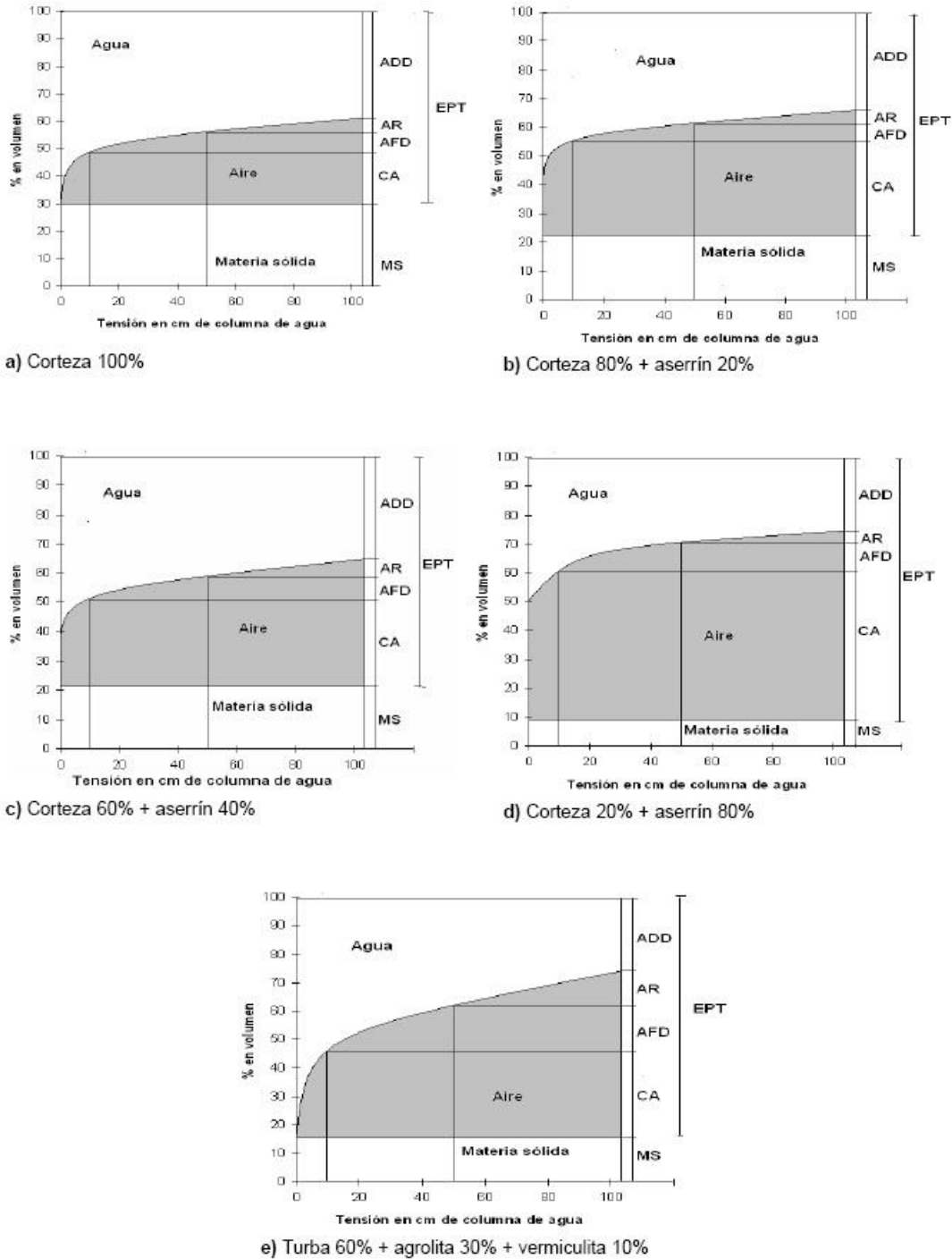
La Densidad Aparente es la relación entre la masa de las partículas y el volumen que éstas ocupan, incluyendo el espacio con poros, por lo tanto, la compactación del material

disminuirá la densidad aparente y aumentará la retención de humedad (Hernández, 2009).

La cantidad de agua contenida después de la saturación del material y un libre drenaje es la Capacidad de Retención de Humedad e indica la disponibilidad de humedad por mayor tiempo para la planta.

El material sólido o volumen de partículas representa el espacio ocupado por las mismas.

Es importante considerar que un sustrato debe presentar suficiente capacidad de aireación y una alta capacidad de agua fácilmente disponible (López *et al.*, 2015).



ADD: agua difícilmente disponible, AR: agua de reserva, AFD: agua fácilmente disponible, CA: capacidad de aireación, MS: materia sólida, EPT: espacio poroso total.

Figura 5. Curvas de liberación de agua de cinco mezclas de sustratos (Pineda *et al.*, 2012).

3.6 Materiales orgánicos

Según Trinidad (2009), los abonos orgánicos influyen favorablemente sobre las características físicas del suelo, la llamada fertilidad física, como la estructura, porosidad, aireación, capacidad de retención de agua, infiltración y estabilidad de agregados.

Al aumentar la materia orgánica en el suelo, le infundirá una mayor permeabilidad (agua-aire), con beneficios en la porosidad y la actividad de la fauna edáfica, con grietas, galerías y disponibilidad de alimento.

Cuando un suelo cuenta con un óptimo contenido de materia orgánica, su estructura granular es estable y la actividad microbiana es mayor y como consecuencia, mejor infiltración y circulación del agua, disposición de la misma para la planta, menor evaporación y compactación, mejor retención de humedad y una aireación equilibrada. Lo anterior, es debido a que los parámetros del balance de agua son físicos (textura, estructura, porosidad) y se relacionan con la cantidad y estado de la materia orgánica; además, la propiedad hidrófila de los coloides de la materia orgánica hace aumentar la capacidad de retención de humedad (De las Heras, 2003). Sin embargo, es necesario que la materia orgánica esté integrada al suelo, de lo contrario si las partículas de materiales o tejidos orgánicos son mayores permitirá un mayor nivel de porosidad y una menor cantidad de agua retenida (Figura 5).

Entre los materiales orgánicos más utilizados están variedades de estiércol (vacuno, caprino y ovino), compostas, restos de cultivo, bokashi, restos de cultivos, tierra de bosque y pollinaza (Pérez *et al.*, 2008).

Los sustratos distinguen del suelo en el aumento de los poros, así como el aumento en el tamaño de estos poros y debido a la distribución del tamaño de sus partículas, cada sustrato tiene un comportamiento respecto a la retención de agua y aire en el espacio poroso, debido a las propiedades físicas de cada material (López *et al.*, 2015).

IV. Justificación

El estado actual de los suelos en México no puede considerarse de alta calidad física, debido a que tienen disminuidas sus capacidades de retención de humedad por la baja cantidad de materia orgánica contenida, además, si éste se ubica en áreas de baja precipitación provocará pérdidas en la producción agrícola, por lo tanto, en la economía del agricultor.

Actualmente, se reconoce que los materiales orgánicos en el suelo, además, de aportar nutrimentos pueden retener humedad, por lo tanto, es importante estudiar las relaciones de la proporción entre el suelo y los materiales orgánicos, su tipo y el tamaño de las partículas; para lograr un medio más efectivo, para los requerimientos de humedad de las plantas, para repercutir en la disminución de la pérdida agrícola por sequía.

V. Objetivos

5.1 General

- Evaluar la funcionalidad de diferentes materiales orgánicos aplicados al suelo para mejorar la retención de humedad, considerando el tamaño de las partículas, que permita el óptimo desarrollo de las plantas en regiones de bajo nivel de precipitación.

5.2 Específicos

- Determinar la superficie específica (superficie de contacto), de las partículas y los grupos de tamaños de poro que conforman el suelo en estudio.
- Identificar el comportamiento de humedad de los materiales orgánicos: carbón vegetal, lombricomposta y estiércol de bovino, por el tamaño de partícula (≤ 2 mm y entre 2.1-5 mm).
- Evaluar la capacidad de retención de humedad de sustratos en las proporciones: 30/70%, 50/50% y 70/30%, suelo/material orgánico (V/V).

VI. Hipótesis

La capacidad de adsorción del suelo en estudio define la forma en que las partículas de agua serán adheridas a las partículas del mineral.

Los materiales orgánicos al integrarse con el suelo modifican el acomoda las partículas, que altera el espacio poroso y mejoran la capacidad de retención de humedad.

Los tipos de materiales orgánicos y las proporciones en que estos son agregados al suelo, modifican las características hidrofísicas del sustrato.

VII. Métodos

7.1 Área de estudio

El suelo utilizado para el estudio corresponde al horizonte B de un suelo Feozem, el cual queda al descubierto después de que el horizonte A fue erosionado. De este suelo se realizaron análisis fisicoquímicos, mezclas con materiales orgánicos y se evaluó su comportamiento en retención de la humedad.

El suelo utilizado se ubica en la zona sur de la junta auxiliar de San Pedro Zacachimalpa, Puebla (Figura 6), el cual se encuentra a una altitud de 2120 msnm, presenta una precipitación media anual de 622.2 mm, con una temperatura media anual de 17.0 °C (INEGI, 2009).



Figura 6. Ubicación del punto de muestreo (18°93'51" N, 98°15'87" O)

El suelo utilizado fue una mezcla compuesta de un área de 400 m² y de una profundidad máxima de 30 cm, obtenida en zig-zag siguiendo la NOM-021-RECNAT-2000.

Los materiales orgánicos utilizados fueron carbón vegetal, lombricomposta VermiBUAP y estiércol de bovino, los cuales son los más disponibles en la zona.

Los materiales orgánicos fueron tamizados para separar dos diferentes tamaños de partícula: ≤ 2 mm y entre 2.1-5 mm de diámetro (Figura 7).







	Carbón vegetal	Lombricomposta	Estiércol bovino
2 mm			
5 mm			

Figura 7. Materiales orgánicos utilizados en el análisis del comportamiento de la humedad.

7.2 Diseño de la investigación

La investigación comprende tres etapas de análisis: la primera comprende el estudio de la física del suelo a través de la observaciones directas del suelo mediante cromatografía de gases y microscopía electrónica de barrido, con el fin de identificar los grupos de tamaño de partícula y estimar la superficie de contacto que generan esos grupos de partícula del suelo; en la segunda etapa se abordó el análisis de las características físicas del suelo y los materiales orgánicos, con el fin de obtener resultados que lleven a la decisión de elaborar sustratos que respondan a los requerimientos físicos que las plantas requieren como la de porosidad y contenido de humedad. En la tercera etapa se analizó la viabilidad de desarrollo de las plantas en sustratos que fueron analizados físicamente en laboratorio.

La intención con esta investigación es identificar las características físicas más viables para la producción de plantas sin tener que montar un experimento para identificar al

mejor sustrato. Este último paso es posible evitarlo si desde un principio se seleccionara en laboratorio al sustrato que presente las mejores características físicas.

7.2.1 Caracterización física por partículas

El suelo se caracterizó por medio del método de fisisorción de nitrógeno (Carballo, 2002) en un cromatógrafo de gases (Figura 8), donde se obtuvo la distribución de tamaño de poro, superficie específica (S_E) o superficie de contacto y el volumen total de poro (V_Σ); y a través de un microscopio electrónico de barrido (figura 9) se realizó el análisis de Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) (Ipohorski y Bozzano, 2013), donde se determinaron los elementos químicos presentes en la muestra.



Figura 8. Cromatógrafo de gases (Quantachrome AutoSorb-As1).

La superficie específica hace referencia a la suma total del área de la partícula por unidad de volumen ($m^2 m^{-3}$) o masa ($m^2 g^{-1}$), por lo tanto, una mayor cantidad de partículas, la superficie de contacto será mayor. Es importante, debido a que la parte activa de la partícula es directamente proporcional a la cantidad de agua y nutrientes que el suelo puede retener (Navarro y Navarro, 2003).

El volumen total del poro es el espacio vacío entre las partículas por gramo de suelo ($cm^3 g^{-1}$) y va a depender del tamaño de las mismas (Izquierdo *et al.*, 2004).

Los grupos de tamaños de poros se categorizan en tres: macroporos (> 50 nm), mesoporos (2-50 nm) y microporos (< 2 nm), los dos primeros dados por los espacios vacíos entre las partículas, mientras que los últimos son sitios atómicos dentro de esas partículas (Claramunt y Esteban, 2017).

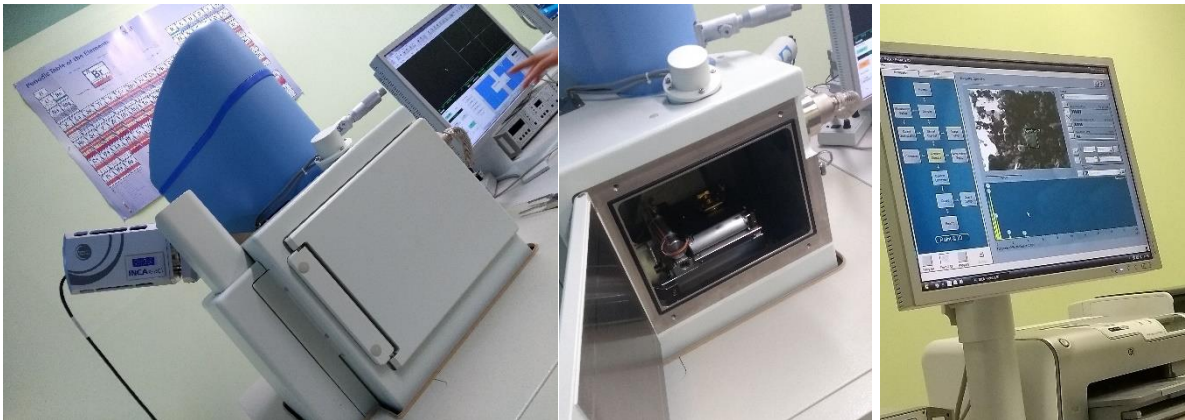


Figura 9. Microscopio electrónico de barrido (SEM).

La determinación de los elementos químicos por EDS permitió detectar el tipo y la cantidad de los elementos contenidos en las partículas del suelo, si su concentración es mayor a 1%, a través de un espectro que grafica la energía que produce cada fotón de los elementos por emisión de pulsos de altura (Ipohorski y Bozzano, 2013).

7.2.2 Caracterización física por contenido de humedad

La retención de humedad es la capacidad que tiene el suelo de absorber y retener agua en el espacio poroso entre las partículas del suelo. El análisis de esta característica se realizó por medio dos técnicas:

- 1) Las curvas de liberación de humedad del suelo y materiales orgánicos: carbón vegetal, lombricomposta y estiércol de bovino, con tamaño de partícula de 2 y 5 mm, se estimaron por medio de la técnica de embudos (De Boodt *et al.*, 1974) como se muestra en la figura 10, donde las variables resultantes fueron: capacidad

de retención de humedad (CRH), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD), agua total disponible (ATD), densidad aparente (DA) y material sólido (MS).



Figura 10. Embudos con muestras de materiales orgánicos sometidos a tensión.

- 2) La técnica del porómetro (Handreck y Black, 2005) donde se definieron: el volumen de partículas (V_{part}), capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de humedad (CRH) y espacio poroso total (EPT) y se aplicó para el suelo, los materiales orgánicos (carbón vegetal, lombricomposta y estiércol de bovino) y sus mezclas. Los factores de estudio correspondieron al tamaño de partícula: 2 y 5 mm y a la relación suelo/material orgánico (Figura 11 y 12): 30/70, 50/50 y 70/30 % (V/V); respectivamente. Además, todos los materiales se valoraron de manera individual.

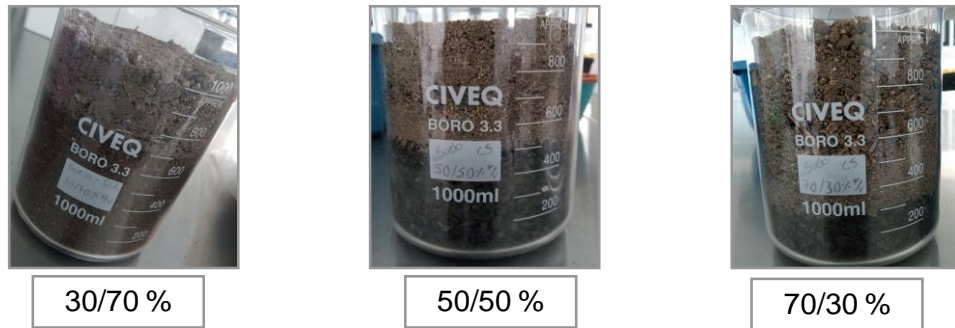


Figura 11. Sustratos: suelo/material orgánico % (V/V).



Figura 12. Porómetros con muestras de materiales orgánicos en estado de saturación.

7.2.3 Caracterización por pérdida de humedad en los sustratos

A partir de la evaluación en laboratorio de las nueve mezclas de sustratos, se usó la composición 70/30% (V/V) para el experimento de invernadero, por los resultados favorables presentados en retención de humedad o la variación de ésta con las otras mezclas no fue mayor.

Esta caracterización se realizó en contenedores de 1 L de capacidad, la pérdida de humedad se estimó por el método gravimétrico, después de llevar al sustrato a saturación del espacio poroso, registrándose el peso (g) del contenedor desde el día 1, monitoreándose diariamente, durante 25 días, del 19 de febrero al 15 de marzo de 2019. Durante el tiempo de estimaciones también se registraron la temperatura (°C) con un termohigrómetro Traceable, y la temperatura máxima y mínima (°C) fue registrada con un termómetro Six.

Con el fin de evitar la toma de muestras de suelo de los contenedores, la pérdida de agua fue estimada registrando la disminución de pesos hasta obtener peso constante.

7.2.4 Diseño de tratamientos

Los factores tomados en cuenta para los tratamientos fueron: material orgánico y tamaño de partícula, para obtener un total de 6 tratamientos y un testigo (Cuadro 1), con 5 repeticiones cada uno.

Cuadro 1. Diseño de tratamientos de mezclas de sustratos de suelo con materiales orgánicos.

Tratamiento	Mezcla (Suelo / Material orgánico) (%) (V/V)	Material orgánico	Tamaño de partícula (mm)
1	70/30	Carbón vegetal	≤ 2
2	70/30	Carbón vegetal	2.1-5
3	70/30	Lombricomposta	≤ 2
4	70/30	Lombricomposta	2.1-5
5	70/30	Estiércol Bovino	≤ 2
6	70/30	Estiércol Bovino	2.1-5
7	100/0	Suelo	-

7.2.5 Diseño experimental

Con un total de 35 unidades experimentales, se ubicaron en un diseño de bloques completamente al azar como muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución de unidades experimentales por bloque.

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5
7	5	6	1	6
6	7	1	5	1
3	6	7	2	5
2	4	4	4	3
1	2	2	3	7
4	3	3	7	2
5	1	5	6	4

7.2.6 Análisis estadístico

Por medio del paquete estadístico SAS 9, con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar las diferencias entre tratamientos, previa prueba de homogeneidad de varianzas para el cumplimiento de supuestos; y comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

VIII. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del presente estudio comprenden la caracterización físicoquímica del suelo y la de los materiales orgánicos analizados, así como las curvas de liberación de humedad y las características del comportamiento de la humedad de las mezclas entre el suelo y los materiales orgánicos. Asimismo, el análisis de la pérdida de humedad de los sustratos cuando son sometidos a fenómenos de estrés hídrico en condiciones de invernadero.

8.1 Caracterización de suelo

A pesar del estado de erosión del suelo, este presenta un valor medio de materia orgánica, según el modelo ideal el cual debe contener 5% (Ospina y Ceballos, 2002) y que se puede comparar con lo reportado por Cadena *et al.* (2008) de 2.3% en el mismo tipo de suelo usado en parcelas agrícolas (Cuadro 3).

Carrera *et al.* (2014), evalúan diferentes muestras de suelo franco en los que sus resultados arrojan un pH entre 7 y 7.5. De igual manera los datos de conductividad eléctrica oscilan entre 0.502 y 0.691 dS m⁻¹, para las dos características los resultados de este análisis son muy similares. La capacidad de intercambio catiónico es similar a lo reportado por Salamanca y Sadeghian (2008) en 21 cmol_c kg⁻¹.

Para la densidad aparente se encuentra similitud con Cuevas *et al.* (2006), quienes reportan 1.24 g mL⁻¹, muy similar a lo registrado en esta caracterización, y que se encuentra dentro del rango de la literatura de 1.3-1.6 g mL⁻¹ (Lal, 1994).

Cuadro 3. Caracterización fisicoquímica del suelo de EcoCampus (NOM-021-0 RECNAT-2000).

Parámetro	Unidades	Valor	Interpretación*	Método
pH	-	7.88	Medianamente alcalino	Potenciómetro
Materia orgánica	%	2.67	Medio	Walkley y Black
Nitrógeno total	%	0.105	Medio	Digestado
Capacidad de Intercambio Catiónico	Cmol _c Kg ⁻¹	22.9	Medio	Acetato de amonio
Densidad Aparente	g mL ⁻¹	1.26	-	Probeta
Conductividad Eléctrica	dS m ⁻¹	0.55	Efecto salinidad nulo	Potenciómetro
Arena	%	45		
Limo	%	20	Franco arcilloso	Bouyoucos
Arcilla	%	35		

Las condiciones de erosión del suelo han llegado a afectar la calidad de este suelo de Feozem; en algunas áreas el horizonte A es inexistente y en algunas ha disminuido considerablemente el horizonte B de modo que también pueden detectarse áreas en donde el horizonte C aflora a la superficie mostrándose un suelo con cierta cantidad de pedregosidad, por lo que las muestras de suelo obtenidas podrían contener suelo de los tres horizontes.

8.1.1 Análisis de fisisorción de N₂ para caracterización del suelo en porosidad

La isoterma graficada (Figura 13) presenta dos series de puntos, en donde la primera línea indica el proceso de adsorción del gas (N₂) sobre el material sólido (suelo), sobre el

cual se va formando una capa de partículas adsorbidas. A partir del punto donde la presión marca 0.3, las líneas se separan, esto derivado de un empalme de partículas del gas donde no sólo se adhieren al sólido, sino también sobre las mismas partículas del gas, este fenómeno llamado multicapa (Atkins, 1999), característica de los sólidos mesoporosos, en el cual su tamaño de partícula oscila entre 2-50 nm.

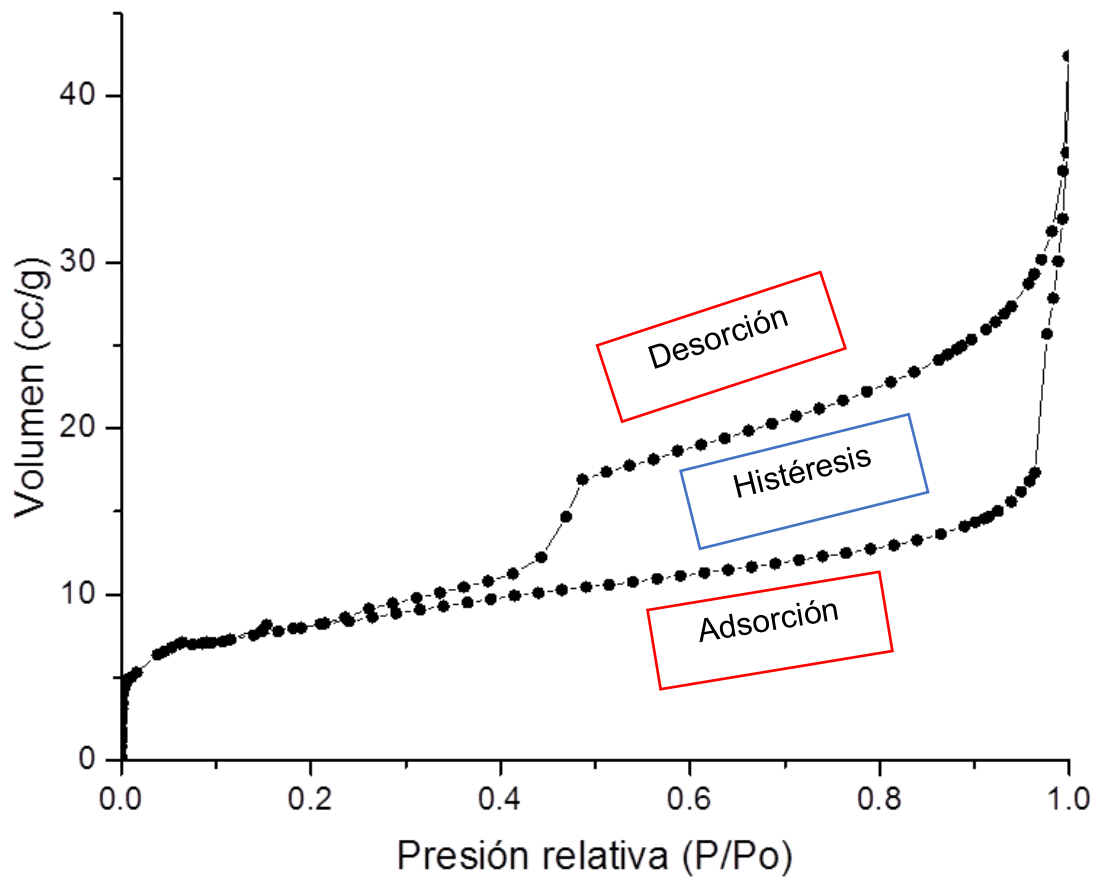


Figura 13. Isotherma de adsorción N₂ a 77K en suelo de EcoCampus Valsequillo

La segunda línea es derivada de la desorción del material, es decir, el proceso inverso a la primera etapa de la fisisorción (Elias, 2012), donde ocurre el desprendimiento de las partículas del gas del suelo, como resultado, se obtiene un ciclo de histéresis (espacio formado entre la línea de adsorción y desorción), esto debido a la forma irregular de los poros, no permiten que la desorción se lleve cabo por el mismo camino de la adsorción

(Guzmán, 2007); con la formación de una isoterma tipo IV que se presenta como característica de los materiales con poros en forma de rendija muy estrecha (Sing, 2014).

Con el análisis de fisisorción se determina la clasificación del tamaño de poro, con el que se observa que el poro de 3.8 nm es el predominante (Figura 14), seguido por el poro de 3.6 nm y 3.4 nm en tercer lugar; con una menor proporción los poros que van de 4 a 25 nm.

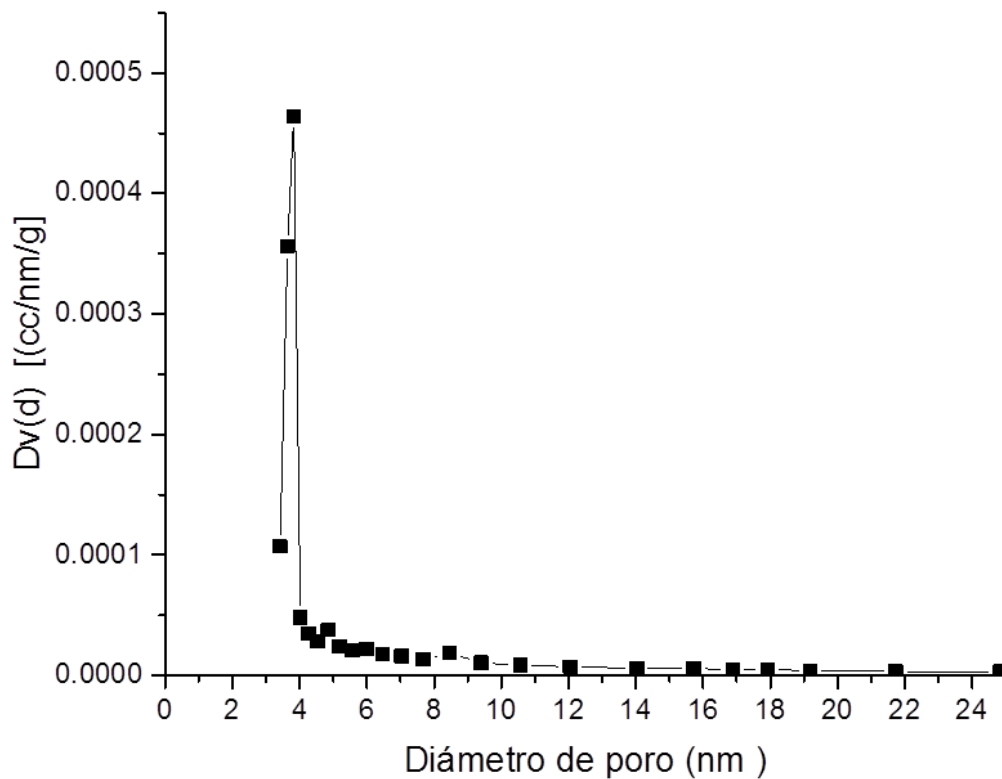


Figura 14. Distribución de tamaño de poro de suelo de EcoCampus Valsequillo.

8.1.2 Superficie específica o superficie de contacto

De los dos métodos aplicados (BET y Langmuir), por su coeficiente de correlación más cercano a 1, la superficie específica del suelo en estudio es de $28.47 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Cuadro 4),

es decir, que un gramo de este suelo presenta esa cantidad total como superficie de contacto.

Brenauer *et al.* (1938), describe que el método BET es el que se debe utilizar en materiales mesoporosos como describieron las características del suelo en la isoterma (Figura 13). Ruiz *et al.* (2016), reportan un valor de S_E de $25.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ para un suelo con 40% de arcilla, en comparación con un 35% de arcilla del suelo en estudio.

Con el método de fisorción se logró estimar que el espacio poroso del suelo en estudio es de 0.659 cm^3 en cada gramo de suelo, que es el espacio en donde se puede almacenar agua o aire.

Cuadro 4. Métodos para determinación de superficie específica y volumen total de poro.

	Método	
	BET	Langmuir
S_E ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)	28.47	35.83
Constante	557	83.73
Coefficiente de correlación	0.999	0.998
Distribución tamaño poro (nm)	3.8	
V_Σ ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	0.659	

8.1.3 Análisis de elementos químicos por microscopía electrónica

En el análisis realizado en microscopio electrónico de barrido (SEM) se tomaron cinco fotografías (spectrum), las cuales arrojaron los elementos químicos presentes en las diferentes partículas de suelo (Figura 15), así como un análisis estadístico por el programa (Cuadro 5).

En este se puede observar que el elemento predominante promedio es el hierro (Fe), aunque se ve elevado por el valor presentado en el spectrum 5 donde se tiene un valor de 22.46% (Cuadro 5) y según indican Navarro y Navarro (2003) se encuentra dentro del

rango óptimo del 1-5% en los cuatro spectrum restantes. En el caso del calcio (Ca) se observa un promedio de 6.19%, donde los cinco spectrum arrojan valores con una variación menor a diferencia del hierro.

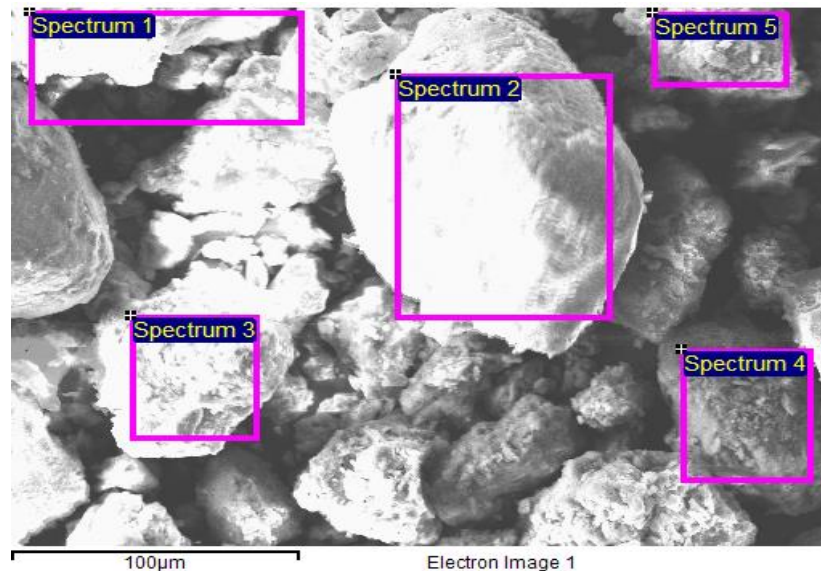


Figura 15. Análisis de Espectroscopia de Dispersión de Energía del suelo en estudio.

Cuadro 5. Contenido de elementos (% peso) en suelo de Ecocampus Valsequillo.

Spectrum	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Total
Spectrum 1	56.70	0.77	1.02	7.01	21.52	0.66	7.74	0.43	4.14	100
Spectrum 2	56.44	3.20	0.51	10.5	23.89	0.29	3.69	0.10	1.29	100
Spectrum 3	55.45	0.41	1.27	7.75	22.00	0.60	8.10	0.48	3.94	100
Spectrum 4	56.26	0.19	1.57	8.08	22.32	0.60	5.97	0.38	4.63	100
Spectrum 5	50.91	0.62	1.23	5.33	12.78	0.48	5.46	0.73	22.46	100
Promedio	55.15	1.04	1.12	7.75	20.50	0.52	6.19	0.42	7.29	100
Desviación std	2.41	1.23	0.39	1.91	4.41	0.15	1.79	0.23	8.58	-
Máximo	56.70	3.20	1.57	10.5	23.89	0.66	8.10	0.73	22.46	-
Mínimo	50.91	0.19	0.51	5.33	12.78	0.29	3.69	0.10	1.29	-

En el cuadro 5, se observan posibles deficiencias de potasio (K), ya que la mayoría de los cultivos presentan requerimientos entre 0.5-2% (Thompson y Troeh, 2002); mientras que el oxígeno (O), aluminio (Al) y silicio (Si) se ven predominantes, dado que son los constituyentes en la arcilla (Quiroz *et al.*, 2016).

8.2 Caracterización de materiales orgánicos

López *et al.* (2001), presentan datos de pH en estiércol de 8.2 y 8.4, parecido a lo arrojado en la presente investigación, mientras que Nieto *et al.* (2002), para lombricomposta indican un valor de 7.57, ligeramente mayor al estimado en este trabajo; esto mismo sucede en conductividad eléctrica, quienes observaron 1.7 dS m⁻¹, mientras que en la muestra analizada el valor mayor fue de 1.27 (Cuadro 6). En cambio, la CE del carbón vegetal, es ligeramente mayor a lo consignado por Hernández *et al.* (2014) en sustratos vegetales (0.25 dS m⁻¹).

Cuadro 6. Caracterización fisicoquímica de los materiales orgánicos.

Parámetro	Unidades	Carbón vegetal		Lombri-composta		Estiércol bovino		Método
		≤ 2	2.1-5	≤ 2	2.1-5	≤ 2	2.1-5	
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	
pH	-	8.20	7.93	6.97	7.11	8.41	8.81	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0.30	0.33	1.24	1.27	0.46	0.98	Potenciómetro
Materia orgánica	%	74.2	91.6	43.3	56.8	54	56.6	Calcinación
Densidad aparente	g cm ⁻³	0.34	0.30	0.32	0.20	0.12	0.12	Embudos

8.2.1 Curvas de liberación de humedad de materiales orgánicos y suelo

En los sustratos, la capacidad de aireación (CA) máxima recomendada en la literatura es 30% (De Boodt y Verdonck, 1972; Abad *et al.*, 1993; Ansorena, 1994). Esto se cumple en valores óptimos sólo en la lombricomposta y el carbón ≤2 mm (Figura 16, a y c), y se observa que los materiales orgánicos con tamaño de partícula mayor aumentan la CA con valores extremos hasta de 51-62%, mientras que el suelo tiene porcentaje de 10.

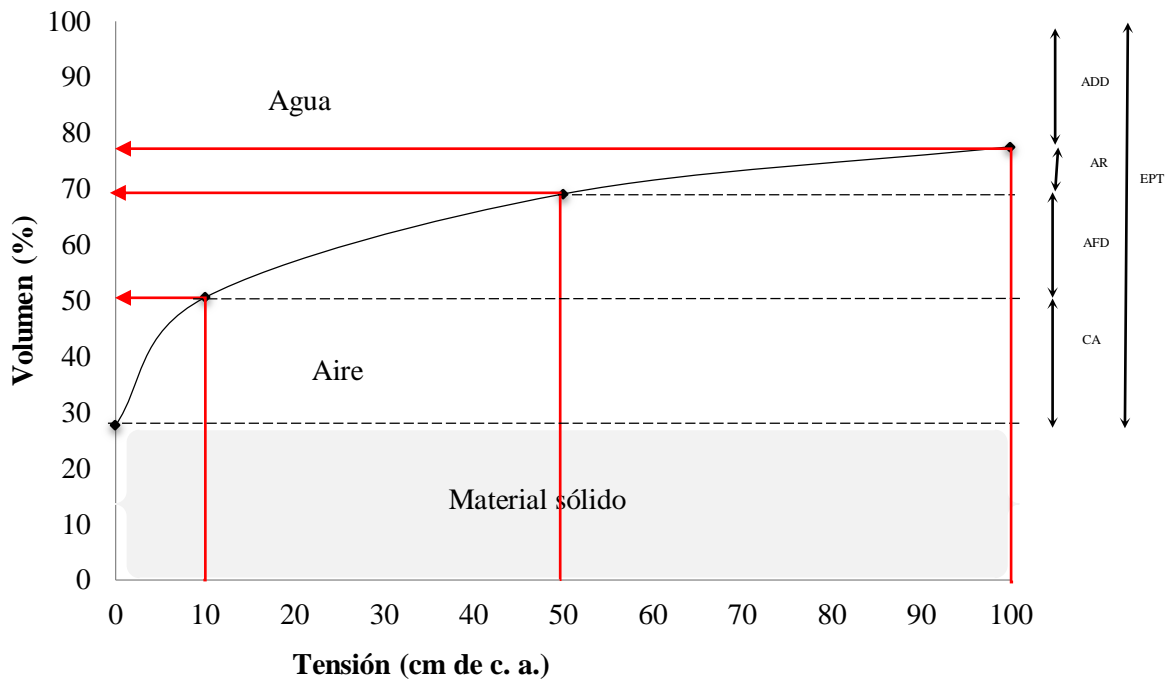
El agua de reserva (AR) disminuye conforme el tamaño de partícula aumenta, con un rango de 1.3-2.3%, mientras que los materiales a ≤ 2 mm están entre 2 y 8%. Aunque esta agua es más difícil de extraer por las plantas, todas las muestras, a excepción del carbón de 2.1-5 mm, contienen más agua fácilmente disponible (AFD).

En la figura 16 g, se observa que el agua de reserva y el agua difícilmente disponible en el suelo es del 39%, esto es importante por las fuerzas de tensión que hay que aplicar para su extracción; por ser un suelo de textura franco arcillosa, puede presentarse un marchitamiento en la planta, conforme la disponibilidad de humedad vaya disminuyendo (Leitón, 1985). Si bien el suelo (Figura 16 g) cuenta con un valor de agua fácilmente disponible más alto que los materiales de tamaño de partícula mayores (Figura 16 b, d y f), también el agua difícilmente disponible (ADD) es alto (33%), de valor similar que la lombricomposta de ≤ 2 mm (Figura 16 c) de 35%, seguido por la lombricomposta de 2.1-5 mm (Figura 16 d) con 27% y los restantes con 22%. López *et al.* (2015) reportan que para materiales compostados de tamaño de partícula de 6 mm, el ADD es de 24%.

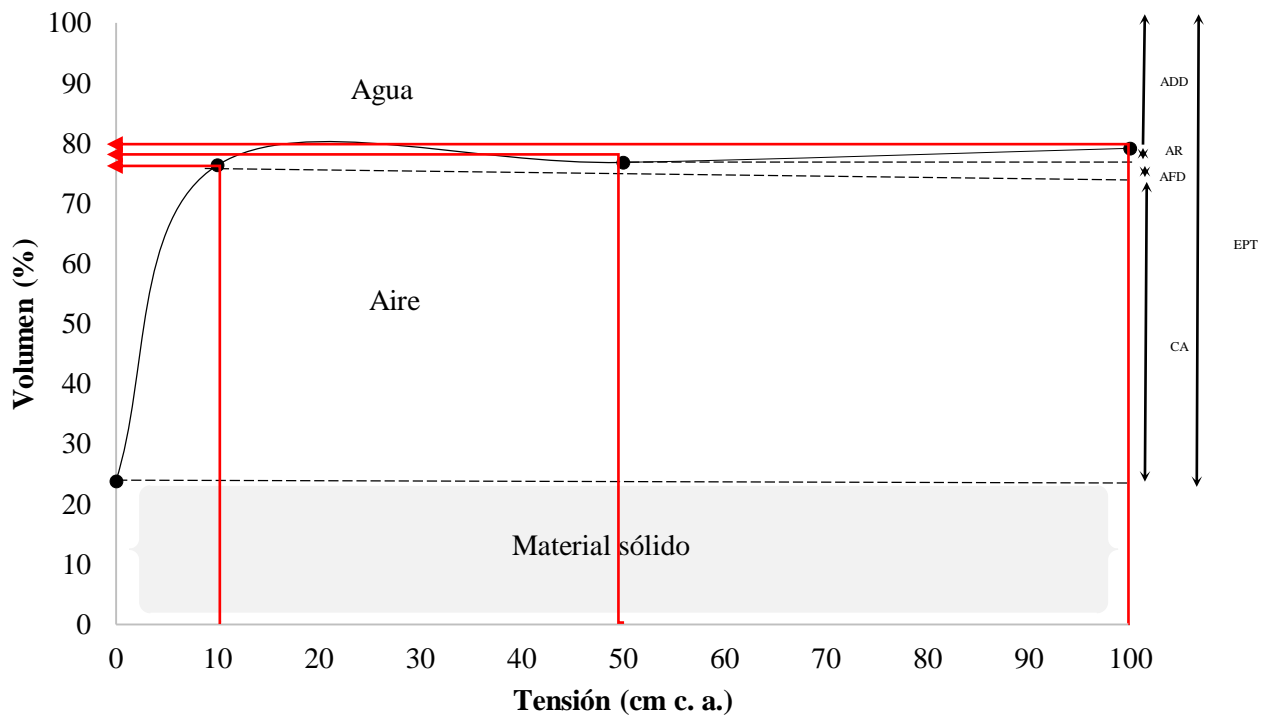
En todos los casos el volumen de material sólido aumenta al disminuir el tamaño de la partícula, esto debido al acomodo de las mismas. Con ello, el espacio poroso total (EPT) se ve afectado, y se aprecia que hay mayor porcentaje en los materiales con tamaño de partícula mayor (Figura 16).

El suelo puede tener un 57% de EPT por su compactación; mientras que los demás materiales tienen entre 72 y 89%. Sánchez *et al.* (2008), registraron valores entre 70 y 91%, en sustratos de aserrín y composta de corteza de pino. Para el caso de lombricomposta de ≤ 2 mm (figura 16 c) el EPT fue de 80%, similar a lo que indican López *et al.* (2017) en materiales compostados (82%).

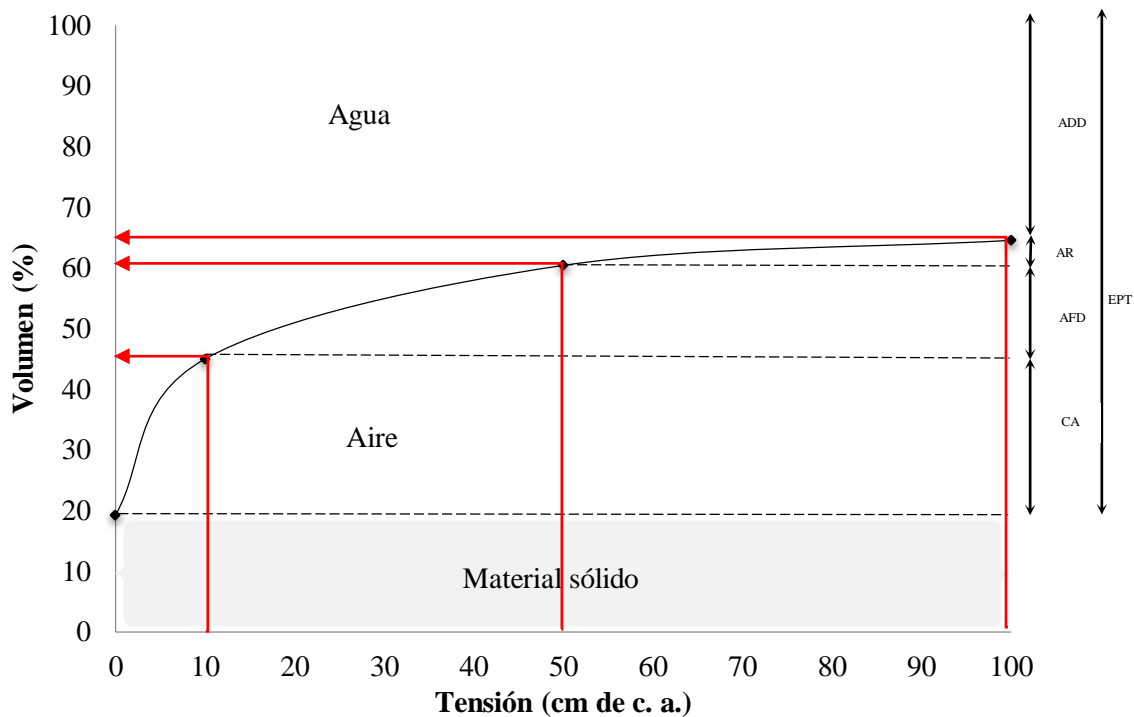
Abad *et al.* (1993), recomiendan valores de EPT mayores a 85%, donde sólo catalogan la lombricomposta de partículas de 2.1-5 mm y los dos tamaños de partícula de estiércol de bovino (Figura 16 c, e y f).



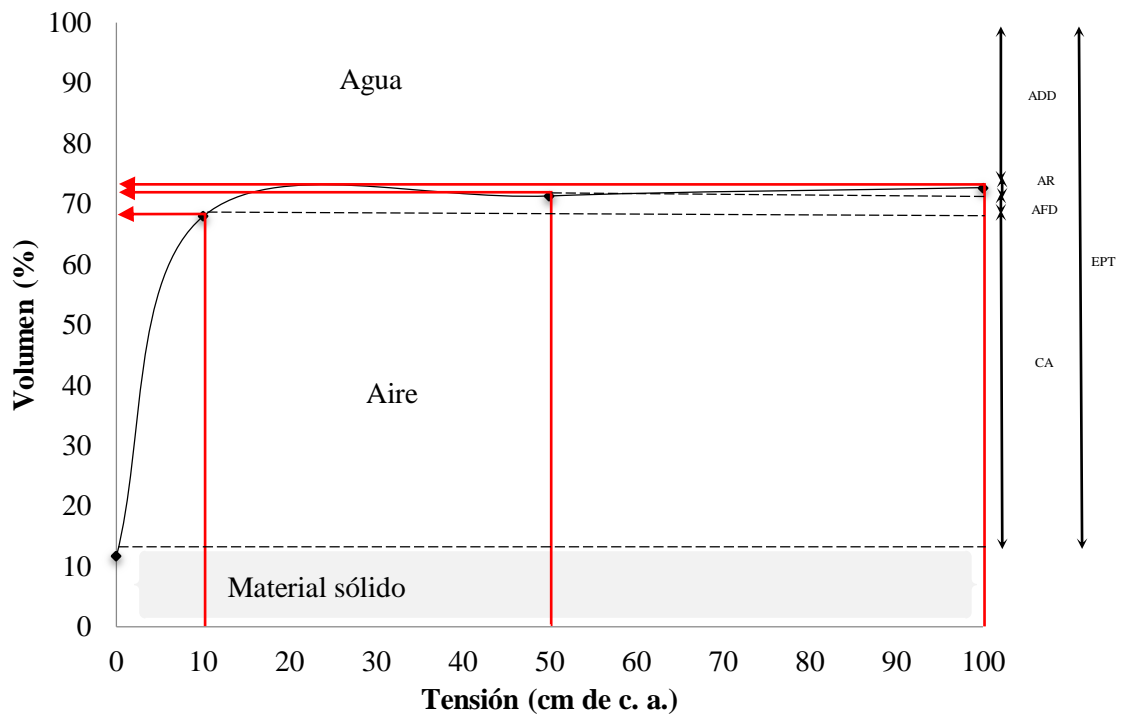
a) Carbón vegetal (≤ 2 mm)



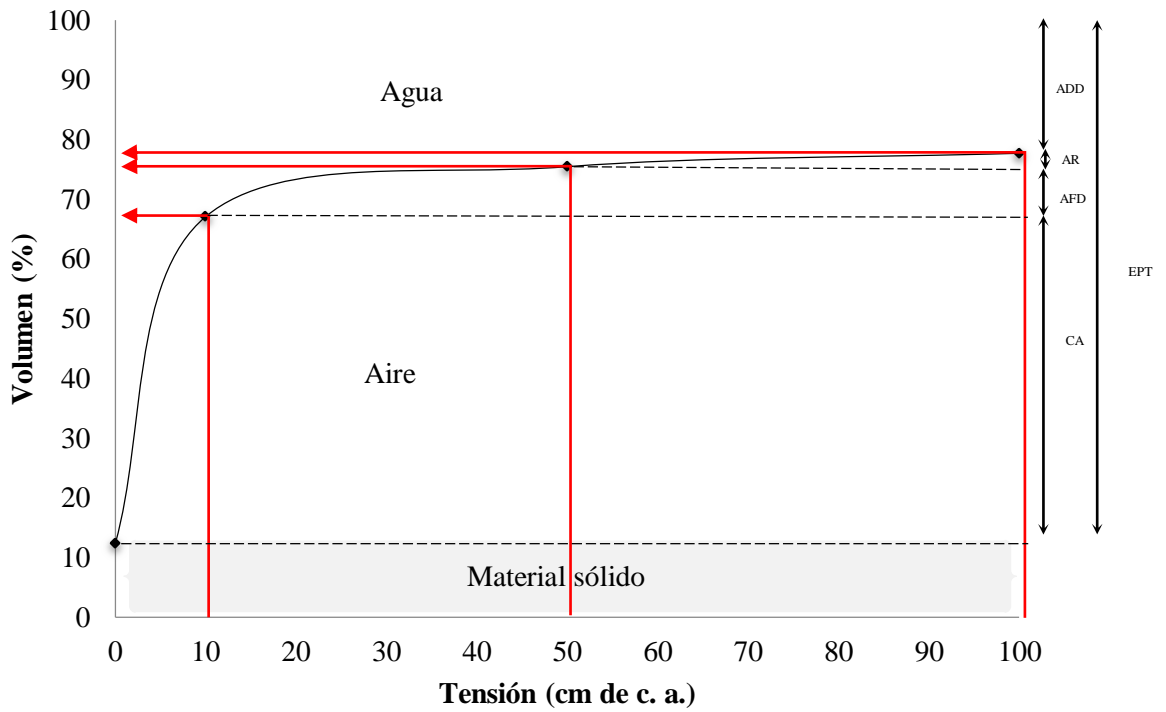
b) Carbón vegetal (2.1-5 mm) continua figura 16



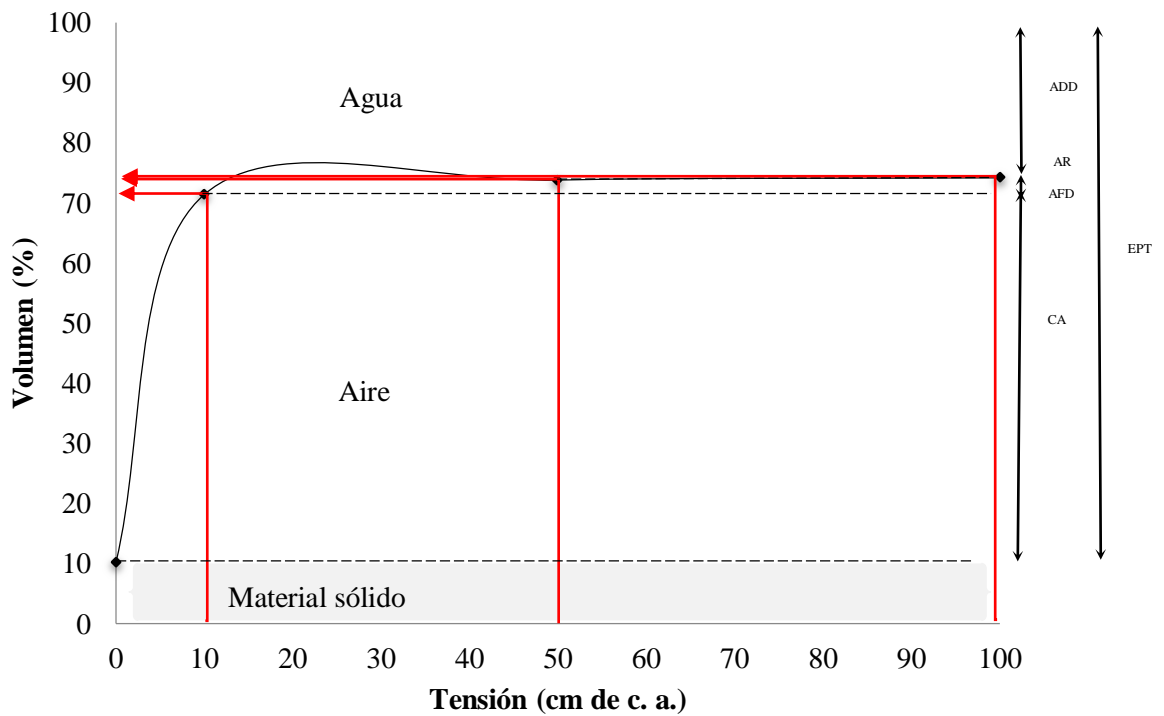
c) Lombricomposta (≤ 2 mm)



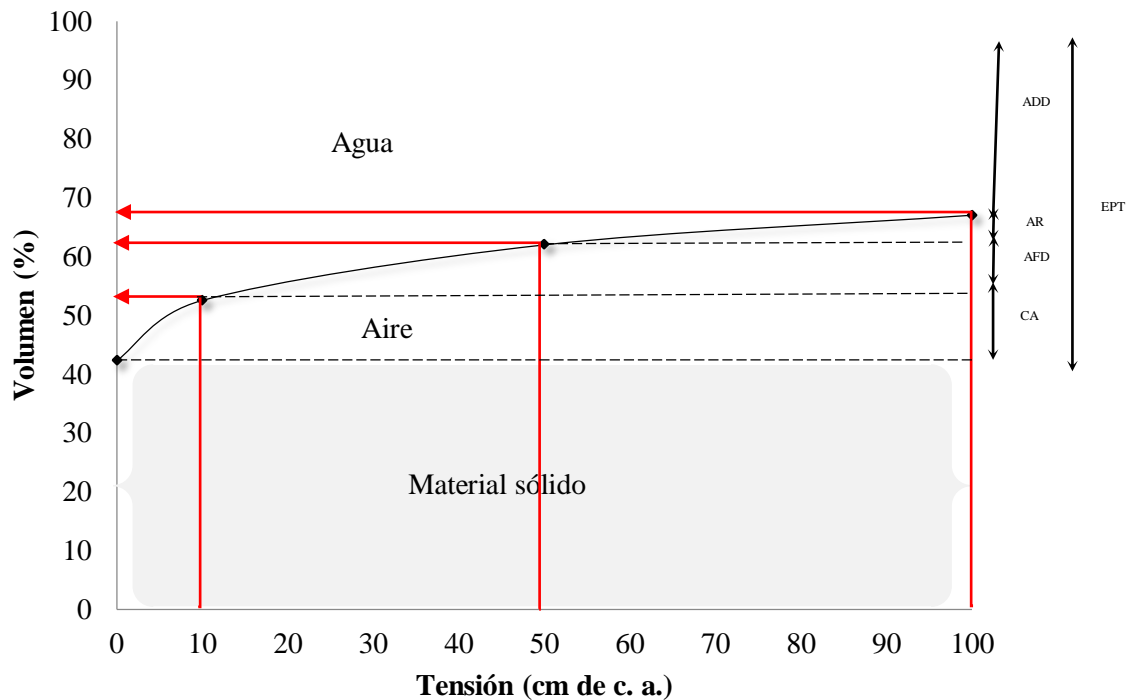
d) Lombricomposta (2.1-5 mm) continua figura 16



e) Estiércol de bovino (≤ 2 mm)



f) Estiércol de bovino (2.1-5 mm) continua figura 16



g) Suelo

ADD: agua difícilmente disponible, AR: agua de reserva, AFD: agua fácilmente disponible, CA: capacidad de aireación, EPT: espacio poroso total.

Figura 16. Curvas de liberación de agua (CLA) de materiales orgánicos de ≤ 2 mm y 2.1-5 mm, y suelo; a diferentes tensiones.

En la figura 17 se observa que, cuando al suelo se le incluyen materiales orgánicos, la capacidad de campo se incrementa por encima de la del suelo sin la incorporación de enmiendas. Este incremento es proporcional a la cantidad de material orgánico adicionado (30%). Sin embargo, el incremento varía según el tipo de material orgánico y posiblemente, por el tamaño de partícula de la fuente orgánica. Un efecto importante a considerar es que, si bien la materia orgánica incrementa la CC del suelo, también incrementa el nivel del PMP, y a la vez reduce el rango de humedad aprovechable. Este efecto se repite en todas las mezclas de suelo con materia orgánica.

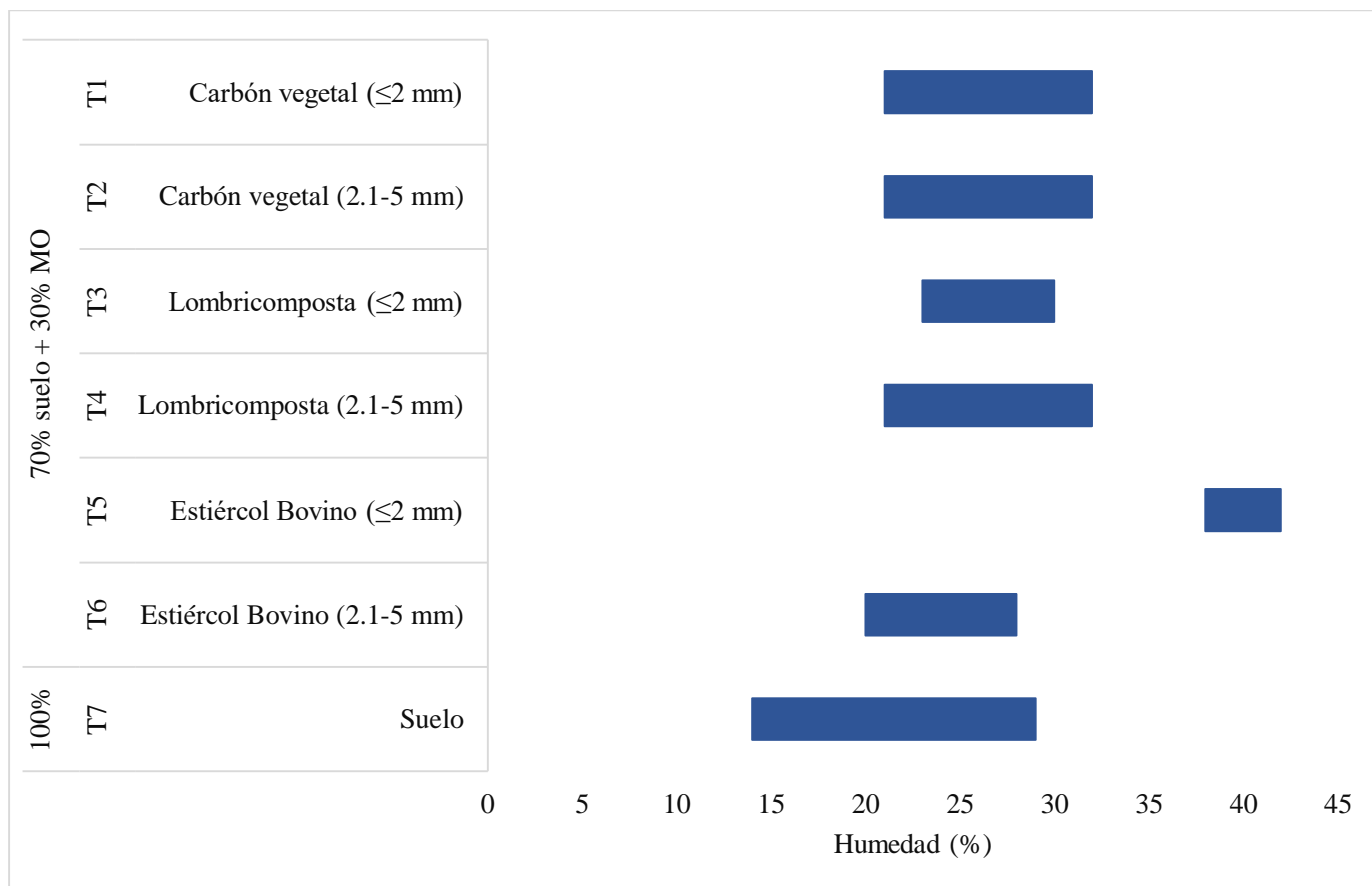


Figura 17. Rangos de humedad aprovechable (PMP-CC) de los tratamientos en estudio, (mezclas de 70% suelo y 30% de materia orgánica, y suelo) por el método de ollas de presión.

8.2.2 Evaluación de comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos, por el método de porómetro

En la figura 18, se muestra que la variación en la capacidad de retención de humedad (CRH) es mínima en todos los casos en materiales con tamaño de partícula ≤ 2 mm, la lombricomposta y el estiércol tienen un cambio máximo de 6%, mientras que en carbón es solo de 2%. Los materiales sin combinar y los sustratos elaborados; tienen mayor CRH que el suelo. Pineda *et al.* (2012), mencionan que los sustratos de materiales con

diámetro de partícula menor a 3 mm, forman poros pequeños en donde se adhiere el agua aumentando el valor de CRH.

En cambio, en los materiales de tamaño de partícula de 2.1-5 mm (Figura 19), la CRH aumenta conforme la proporción de suelo se incrementa, dónde la variación más notable es con el uso de carbón vegetal (10%), con lombricomposta es de 6%, y con estiércol no muestra diferencia en esta característica, pero su variación se observa en la capacidad de aireación que con la proporción 30/70 (suelo/estiércol) es de 14%, mientras que para las dos restantes, 50/50 y 70/30, la CA es de 4 y 2%, respectivamente. En el caso de las mezclas de carbón la variación es del 14%, mientras que con la lombricomposta es de 15%.

Sandoval (2012), muestra resultados de sustrato con 48% de estiércol de bovino, la capacidad de retención de humedad es de 58%, similar a los resultados obtenidos con mezclas de estiércol al 50%, sin importar el tamaño de partícula.

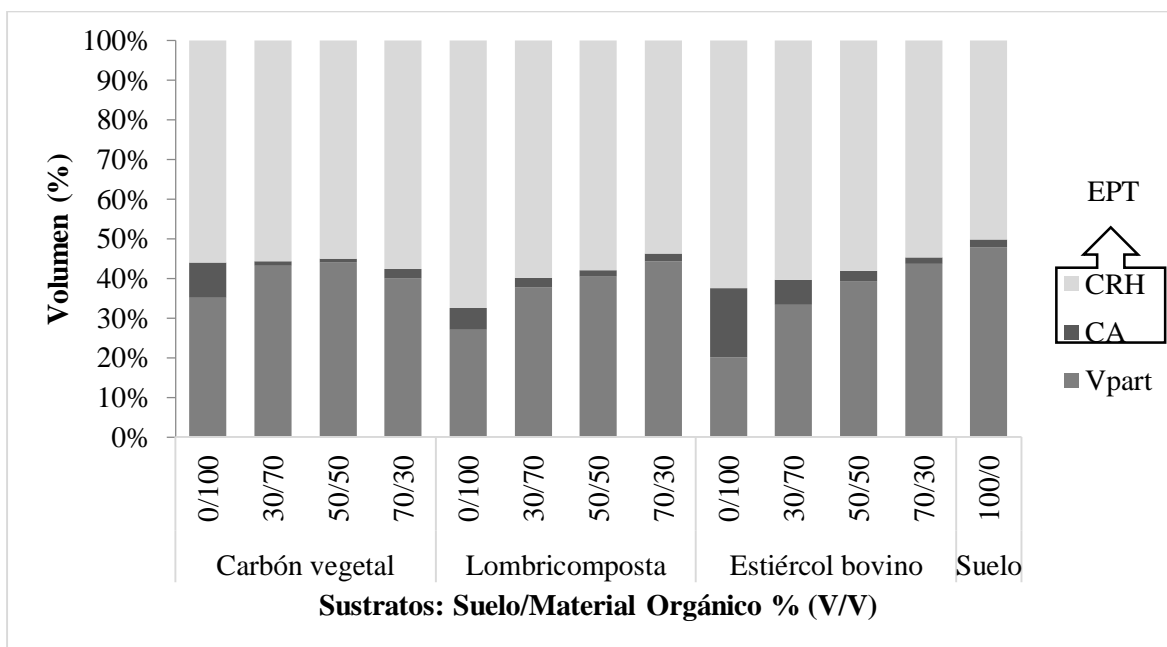


Figura 18. Variables del comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos de partículas de ≤ 2 mm.

La variación entre todas las mezclas elaboradas, son proporcionales a los materiales orgánicos con efectos en el volumen ocupado por las partículas. Con lo anterior se observa que la CA se ve afectada proporcionalmente con la cantidad de material orgánico contenido. Esto es justificado por Vence (2008), quien menciona que la relación agua-aire varía ampliamente de acuerdo con los tamaños de las partículas que predominen.

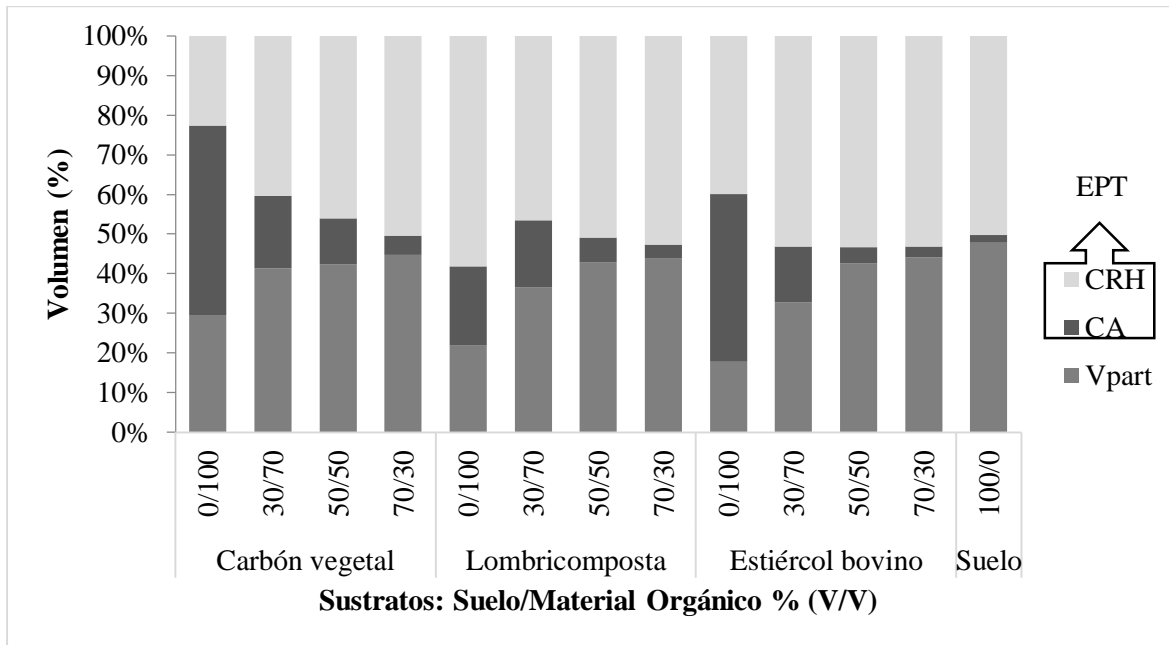


Figura 19. Variables del comportamiento de humedad de materiales orgánicos, suelo y sustratos de partículas de 2.1-5 mm.

En las figuras 18 y 19, se observa que el aumento del material orgánico en el sustrato favorece la capacidad de aireación, en ambos tamaños de partículas; Abad (2005), menciona que la CA debe ser mínimo de 10%, con un óptimo de 15 a 30%, se cumplen cuando el material orgánico es del 100%, donde los valores aceptables dentro de este rango son para las mezclas 30/70 suelo/material orgánico, respectivamente, de tamaño de partícula de 2.1-5 mm

Para el espacio poroso total, Vargas *et al.* (2008) registran que, con tezontle, las partículas menores a ≤ 2 mm arrojan valores medios de 75 a 57%, similares a los resultados obtenidos en todos los sustratos analizados (79 a 56%). Mientras que para el

tamaño de 2.1-5 mm va de 75 a 82%, y los mismos autores registran valores de 77 a 84%.

En densidad aparente, Gutiérrez *et al.* (2011), mencionan que las proporciones 25/75, 50/50 y 75/25% arrojaron resultados de 0.23 a 0.81 g cm⁻³, similares a los datos observados en este trabajo de investigación (Cuadro 7).

Cuadro 7. Densidad aparente de materiales orgánicos, suelo y sustratos por tamaño de partículas (≤ 2 mm y 2.1-5 mm).

Material	Suelo / Material orgánico % (V/V)	Da (g cm ⁻³)	
		≤ 2 mm	2.1-5 mm
Carbón vegetal	0/100	0.335	0.227
	30/70	0.619	0.527
	50/50	0.791	0.690
	70/30	0.840	0.831
Lombricomposta	0/100	0.124	0.285
	30/70	0.451	0.527
	50/50	0.659	0.727
	70/30	0.818	0.871
Estiércol bovino	0/100	0.381	0.102
	30/70	0.608	0.494
	50/50	0.742	0.675
	70/30	0.865	0.846
Suelo	100/0	0.975	

8.3 Pérdida de humedad de los sustratos por estrés hídrico

Tomando en cuenta el análisis de varianza aplicado a los valores de pérdida de humedad en las mezclas de suelo (70%) con materiales orgánicos (30%), después de 25 días de someter a los sustratos sin aplicar ningún tipo de riego, se observó que la menor pérdida de humedad la tuvo la lombricomposta en partículas de ≤ 2 mm, con una media de 19.8 mL, seguido por el suelo y la lombricomposta de 2.1-5 mm; posteriormente estuvo el

estiércol de bovino de 2.1-5 mm (cuadro 8). Lo inesperado es el comportamiento del carbón vegetal de ≤ 2 mm quien tuvo la menor capacidad de retención de humedad. Al respecto, Brechelt (2004), menciona que gracias al alto grado de porosidad del carbón vegetal incrementa la filtración del agua; pero favorece la liberación de nutrientes para las plantas y disminuye la pérdida de nutrientes por lavado del suelo.

Cuadro 8. Pérdida de humedad (mL) de los sustratos en proporción 70% suelo/30% material orgánico (≤ 2 mm y 2.1-5 mm), a los 25 días sin aplicar riego.

	Tratamiento	Humedad (mL)	
		Media	Error estándar
T1	Carbón vegetal (≤ 2 mm)	26.29 e	2.975
T2	Carbón vegetal (2.1-5 mm)	23.22 cd	2.482
T3	Lombricomposta (≤ 2 mm)	19.82 a	2.174
T4	Lombricomposta (2.1-5 mm)	21.23 ab	2.383
T5	Estiércol Bovino (≤ 2 mm)	24.46 d	2.826
T6	Estiércol Bovino (2.1-5 mm)	21.63 bc	2.316
T7	Suelo	20.95 ab	2.505

Los grupos con letra diferente son significativamente diferentes. Tukey $p \leq 0.05$, F (6, 672) =29.992.

Segura *et al.*, (2008), al evaluar por cinco días la pérdida de agua en macetas, obtuvieron promedios de pérdida entre 14 y 16 mL, pero su temperatura ambiental era controlada a 25 °C, a diferencia de la presente investigación, donde la temperatura promedio en el periodo de 25 días fue de 27.7 °C, con una máxima de 38°C en los días 3 y 7 (Figura 23).

De manera similar que en el cuadro 8, en la figura 20 también muestra que la lombricomposta de ≤ 2 mm pierde menos agua; mientras que el carbón vegetal de ≤ 2 mm la pérdida es más pronunciada, incluso en todo el trayecto hasta el séptimo día.

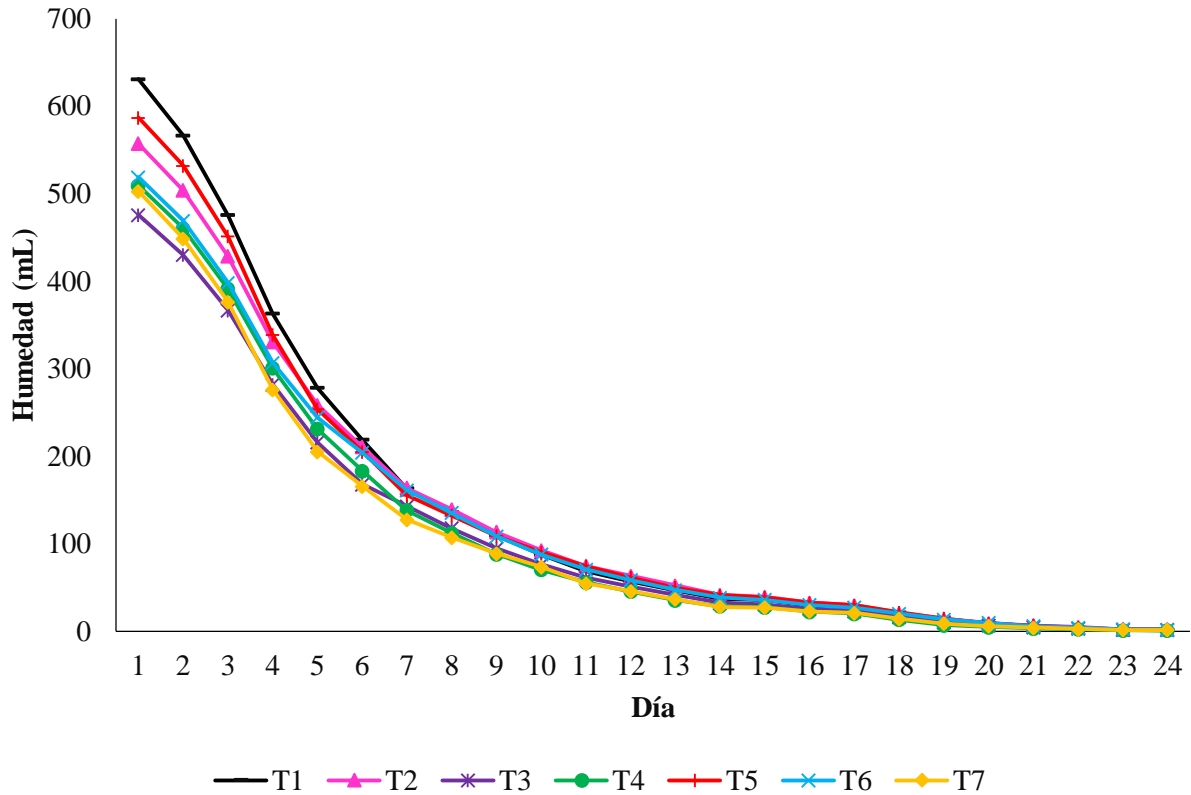


Figura 20. Pérdida diaria de humedad en mL por tratamiento, con el punto de inicio cuando la muestra estuvo en punto de saturación.

T1: suelo 70%/30% carbón vegetal ≤ 2 mm; T2: suelo 70%/30% carbón vegetal 2.1-5 mm; T3: suelo 70%/30% lombricomposta ≤ 2 mm; T4: suelo 70%/30% lombricomposta 2.1-5 mm; T5: suelo 70%/30% estiércol bovino ≤ 2 mm; T6: suelo 70%/30% estiércol bovino 2.1-5 mm; T7: suelo 100%.

Aunque la variación en la pérdida de humedad fue mayor en los primeros 7 días, posteriormente las muestras pierden de manera similar, tomando en cuenta que en tanto la cantidad de agua tienda al valor de agua de reserva, la velocidad de pérdida de agua es menos notoria.

En la figura 21 se observa que el día 3 es en el que presentó una mayor pérdida de humedad en todos los tratamientos, esto debido a las altas temperaturas (38 °C). Una temperatura similar se registró también el día 7; pero la cantidad de agua evaporable ya había disminuido (Figura 22).

Una diferencia marcada entre las pérdidas de humedad de los tratamientos es del día 5 al 6, donde la pérdida de humedad del carbón vegetal de ≤ 2 mm se eleva hasta 60 mL, mientras que la lombricomposta de ≤ 2 mm mantiene la pérdida en 24.9 mL.

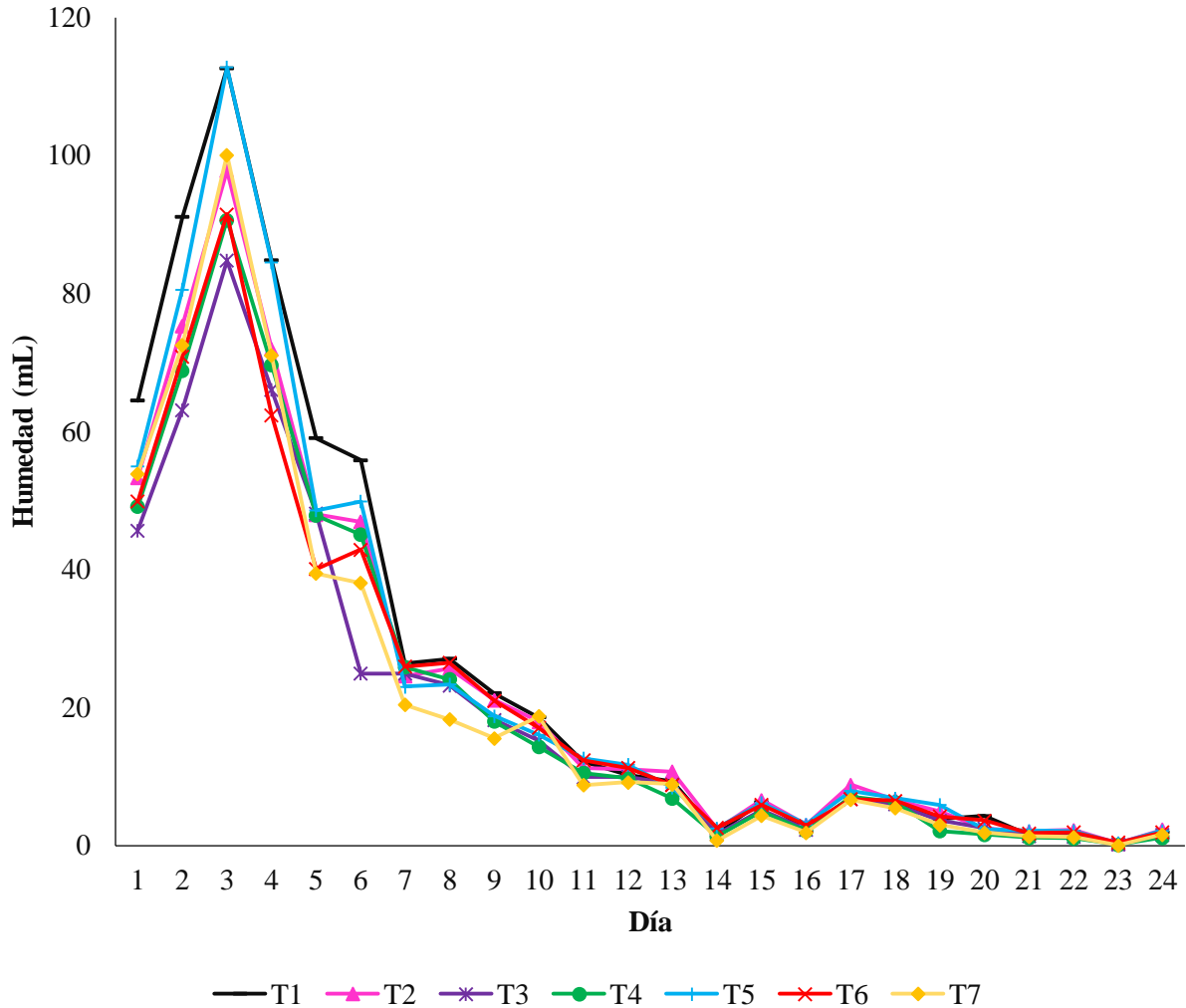


Figura 21. Pérdida de humedad promedio por día por tratamiento.

T1: suelo 70%/30% carbón vegetal ≤ 2 mm; T2: suelo 70%/30% carbón vegetal 2.1-5 mm; T3: suelo 70%/30% lombricomposta ≤ 2 mm; T4: suelo 70%/30% lombricomposta 2.1-5 mm; T5: suelo 70%/30% estiércol bovino ≤ 2 mm; T6: suelo 70%/30% estiércol bovino 2.1-5 mm; T7: suelo 100%.

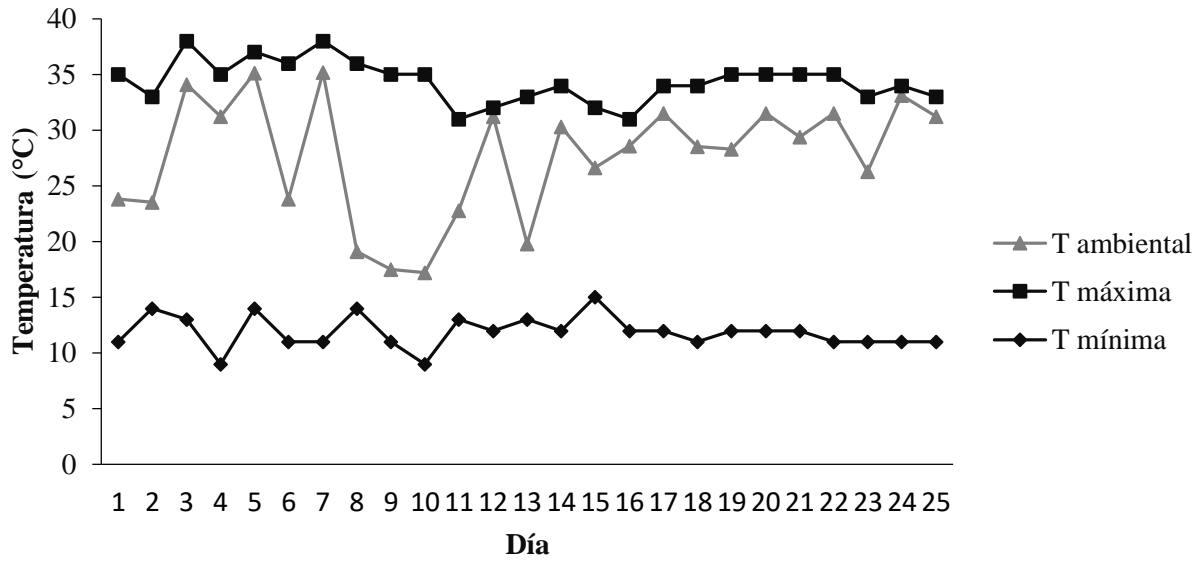


Figura 22. Comportamiento de temperatura ambiental, máxima y mínima, en invernadero durante 25 días sin aplicar riego.

La pérdida de humedad del suelo no está sujeta únicamente a la variación ambiental de temperatura, como en el desarrollo de este experimento, sino también a la humedad ambiental y velocidad del viento, que provocan estados más complejos de análisis. Ello significa que aún quedan abiertas otras posibilidades de estudio para descifrar conocimientos que permitan la dinámica real que los materiales orgánicos producen e influyen en la calidad del suelo agrícola, y que pueden ser base científica consistente para el manejo sostenible del suelo de los agroecosistemas.

IX. Conclusiones

El tamaño de las partículas del suelo, influye en el incremento o disminución de la superficie de contacto para la adherencia de otras partículas a las del suelo; así como los tamaños de poros intervienen en la manera en que partículas externas se adhieran al suelo.

La variación del tamaño de partícula de un material orgánico, modifica el comportamiento de las variables hidrofísicas en el mismo, cuando los materiales orgánicos son de un tamaño de partícula menor, el volumen ocupado por las partículas se incrementa; la capacidad de aireación crece en un tamaño de partícula mayor, proporcionando mayores espacios entre ellas, que favorece la liberación de agua y la disminución en la capacidad de retención de humedad.

Los materiales orgánicos agregados al suelo, incrementan la capacidad de retención de humedad en el mismo, esto de acuerdo a la cantidad proporcional aplicada; pero las propiedades del suelo influyen en el comportamiento de retención de humedad de las mezclas, por ello es importante considerar el tipo de suelo en estudio.

X. Literatura citada

Abad, M., P. F. Martínez, M. D. Martínez, y J. Martínez. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo, *Actas de horticultura*, 11: 141–154.

Abad, B. M.; Noguera M. P. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Aguilar-Benítez G., C. B. Peña-Valdivia, J. R. García-Nava, P. Ramírez-Vallejo, S. G. Benedicto-Valdés, J. D. Molina-Galán. 2012. Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia* 46: 37-50.

Ansorena, M. 1994. *Sustratos: propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Ansorena-Miner J. 2016. *El compost de biorresiduos. Normativa, calidad y aplicaciones*. Mundi-Prensa. Madrid, España. P. 155.

Atkins, P. W. 1999. *Fisicoquímica*, 6a edición. Ediciones Omega, Barcelona, España.

Brechelt A. 2004. *Manejo ecológico del suelo. Red de Acción en plaguicidas y sus alternativas para América Latina*. Santiago de Chile, Chile.

Brenauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60:309-19.

Cabrera G. 2012. La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *SciELO. Pastos y forrajes*. Vol 35. No. 4. 349:364.

Cadena-Zapata M., S. Campos-Magaña, M. Cantú-Sifuentes y A. Zermeño-González. 2008. Evaluación de funciones de edafotransferencia para estimar la curva de retención de humedad para uso en planeación de labranza. *Terra Latinoamericana* 26:93-102.

Carballo-Suárez L. 2002. *Introducción a la catálisis heterogénea*. Bogotá- Colombia.

Carrera-Villacrés D. V., P. V. Guevara-García y G. N. Gualichicomín-Juiña. 2014. Caracterización físico-química desde el punto de vista agrícola de los suelos en la zona de riego del proyecto multipropósito Chone. IX congreso de Ciencia y Tecnología ISSN:1390-4660.

Claramunt-Vallespí R. M. y S. Esteban-Santos. 2017. Catálisis en química orgánica. Universidad de educación a distancia. Madrid, España.

Comisión Nacional Forestal. 2012. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009. Jalisco, México.

Cruz-Crespo E., M. Sandoval-Villa, V. Volke Haller, V. Ordaz-Chaparro, J. L. Tirado-Torres y J. Sánchez-Escudero. 2009. Generación de mezclas de sustratos mediante un programa de optimización utilizando variables físicas y químicas. Terra Latinoamericana 28: 219-229.

Cuevas-B. J., O. Seguel-S., A. Ellies-Sch. y Dörner-F. J. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial preferencia a la adición de lodos urbanos. Suelo Nutrición Vegetal 6(2):1-12.

Davies, F. S. y L. G. Albrigo. 1994. Citrus. CAB International, Wallingford, Reino Unido. P. 254.

De Boodt, M., O. Verdonck. 1972 The physical properties of the substrates in horticulture. Acta Hort. ISSN: 0567-7572, 26:37-44.

De Boodt, M., O. Verdonck y I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. Acta Horticultura 37:2054- 2062.

De las Heras J. 2003. Fundamentos de agricultura ecológica: realidad actual y perspectivas. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. España.

Eliás-Castell X. 2012. Tratamiento y valorización energética de residuos. Díaz de Santos. Barcelona, España.

Escobar R. 2014. El cultivo de secano. Geografía agrícola 52-53:61-113

FAO. 2002. Agua y cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma Italia.

FAO. 2005. La regeneración natural en áreas de cultivo. Manejo de sistemas agroforestales. Honduras. P. 1.

FAO. 2007. Manual de agricultura de conservación para el manejo sostenible e integrado de los recursos naturales en microcuencas hidrográficas de Nicaragua. INAFOR-INTA. Roma Italia.

FAO. 2012. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Mundi.Prensa. Madrid. P. 35.

FAO. 2016. Sitio web AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Accedido el 26, 01, 2019.

Félix-Herrán J. A., R. R. Saduño-Torres, G. E. Rojo-Martínez, R. Martínez-Ruiz y V. Olalde-Portugal. 2008. Importancia de los abonos orgánicos. Ra Ximhai Vol. 4 No. 1 57:67.

Fernández-Fernández, M. D. 2001. Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernaderos y suelo enarenado de Almería. Universidad de Almería. España.

Fernández R., N. E. Furch, M. Bissolino, I. Frasier, E. D. Scherger y A. R. Quiroga. 2020. Efecto de las pasturas perennes en la fertilidad física y biológica en molisoles de la región serimiárida Pampeana. Ciencia del Suelo. Asociación Argentina. Vol. 38 No. 1 133:148.

Ferrer-Cerrato R., A. Alarcón. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. Ciencia Ergo Sum 8:175-183.

García Y., W. Ramírez y S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Scielo Pastos y forrajes. Vol. 35 No. 2 125:138.

Gliessman, S. R. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

Gutiérrez-Castorena M. C., J. Hernández-Escobar, C. A. Ortiz-Solorio, R. Anicua-Sánchez y M. Hernández-Lara. 2011. Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Chapingo Serie Horticultura* 17(3):183-196.

Guzmán-Alcalá M. C. 2007. La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales. Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla. España.

Handreck, K. A. y Black, N. 2005. *Growing media for ornamental plant and turf*. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia.

Hernández, J. L. 2009. Propiedades hídricas en mezclas de sustratos con diferentes proporciones y tamaños de partícula. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. P. 94.

Hernández-Zarate L., Aldrete A., Ordaz-Chaparro V. M., López-Uptón J. y López-López M. A. 2014. Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia* 48:627-637.

INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Puebla, Puebla. México.

Iphorski, M. y Bozzano P. B. 2013. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación* 63(3):43-53.

Izquierdo, J. F., F. Cunill, J. Tejero, M. Iborra y C. Fité. 2004. Cinética de las reacciones químicas. Universitat de Barcelona. España.

Jaurixje M., D. Torres, B. Mendoz, M. Henríquez y J. Contreras. 2013. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *SciELO Bioagro*. Vol. 25 No. 1 47:56.

Julca-Otiniano A., L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano y S. Bello-Amez. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*. Chile. VOI. 24 No. 1 49:61.

Lal R. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. SMSS Monografía. Columbus Ohio.

Larios-González R. C., F. Salmerón-Miranda y L. García-Centeno. 2014. Fertilidad del suelo con prácticas agroecológicas y manejo convencional en el cultivo de café. La Calera. Vol. 14 No. 25 67:75.

Leitón-Soubanneir J. S. 1985. Riego y Drenaje. EUNED. Costa Rica.

López F. Y. 2000. Relaciones Hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Colombia.

López-Martínez, J. D., A. Díaz-Estrada, E. Martínez-Rubín y R. D. Valdez-Cepeda. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. Terra Latinoamericana 19:293-299.

López-Clemente X. A., C. Robles-Pérez, V. A. Velasco-Velasco, J. Ruiz-Luna, J. R. Enríquez-del Valle y G. Rodríguez-Ortiz. 2015. Propiedades físicas, químicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. Ciencia Ergo Sum 22-2:145-152.

López-López M. J., A. Masaguer-Rodríguez, C. Paredes-Gil, L. Roca-Pérez, M. Ros-Muñoz, M. C. Salas-Sanjuan y R. Boluda-Hernández. 2015. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad. Mundi-Prensa. Madrid, España. P. 96.

López-Rodríguez G., J. Pérez-Esteban, J. Ruiz-Fernández y A. Masaguer. 2017. Caracterización hidrofísica de sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de naturación en espacios urbanos. Ingeniería agrícola. Vol. 7 No. 1: 33-40.

Navarro-García G. y S. Navarro-García. 2003. Química agrícola. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Navarro-García G. y S. Navarro-García. 2014. Fertilizantes: química y acción. Mundi-Prensa. Madrid, España. P. 7.

Nieto-Garibay A., B. Murillo-Amador, E. Troyo-Diéguéz, J. A. Larrinaga-Mayoral y J. L. García Hernández. 2002. El uso de compostas como alternativa ecológica para la

producción sostenible del chile (*Capsicum annum* L.) en zonas áridas. Interciencia Vol. 27 8:417-421.

Núñez-Solis J. 2000. Fundamentos de edafología. EUED. San José, Costa Rica.

Ospina B. y Ceballos H. 2002. La Yuca en el Tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. CIAT. Cali, Colombia.

Pérez A., C. Céspedes y P. Núñez. 2008. Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en república dominicana. Sielo Ciencia del suelo y nutrición vegetal. Vol. 8 No. 10:29.

Pineda-Pineda J., F. Sánchez-del Castillo, A. Ramírez-Arias, A. M. Castillo-González., L. A. Valdés-Aguilar y E. C. Moreno-Pérez. 2012. Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. Chapingo Serie Horticultura 18(1): 95-111.

Postel, S. 1991. Administración del agua en épocas de escasez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Colección Universo del Agua, Serie Agua y Ecología. México.

Quiroz K., M. A. Hernández, R. Portillo, F. Rojas, E. Rubio y V. Petranovskii. 2016. Comparación de la capacidad de secuestro de CO₂ en Clinoptilolita, Epistilbita, Erionita, Mordenita y Caolinita como constituyentes del suelo. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales. Superficies y Vacío 29(2) 55-61.

Roger, J. M. 1985. El suelo vivo: manual práctico de la agricultura natural. Integral. Barcelona, España.

Ruiz H. A., G. O. Sarli, C. E. Gonçalves Reynaud Schaefer, R. R. Filgueria y F. Silva-de-Souza. 2016. La superficie específica de oxisoles y su relación con la retención hídrica. Ciencias Agrarias Tomo 48. N° 2.

SAGARPA. 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. México.

Rodríguez L., G. y C. Juárez-Carrillo. 2011. Impacto de las sequías sobre los mercados agropecuarios en México. Vol. IV:4

Salamanca-Jiménez A. y Sadeghian-Khalajabadi S. 2008. Almacigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Cenicafé* 59(2):91-102.

San Martín-Hernández C., V. M. Ordaz-Chaparro, P. Sánchez-García, M. T. Beryl Colinas-León y L. Borges-Gómez. 2012. Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponia con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia* 46: 243-254.

Sánchez-Córdova T., A. Aldrete, V. M. Cetina-Alcalá, J. López-Upton. 2008. Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín. *Madera y bosques* 14(2):41-49.

Sánchez de Prager M. 2018. Aportes de la biología del suelo a la agroecología. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

Sánchez P. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. IICA. San José, Costa Rica.

Sandoval-Estrada P. 2012. Elaboración de un sustrato con degradación y liberación paulatina de nutrientes para el crecimiento de hortalizas en invernadero.

Segura-Castruita M. A., P. Preciado-Rangel, G. Cervantes-González, J. E. Frías, G. García-Legaspi, J. A. Orozco-Vidal y M. Enríquez-Sánchez. 2008. Adición de material pomáceo a sustratos de arena para incrementar la capacidad de retención de humedad. *Interciencia* 33(12):923-928.

Serrano-Díaz F.R. 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernaderos. Memorias IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Torreón, México. Pp. 44-68.

Shaxson F., Richard B. 2005. Boletín suelos de la FAO. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Roma.

SIAP. 2019. Sitio web SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Accedido el 14, 07, 20.

Sing K.S.W. 2014. *Pioneers of Adsorption Science*. *Adsorption Science & Technology* Vol. 32 No. 5.

Solórzano-Peraza P. R. 1997. *Fertilidad de suelos, su manejo en la producción agrícola*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay, Venezuela. P. 13.

Thompson L. M. y F. R. Troeh. 2002. *Los suelos y su fertilidad*. Cuarta edición. Reverté. México.

Toledo V. M. y Ordóñez M. J. 2009. *Zonas ecológicas de México*. Proyectos A006 y E021: 'Diagnostico de los escenarios de la biodiversidad en México' fases 1 y 2. Escala 1:1 000 000. Centro de Ecología, UNAM. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). México.

Trinidad-Santos A. 2009. *Abonos orgánicos*. Sistema de agronegocios agrícolas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Estado de México, México. Pp. 2.

UNESCO. 2018. *Atlas de la canícula de América Central y el Caribe*. pp. 7. París, Francia.

Valverde C., J. C. 2007. *Riego y drenaje*. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.

Vargas-Tapia P., Castellanos R. J., Muñoz R. J. 2008. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura técnica en México* vol. 34 Núm. 3 p. 323-331.

Velasco I., L. Ochoa y C. Gutiérrez. 2005. *Sequía, un problema de perspectiva y gestión*. *Región y sociedad*. Vol. 17 No. 34 35:71.

Vélez P., E. 1993. *Por qué, Cuándo, Cuánto y Cómo Regar*. I Diplomado Ingeniería de Riego. Edo. De México.

Vence L. B. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. *Suelo* 26(2):105-114

Villalobos M., F. 2017. *Fitotecnia: principios de agronomía para una agricultura sostenible*. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Villegas T, G. 2017. Sustratos como material de última generación. OmniaScience. Morelos, México.

W. Kijne J. 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. FAO. Roma, Italia. P 9.

Weil R. 2017. Nature and properties of soils, 15th edition. Nueva York, EUA.

XI. Anexos

Características físicas de sustratos (Handreck y Black, 2005), método del porómetro

Principio

Este método nos permite caracterizar un medio de crecimiento por medio de la capacidad de retención de humedad, la capacidad de aireación, el espacio poroso total y la densidad aparente del sustrato.

Materiales

- Cilindros de PVC (con cuatro perforaciones de media pulgada de diámetro aproximadamente simétricas en el fondo)
- Contenedores extendidos de 9 L (altura similar a los tubos de PVC)
- Contenedores de 5 L
- Contenedores de 1 L (perforados)
- Charolas de metal
- Tela nylon
- Ligas de plástico

Equipo

- Balanza semianalítica (precisión 0.01 g)
- Estufa de secado (105 °C)

Procedimiento

1. 24 horas antes de comenzar la prueba, se pone la muestra de sustrato en contenedores de 1 L, enseguida se llenan los contenedores de 9 L con agua, de manera que el nivel de esta no sobrepase la altura del contenedor con el sustrato, ya que se debe saturar por capilaridad, (se recomienda hacer un triplicado por muestra para mayor certeza en los resultados).
2. Registrar el volumen y el peso de cada cilindro, enseguida se llena completamente (ligeramente por arriba del nivel del cilindro), de manera de que la muestra quede

- como el acomodo que tendrá en la maceta, para esto se debe elevar el cilindro y dejar caer de 5 cm de altura aproximadamente.
3. Colocar el cilindro en un contenedor de 9 L, enseguida adicionar agua (no encima de la muestra) hasta que el nivel de agua este a la altura del cilindro. Donde permanecerá por 30 minutos.
 4. Remover el cilindro verticalmente y permitir que el agua drene 1-2 minutos aproximadamente (hasta el caigan una o dos gotas esporádicamente, esto varía de acuerdo al sustrato en cuestión)
 5. Repetir el remojo y drenaje otras dos veces, durante 10 minutos cada una.
 6. Enseguida remover el exceso de sustrato del cilindro, debe quedar al nivel del cilindro.
 7. Tapar la parte superior del cilindro con la tela de nylon y sostener con la liga.
 8. Colocar en un contenedor de 5 L el cilindro y agregar agua a una altura de 4 cm.
 9. Después de 10 minutos, tomar el cilindro tapando las cuatro perforaciones con los dedos, de manera que el agua no salga, al momento debe secarse el cilindro del exceso de agua, sin soltar los dedos de los hoyos.
 10. Colocar el cilindro en un contenedor vacío sobre una base de 3 cm de altura que permita el libre drenaje, hasta que no caiga agua (el tiempo de espera dependerá del material del sustrato que se esté caracterizando).
 11. Quitar la tela y pesar el cilindro con el sustrato y vaciar en la charola de metal, llevar a secar a la estufa a 105°C, hasta peso seco
 12. Medir el volumen de agua drenada.

Curva de liberación de agua (De Boodt *et al.*, 1974), método de los embudos

Principio

La curva de retención de humedad es una técnica para conocer el comportamiento del agua dentro de las partículas de un material, principalmente aquellos que conformarán un sustrato de cultivo en contenedor. Ansorena (1994) “no es suficiente que la cantidad total de agua contenida en un medio de cultivo sea necesaria para la planta, ya que esta puede estar retenida con una fuerza muy elevada, superior a la de succión que es capaz de ejercer la planta”. Es por eso que esta técnica desarrollada por De Boodt *et al.*, (1974) utiliza sustratos saturados bajo tensiones entre 0 y 100 cm de columna de agua, tratando de simular la fuerza de succión de las raíces de una planta.

Materiales

- Ligas de plástico
- Bandejas de plástico para 10L
- Contenedores de plástico con 4 orificios en la base
- Bolsas de plástico transparente
- Manguera de látex con diámetro de 1.2 cm de diámetro interno
- Contenedores de aluminio para humedad para 150 mL
- Cuchara metálica
- Pinzas de soporte universal
- Flexómetro
- Cinta adhesiva transparente y masking tape
- Marcador indeleble de punta fina

Equipo

- Embudo de vidrio con placa de vidrio filtrante de entre 3 y 10 μm
- Estufa de secado con extracción de aire forzado
- Balanza digital (precisión ± 0.01 g)

Preparación del Material

Preparación de los embudos

Con el fin de reducir el error muestral del procedimiento en las 4 muestras con diferentes tensiones de columna de agua, se recomienda seccionar el volumen del embudo de la siguiente manera:

1. Dividir el total del volumen del embudo, en función de su altura a partir de la placa, en cuatro partes; de las cuales cada una representará el volumen que se extraerá por cada muestra en tensiones de 0, 10, 50 y 100 cm de c. a., respectivamente.

Con el fin de establecer la referencia para colocar el extremo de la manguera y ejercer las diferentes tensiones, se recomienda marcar la manguera como se describe a continuación:

2. Marcar sobre la manguera la distancia de 10 cm a partir de $\frac{3}{8}$ de la altura del embudo (a partir de la placa).
3. Marcar sobre la manguera la distancia de 50 cm a partir de $\frac{1}{4}$ de la altura del embudo (a partir de la placa).
4. Marcar sobre la manguera la distancia de 100 cm a partir de $\frac{1}{8}$ de la altura del embudo (a partir de la placa).

Preparación de la muestra saturada

El sustrato muestra deberá ser llevado a la condición de sustrato saturado, es decir, ocupar todo su espacio poroso con agua. Para esto se deberá colocar el sustrato dentro de un recipiente con 4 cavidades en el fondo del mismo, para ser introducido en una bandeja de mayor volumen que contenga agua hasta un nivel que no sobrepase la altura del contenedor con el sustrato muestra. De esta manera, se dejará saturar por capilaridad el tiempo necesario y si es requerido, se le adicionará agua por la parte superior del contenedor para ocupar todo el espacio poroso.

Procedimiento

Para realizar la curva de retención de agua considérese un embudo de vidrio con placa de vidrio filtrante de volumen conocido, considerado a partir de la placa hacia la parte superior del embudo, y conectado a una manguera de látex por la prolongación tubular inferior. Considérese también que el volumen comprendido desde la parte inferior de la placa hasta el borde de la manguera, deberá estar ocupado en su totalidad por agua, sin ninguna burbuja de aire.

De tal manera que el embudo se llenará en su totalidad por la parte superior con una muestra saturada del material a trabajar, y con el extremo de la manguera se regulará la tensión ejercida sobre la muestra posicionando a 0, 10, 50 y 100 cm de distancia a partir de la mitad del volumen ocupado por el material analizado en el embudo, este irá variando puesto que para cada muestra se retirará $\frac{1}{4}$ del volumen de la muestra total que se depositarán en las cápsulas de aluminio con el fin de que no pierdan humedad en el traslado hasta la estufa. Cada muestra será sometida a 75 °C dentro de la estufa de secado hasta obtener peso constante, registrando el peso inicial y final de la misma. El embudo se deberá mantener tapado con una bolsa de plástico para evitar pérdidas de humedad por evaporación.

Toma de muestra

Para todas las muestras bajo las diferentes tensiones, deberán de ser retiradas en el momento que el sustrato muestra ya no ceda más agua. El indicador que señalará el momento adecuado para retirar las muestras será el menisco hacia abajo que formará el agua dentro de la manguera, este se podrá observar por el extremo de la misma.

Una vez que el sustrato muestra esté listo, será retirado $\frac{1}{4}$ del volumen inicial con ayuda de una cuchara de manera horizontal, y se ajustará el extremo de la manguera a la altura correspondiente para la siguiente tensión (0, 10, 50 y 100).

0 c.c.a. (Saturación)

La primera muestra ($\frac{1}{4}$ del volumen de la muestra) se tomará inmediatamente después del llenado del embudo y con el extremo de la manguera justo a la altura del borde del embudo.

Es conveniente realizar las determinaciones por triplicado para asegurar la veracidad de los resultados.

Nota: Al llenar el embudo no se debe compactar la muestra, esta debe quedar de manera similar a su aplicación en maceta (contenedor de crecimiento). Además, se debe verificar que la muestra siga en saturación dentro del embudo, es decir, sin espacios con aire, en caso contrario adicionar el agua necesaria para ocupar estos espacios.

10, 50 y 100 c.c.a.

Las siguientes muestras se tomarán cada vez que el menisco de la salida de agua de la manguera se encuentre hacia abajo y serán cada $\frac{1}{4}$ de muestra.

Método para determinación de Capacidad de campo (CC) y Punto de Marchitez

Permanente (PMP)

1. Capacidad de campo (CC)

Instrumentos:

- 1) Platos o placas de cerámica porosa de 1 bar
- 2) Compresor de 20 bar
- 3) Extractor u olla de bajas presiones.
- 4) Cilindros de 4,7 cm x 3,0 cm de aluminio
- 5) Manómetro
- 6) Reguladores de presión
- 7) Balanza
- 8) Estufa de secado (105°C)

Preparación de la muestra:

Enrasar los cilindros, quitando el material sobrante del borde inferior, obteniendo una superficie de apoyo homogénea con el plato poroso.

Procedimiento:

- 1) Saturar la placa porosa durante 24 horas en un recipiente con agua destilada.
- 2) Colocar cada muestra sobre papel de filtro. Saturar la muestra con agua destilada para humedecer por capilaridad durante 24 horas como mínimo o hasta que se observe una lámina de agua en la superficie de la muestra.
- 3) Se coloca la placa porosa saturada dentro de la olla.
- 4) Se colocan las muestras saturadas sobre la placa porosa y se cierra la olla.

- 5) Se le aplica una presión de 0.33 bar (correspondientes a capacidad de campo).
- 6) Por la salida de la olla conectada al plato comenzará a drenar el excedente de agua.
- 7) Una vez que finaliza la salida de agua (alrededor de 48 horas), se retiran las muestras y se pesan.
- 8) Se secan las muestras en estufa (105°C) hasta alcanzar un peso constante y luego se pesan.

Cálculo de CC:

$$\% \text{Humedad CC} = \frac{(\text{Peso Húmedo} - \text{Tara}) - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}}$$

2. Punto de Marchitez Permanente (PMP)

Instrumental:

- 1) Membrana de Richards (de acetato de celulosa) o plato poroso para 15 bares.
- 2) Extractor de membrana u olla de altas presiones.
- 3) Aros de goma (1 cm de alto x 3 cm de diámetro).
- 4) Compresor de 20 bar
- 5) Manómetro
- 6) Reguladores de presión
- 7) Balanza
- 8) Estufa de secado (105°C)

Procedimiento:

- 1) Secar y tamizar las muestras por 2 mm.
- 2) Se coloca la membrana dentro del extractor.
- 3) Se colocan los aros de goma sobre la membrana, se llenan con el suelo y se enrasan.
- 4) Se saturan por 24 horas las muestras sobre la membrana.

- 5) Se cierra y se ajusta con llave de torque.
- 6) Se le aplica una presión de 15 bar, hasta que se detiene el drenaje del extractor (aproximadamente 48 horas).
- 7) Se retiran las muestras de los aros, se coloca el suelo en un recipiente y se pesa.
- 8) Se secan las muestras en estufa (105°C) hasta alcanzar un peso constante y luego se pesan.

Cálculo de PMP:

$$\% \text{Humedad PMP} = \frac{(\text{Peso Húmedo} - \text{Tara}) - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}}$$