

Angeles Hernández, J.M., W. Ojeda Bustamante, A. De Los Santos García y J. Arista Cortes, 2003. Análisis de la granulometría del tezontle utilizando como sustrato en invernaderos. Memorias del XII Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, Zac., México. Mesa 3. Tecnificación y reconversión productiva de los distritos y unidades de riego: 1-8.



ANEI, A.C.

XII CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Mesa 3. Tecnificación y reconversión productiva de los distritos y unidades de riego

Zacatecas, Zacatecas, México, 13-15 de Agosto de 2003

ANÁLISIS DE LA GRANULOMETRÍA DEL TEZONTLE UTILIZADO COMO SUSTRATO EN INVERNADEROS

**J.M. Angeles Hernández¹, W. Ojeda Bustamante¹, A. De Los Santos García¹ y
J. Arista Cortes¹**

Resumen

La creciente demanda del sector agrícola requiere del uso eficiente del agua de riego y de una mayor productividad del recurso; ante este escenario, la implementación de la agricultura protegida mediante invernaderos, constituye una alternativa viable para la producción agrícola. Por esta razón, en aquellas zonas del país con fuertes problemas de escasez del agua de riego se hace necesario en el corto plazo la reconversión productiva mediante invernaderos. En nuestro país, el Tezontle se utiliza frecuentemente como el sustrato bajo condiciones de invernadero, ya que posee algunas características importantes: es un material inerte, que permite mantenerlo como un factor fijo en los aspectos de nutrición de la planta; y además, existe una amplia disponibilidad del material, a un costo relativamente bajo. A pesar de estas características, existe poca investigación en cuanto a sus propiedades físicas y químicas, en relación con la distribución y grado de almacenamiento del agua y nutrientes; así como, a su propio manejo como sustrato para el desarrollo de cultivos.

A continuación se presenta una breve descripción del trabajo, desarrollado hasta el momento, en el IMTA para la caracterización física de una muestra de Tezontle comercial. Los principales resultados del estudio son: la mayor parte del sustrato (73%) corresponde a las mallas No. 8 (2.36 mm) y 50 (0.28 mm); según la clasificación de tamices de la ASTM, de las muestras de granulometría gruesa (1 y 2) y del 84 % para la muestra de granulometría fina, ambas coinciden con el concepto de un buen sustrato, es decir son de textura de media a gruesa, con una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presentan, además, un adecuado contenido en aire.

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuahnáhuac 8532. Progreso, Jiutepec, Morelos. México.
Jangeles@tlaloc.imta.mx, wojeda@tlaloc.imta.mx

Introducción

La creciente demanda de agua por el sector agrícola requiere del uso eficiente del riego y de una mayor productividad del agua, ante este escenario, el uso de la agricultura protegida a través de los invernaderos, complementado con un adecuado manejo de agua con el sustrato de cultivo; constituye una alternativa de producción viable, lo que exige en el corto plazo la reconversión productiva en aquellas zonas del país con fuertes problemas de escasez de agua de riego.

El uso de sustratos es propio de cultivos en maceta o contenedor, aunque en México a los suelos utilizados en la producción de planta ornamental o forestal se les llama también sustratos. Desde que se introdujo el cultivo en contenedor, se planteó la necesidad de un cambio conceptual con respecto al cultivo tradicional en suelo, apareciendo los sustratos, en sus distintas variantes, para sustituir al suelo natural. La evolución del concepto de sustrato distinto al del suelo natural, primero tuvo que ver con el descubrimiento de que todas las plantas tienen los mismos requerimientos básicos, lo que llevó a la universalidad de los sustratos. Un segundo hecho fue el darse cuenta de que el medio de cultivo sólo proporciona soporte, humedad, aireación y nutrientes minerales, llevando, en consecuencia, a definir sustratos que no contenían suelo natural.

Un componente común en los cultivos producidos en contenedor es el volumen limitado de sustrato, que obliga a intensificar el riego y el abonado. Por otro lado, la baja altura de sustrato en el contenedor en comparación con el suelo natural es también restrictiva en la selección del medio, puesto que la base del contenedor actúa como una barrera donde el agua se encuentra a presión atmosférica; esto conlleva un mayor contenido de agua retenida a bajas tensiones por la matriz del sustrato, pero cuidando tener un detrimento en la capacidad de aireación.

Es evidente que para garantizar el éxito de un cultivo, el sustrato debe poder mantenerse como un factor fijo, es decir, que sus propiedades físicas, químicas y biológicas sean siempre las mismas con el fin de poder establecer un manejo adecuado.

De acuerdo a la definición de sustrato, se puede utilizar una amplia gama de materiales entre los que podemos citar los siguientes: gravas de cuarzo, tezontle, arena de río, tierra volcánica, turbas o materia orgánica, corteza de pino y lana de roca entre otros. En nuestro país, se utiliza de manera muy extensa el tezontle, ya que proporciona características importantes como la de ser un material inerte, lo que permite mantener al sustrato como un factor fijo. Por otro lado, existe en nuestro país una amplia disponibilidad del material y a un costo relativamente bajo.

Sin embargo, existe poca investigación e información en cuanto a las características físicas y químicas del material en relación con la distribución y grado de almacenamiento del agua y nutrientes, y a su propio manejo como sustrato para el desarrollo de cultivos. Este trabajo pretende realizar una recopilación de la caracterización física de los principales sustratos para cultivo, y además determinar y analizar la granulometría del tezontle utilizado como sustrato para cultivo, en un caso de producción comercial utilizado en el Estado de Morelos.

Revisión de literatura

En el plano internacional, el término sustrato se aplica a todos los materiales sólidos distintos de los suelos naturales, minerales u orgánicos, que colocados en un contenedor, en forma pura o mezclada, permite el anclaje del sistema radicular y el soporte de toda la planta. Los sustratos pueden ser de materiales químicamente inertes o activos, que puede o no aportar nutrientes al proceso de la nutrición de las plantas (Burés, 1997). En los aspectos de manejo y aplicación del agua y del fertilizante es muy importante el conocimiento de las características físicas y químicas de los sustratos, así como el tipo de contenedores o recipientes utilizados. Un sustrato es todo material sólido distinto del suelo natural, que puede ser de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema de raíces de la planta, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir o no en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta.

La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire, así como su variación en función del potencial matricial. Los métodos de determinación de las relaciones aire-agua de los sustratos difieren de los métodos utilizados en los suelos agrícolas.

Las curvas de retención de agua en los suelos tradicionales se miden usualmente en un amplio intervalo de succiones (0 a 15 atmósferas). Por el contrario, las plantas cultivadas en contenedor no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del medio en que crecen y se desarrollan. Por lo anterior, en la determinación de las curvas de retención (liberación) de agua de los sustratos, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0 a 100 cm de tensión de columna de agua). En la Tabla 1 se presentan las principales características de los sustratos.

Granulometría de los sustratos. La importancia de conocer el tamaño de las partículas reside en que éstas definen a su vez el tamaño de los poros situados entre ellas. El tamaño de las partículas afecta el crecimiento de las plantas a través del tamaño de los poros. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido en agua y en aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad.

Los materiales de textura gruesa con tamaño de partícula superior a 0.9 mm, con poros grandes superiores a 100 μm , están bien aireados, pero retienen cantidades reducidas de agua. Los materiales finos con partículas inferiores a 0.25 mm y tamaño de poros inferior a 30 μm , retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y están mal aireados. El mejor sustrato se define como aquel material de textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de los poros entre 30 μm , equivalente a una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire (Raviv *et al.*, 1986; Puustjarvi, 1994).

La densidad aparente. La densidad aparente es la relación entre la masa o peso de las partículas y el volumen aparente que ocupan. El volumen aparente es el volumen que ocupa un sustrato incluyendo la materia sólida y los poros internos y externos, tanto los abiertos como los cerrados.

Porosidad total. Es el volumen total del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas ni minerales. Su nivel óptimo se sitúa por encima del 85 % del volumen del sustrato (Abad *et al.*, 1993).

El total de poros existentes en un sustrato se divide entre: a) poros capilares, de pequeño tamaño (< 30 μm), que son los que retienen el agua, y b) poros no capilares o macroporos, de mayor tamaño (> 30 μm), que son los que se vacían después que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988).

La caracterización del volumen poroso muestra que la porosidad puede ser intraparticular, cuando se refiere a los poros situados en el interior de las partículas del sustrato, o interparticular, cuando está constituida por los poros existentes entre las diferentes partículas. En adición, si el material presenta porosidad intraparticular, el comportamiento de los fluidos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinto, según esta porosidad sea abierta o cerrada (ocluida). En la porosidad cerrada, no existe comunicación posible entre los poros del interior de las partículas y los que están en el exterior, entre dichas partículas. En consecuencia, aquellos poros internos no influirán sobre la distribución del agua y aire en el sustrato. Si, por el contrario, la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas, pudiendo participar, en la aportación de agua para la planta.

Tabla 1. Características físicas de los principales tipos de sustratos. Martínez y García, 1993; y Bastida (2003)*

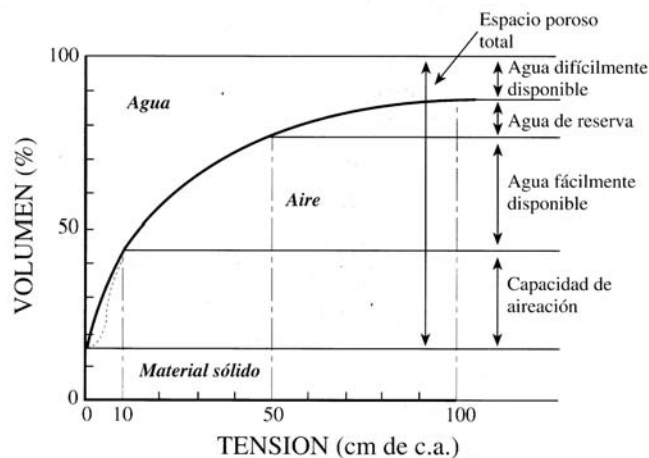
CARACTERÍSTICA FÍSICA	TEZONTLE*	LANA ROCA	PERLITA	FIBRA DE COCO	ARENA
Densidad aparente (gr/cm^3)	0.682	0.09	0.12	0.05 – 0.1	1.84
Densidad real (gr/cm^3)	2.65	2.65	2.65		2.62
Espacio poroso total (% volumen)	74.2	96.7	95.47	Muy alto	29.77
Material sólido (%)	25.76	3.3		-	-
Aire (% volumen)	58.68	14.9	74.4	-	-
Agua fácilmente Disponible (% volumen)	5.42	-	5.13	Alto	15.44
Agua de reserva (% volumen)	2.25		1.39	No se indica	1.84
Agua difícilmente disponible	7.89	4.00	14.55	No se indica	12.49

Agua fácilmente disponible. Es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión matricial, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua. El valor óptimo para el agua fácilmente disponible oscila entre el 20 % y el 30 % del volumen (Abad et al., 2000). Se requiere una tensión mínima de 10 cm para obtener un contenido mínimo de aire. El siguiente punto de importancia se refiere a las condiciones de humedad que no limitarán el desarrollo de la planta. Muchos experimentos han demostrado que una tensión de agua superior a 50 cm puede afectar desfavorablemente el crecimiento y desarrollo de las plantas. En la Figura 1 se presenta una curva característica de retención de agua por los sustratos.

Los poros que se mantienen llenos de agua después del drenaje del sustrato son los de menor tamaño. Es necesario, entonces distinguir entre: a) el agua retenida por el sustrato y que es accesible para la planta, y b) el agua fuertemente retenida por el sustrato y que no es utilizable por la planta, ya que la succión aplicada por las raíces no supera la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del sustrato. La baja capacidad de retención de agua fácilmente disponible se debe a: porosidad total baja, poros grandes y gran parte del agua se pierde por gravedad, o que los poros sean muy pequeños y la planta es incapaz de extraer el agua, o bien una combinación de las anteriores (Abad et al., 1993).

Agua de reserva. El agua de reserva es la cantidad de agua que retiene un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua. El nivel óptimo se sitúa entre el 4 % y el 10 % en volumen. Sin embargo, en plantas hortícolas, se puede alcanzar tensiones de hasta 300 cm de c.a. sin afectar de modo significativo su crecimiento.

El agua total disponible de un sustrato se define como la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva más el agua difícilmente disponible. Su valor óptimo varía entre el 24 % y el 40 % del volumen del sustrato (Abad et al., 1993). El agua difícilmente disponible es el volumen de agua retenida por el sustrato a la tensión de 100 cm de c.a. Esta agua puede ser utilizada por la planta en condiciones de estrés hídrico.



Fuente: De Boodt et al., 1974; Handreck y Black, 1991

Figura 1. Curva característica de retención de agua de un sustrato.

La curva característica de retención de agua de un sustrato se presenta en la Figura 1. Si el perfil es una curva hiperbólica (línea continua), indica que el sustrato estará bien aireado a bajas tensiones. Por el contrario, si la curva es de tipo sigmoideal (línea discontinua), el sustrato retendrá cantidades elevadas de agua y estará pobremente oxigenado a pequeñas tensiones, como puede llegar a ocurrir en contenedores de poca altura (Abad et al., 2000).

Capacidad de aireación. Se define como la proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar, usualmente a 10 cm de tensión. El nivel óptimo de la capacidad de aireación oscila entre el 20 % y el 30 % en volumen.

La altura o profundidad del contenedor tiene un efecto marcado sobre el contenido en aire del sustrato. Cuanto más alto es el contenedor, mayor es el contenido de aire. Cuando se usan contenedores pequeños o poco profundos, son preferibles los sustratos de textura gruesa, que mantienen una aireación adecuada.

Metodología

Determinación de la granulometría del tezontle. A una muestra de tezontle comercial obtenida de las instalaciones de la Empresa Complejo Agrícola de Morelos 2001, S.A. de C.V. localizada en Ocuilco, Estado de Morelos. Este tipo de tezontle es utilizado para el cultivo de jitomate cultivado en bolsas de polietileno de 18 litros. Cabe mencionar que actualmente esta empresa utiliza una granulometría más fina para las etapas fenológicas de germinación y plántula.

La determinación se llevó a cabo en el laboratorio de Riego y Drenaje del IMTA. Se utilizaron los números y aberturas de mallas o tamices de la ASTM (American Society for Testing and Materials) que se presentan a continuación: No. 4 (4.75 mm), 8 (2.36 mm), 10 (2.0 mm), 14 (1.3 mm), 30 (0.54 mm), 50 (0.28 mm) 200 (0.073 mm).

Descripción general de tezontle. Es un material procedente de las erupciones volcánicas, constituidos por silicatos de aluminio, formados por fragmentos y partículas de lava porosa y poco densa. En general, el tezontle en su estado natural presenta partículas de tamaño variable, con buena estabilidad física, presenta variaciones considerables de temperatura, puede mezclarse con otros materiales en diferentes proporciones, tiene buena aireación, la retención de humedad está en función del tamaño de partícula; tezontles de partículas pequeñas presentan alta retención de humedad, partículas grandes, baja retención. En general presenta buen drenaje, la densidad aparente va de media a alta; con poco aporte de nutrientes, baja capacidad amortiguadora de cambios de pH, contenido de sales variable, baja capacidad de intercambio catiónico, porosidad del 65 al 70 %, con alta porosidad interna, pH de neutro a alcalino; de 7.5 a 8.6, aunque también existe con pH ácido, generalmente está libre de sustancias tóxicas (Bastida, 2003).

Retención de agua. La retención de agua en el sustrato generalmente se determina mediante embudos de succión, obteniendo la curva de retención de agua (o de liberación de agua) del sustrato o curva característica de humedad, generalmente a tensiones entre 0 y 100 cm de columna de agua. Muchos sustratos pierden la mayor parte del agua a tensiones muy bajas, inferiores a 50 cm de columna de agua.

Existen algunos modelos para representar la curva característica de humedad. Los desarrollados para la física del movimiento de agua en medios porosos son: Brooks y Corey (1964) y van Genuchten (1980), presentando esta última a en la Figura 2.

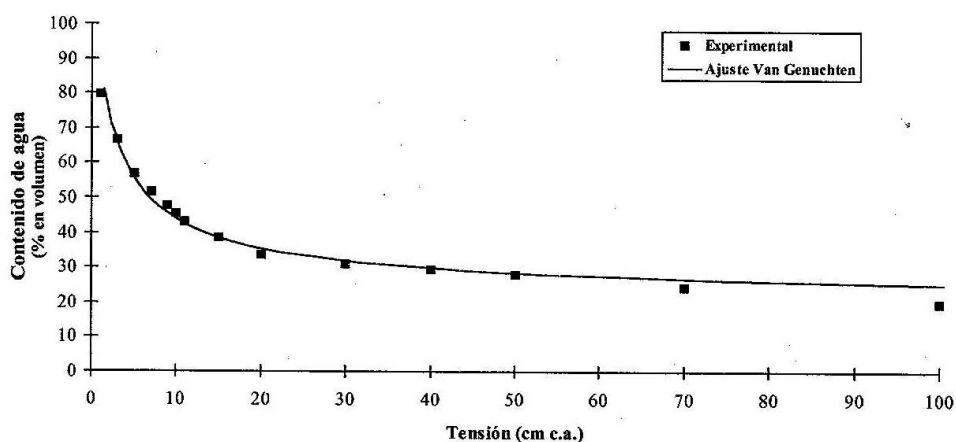


Figura 2. Ajuste de la curva característica de humedad con la ecuación de van Genuchten, para un sustrato de una mezcla volumétrica de 50 % de turba y 50 % de perlita.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_d}\right)^n\right]^m}$$

Con $m = 1 - (2/n)$, la cual es la restricción de Burdine, $0 < m < 1$; $n > 2$; θ_s es el contenido volumétrico de humedad a saturación natural; θ_r es la humedad residual; m y Ψ_d son parámetros empíricos; Ψ_d corresponde al punto de inflexión de la función $\theta(\Psi)$.

La ecuación de van Genuchten es la única que se ha aplicado de un modo general a los sustratos para ajustar las curvas de retención de agua. Los principales problemas de estos modelos estriban en la dificultad de determinar en los sustratos el contenido de humedad residual, que en los suelos corresponde al punto en que la curva característica de humedad no varía su pendiente y se mide a potenciales mucho más bajos que en los sustratos.

Resultados

Granulometría del tezontle. En la Tabla 2 y en la Figura 3 se presentan los resultados de la granulometría del tezontle analizado. De estos se puede hacer el siguiente comentario.

Tabla 2. Valores de la frecuencia relativa y acumulada del tezontle analizado.

No. De malla	Abertura de la malla (mm)	Granulometría Gruesa (1)		Granulometría Gruesa (2)		Granulometría fina	
		Peso (gr)	Frecuencia acumulada (%)	Peso (gr)	Frecuencia acumulada (%)	Peso (gr)	Frecuencia acumulada (%)
>200		92	6.2	68	6.9	31	2.5
200	0.073	220	21	122	19.2	166	15.6
50	0.28	87	26.9	49	24.1	92	22.9
30	0.54	214	41.3	178	42.1	298	46.6
14	1.3	260	58.8	198	62.1	320	72
10	2	126	67.3	95	71.6	103	80.2
8	2.36	396	93.9	239	95.8	243	99.4
4	4.75	92	100	42	100	7	100

La mayor parte del sustrato (73%) corresponde a las mallas No. 8 (2.36 mm) y 50 (0.28 mm) de las muestras de granulometría gruesa (1 y 2), y del 84% para la muestra de granulometría fina; ambas coinciden con el concepto de un buen sustrato, con una textura de media a gruesa, con una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire (Raviv et al., 1986; Puustjarvi, 1994).

Caracterización física de algunos sustratos

Como se ha comentado, se puede utilizar una amplia gama de materiales como sustratos de cultivos: gravas de cuarzo, tezontle, arena de río, tierra volcánica, turbas o materia orgánica, corteza de pino, lana de roca, perlita y fibra de coco entre otros. Sin embargo, en nuestro país aún no están estudiados cada uno de ellos.

En México, el tezontle es un material ampliamente usado como sustrato, ya que proporciona características importantes como la de ser un material inerte, lo que permite mantener al medio como un factor fijo. Por otro lado, existe una amplia disponibilidad del material y a un costo relativamente bajo.

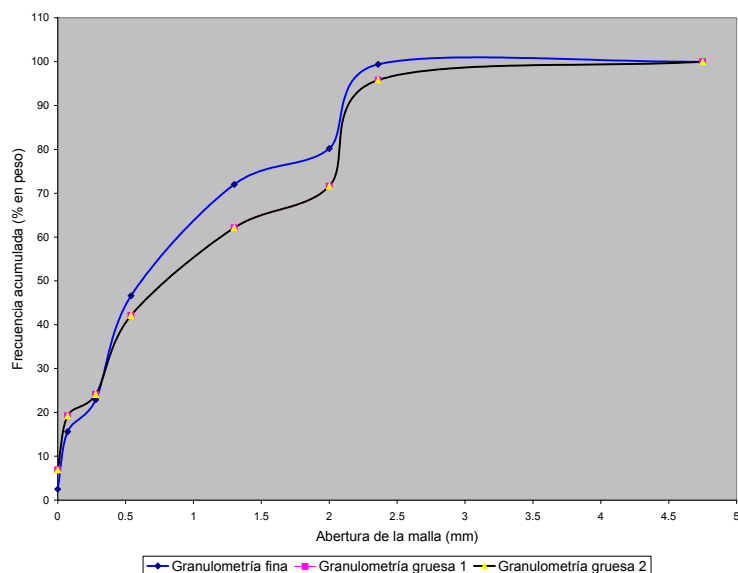


Figura 3. Curva de granulometría del tezontle utilizado para sustrato de cultivo en el Complejo Agrícola Morelos 2001.

En relación con el contenido de humedad, las plantas cultivadas en contenedor no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del medio en que crecen y se desarrollan. Por lo anterior, en la determinación de las curvas de retención de agua de los sustratos, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0 a 100 cm de tensión de columna de agua).

El contenido de agua fácilmente disponible, que corresponde a la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión matricial, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua. Su valor óptimo oscila entre el 20% y el 30% del volumen, requiriendo una tensión mínima de 10 cm para obtener un contenido mínimo de aire.

Finalmente un elemento importante para considerar es la degradación de la estructura del sustrato. Por ejemplo, la lana de roca presenta una degradación de su estructura, lo que condiciona que su empleo no sobrepase los 3 años. En cambio el tezontle, la arena y la perlita pueden ser utilizados durante un mayor tiempo, lo que disminuye sus costos de operación.

Conclusiones

La mayor parte del sustrato (73%) corresponde a las mallas No. 8 (2.36 mm) y 50 (0.28 mm), según la clasificación de tamices de la ASTM, de las muestras de granulometría gruesa (1 y 2), y del 84% para la muestra de granulometría fina; ambas coinciden con el concepto de un buen sustrato, con una textura de media a gruesa, con una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire.

En relación al contenido de humedad, las plantas cultivadas en contenedor no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del medio en que crecen y se desarrollan. Por lo anterior, en la determinación de las curvas de retención de agua de los sustratos, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0 a 100 cm de tensión de columna de agua).

Bibliografía

- Abad M., Martínez P. F., Martínez M. D., y Martínez J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de horticultura*, 11, pp. 141-154.
- Abad B. M. y Noguera M. P. 2000. Capítulo 8. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. (Obra coordinada y dirigida por Cadahía L. C). Ediciones Mundi-Prensa. 2ª. Edición revisada. Madrid, España.
- Bastida T. A. 2003. Curso propedéutico de invernaderos. Capítulo 6. Los Sustratos. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma Chapingo.
- Brooks R. H, y Corey A. T. 1964. *Hydraulics properties of porous media*. Hydrology paper 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Bunt A. C. 1988. *Media and mixes for container-grown plants*. 2ª. Edición. Unwin Imán Ltd., London, 309 pp.
- Burés S. 1997. *Sustratos*. Ediciones agrotécnicas. Madrid, España. 331 pp.
- Cadahía L. C. 2000. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª. Edición revisada. Madrid, España.
- De Boodt M., Verdonck O. y Cappaert I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37:2054-2062.
- Fernández M. M., Aguilar M. I., Carrique J. R., Tortosa J., García C., López M., Pérez J. M. 1998. *Suelo y medio ambiente en invernaderos*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Handreck K. A. y Black N. D. 1991. *Growing media for ornamental plants and turf*. New South Wales University Press, Kensington. 401 pp.
- Martínez E. y García M. 1993. *Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo*. Ediciones de horticultura S. L. Reus (Tarragona). 123 pp.
- Puustjarvi V. 1994. *La turba y su manejo en horticultura*. Ediciones de horticultura S. L., Reus. 123 pp.
- Raviv M., Chen Y. e Inbar Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. In: *The role of organic matter in modern agriculture*. Editores: Y. Chen y Y. Avnimelech. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht. pp:257-287.
- van Genuchten M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.