

SUELO

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: <http://dx.doi.org/>

Caracterización física e hidrofísica de sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de naturación en espacios urbanos

Physical and hydro-physical characterization sustainable organic substrates for urban naturation systems

M.Sc. Glenny López-Rodríguez^I, Dr. Javier Pérez-Esteban^{II}, Dr. Juan Ruiz-Fernández^{III}, Dr. Alberto Masaguer^I

^IUniversidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Agraria, Madrid, España.

^{II}Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Departamento de Química Orgánica y Bio-Orgánica, Madrid, España.

^{III}Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), Alcalá de Henares, Madrid, España.

RESUMEN. La naturación en espacios urbanos incorpora vegetación en las ciudades a fin de amortiguar el desequilibrio entre lo urbano y el medio-ambiente. Cultivar las plantas fuera del suelo natural, exige utilizar medios de cultivos que aporten soporte físico, agua, aire y nutrientes a las plantas. Aplicaciones como jardines verticales o terrazas verdes constituyen formas innovadoras de naturación en espacios urbanos donde el uso de sustratos puede ser útil como medio de cultivo. El objetivo fue evaluar las propiedades físicas e hidrofísicas de sustratos orgánicos potenciales para jardines verticales y terrazas naturadas. Se evaluaron los siguientes sustratos: 70 % restos vegetales compostados + 30 % puzolana volcánica; 70 % corteza de pino compostada + 30% puzolana volcánica; 70 % corteza de pino compostada + 30 % fibra de coco; 70 % fibra de coco + 30 % corteza de pino compostada; sustrato testigo con 90 % fibra de coco + 10 % poliestireno expandido; 70 % restos vegetales compostados + 30 % corteza de pino compostada y 70 % restos vegetales compostados +30 % fibra de coco. Las evaluaciones analíticas en los sustratos se realizaron según la normativa UNE-EN-AENOR. Los sustratos a base de fibra de coco presentaron bajas densidades y alto espacio poroso total, mientras que los que contenían puzolana volcánica presentaron baja retención de humedad. Los sustratos orgánicos mostraron buenas características en cuanto a sus propiedades, porque pueden proporcionar capacidad de retención de humedad, aireación y propiedades de drenaje.

Palabras clave: residuos orgánicos, curva de retención de humedad, terrazas verdes, jardines verticales.

ABSTRACT. The naturation in urban spaces incorporates vegetation in the cities in order to muffle the imbalance between the urbanization and the environment. To cultivate the plants outside of the natural soil demands to use means of cultivations that contribute with physical support, water, air and nutrients to the plants. Applications like vertical gardens or green terraces constitute innovative forms of naturation in urban spaces where the use of substrates can be useful as mean of cultivation. The objective was to evaluate the physical and hydro-physical properties of organic substrates potentials for vertical gardens and naturated terraces. The following substrates were evaluated: 70 % of composted vegetable remains + 30 % volcanic puzolan; 70 % bark of composted pine + 30 % volcanic puzolan; 70 % composted bark of pine + 30 % coconut fiber; 70 % coconut fiber + 30% composted bark of pine; witness substrate with 90 % coconut fiber + 10 % expanded polystyrene; 70 % composted vegetable remains + 30 % composted bark of pine and 70 % composted vegetable remains + 30 % coconut fiber. The analytic evaluations in the substrates were carried out according to the normative UNITE-EN-AENOR. The substrates using coconut fiber presented low densities and total high porous space, while those that contained volcanic puzolan presented low retention of humidity. The organic substrates showed good characteristic of their properties, because they can provide capacity of retention of humidity, aeration and drainage properties.

Keywords: organic residuals, curves of retention of humidity, green terraces, vertical gardens.

INTRODUCCIÓN

El empleo de sustratos como medio de cultivo (en macetas y contenedores) es muy común en sistemas agrícolas, principalmente de carácter hortícola, así como también, en sistemas singulares con propósito ornamental, tales como jardines verticales y/o terrazas naturalizadas. La vegetación como componente principal de la naturación en espacios urbanos mejora la capacidad del sistema ofreciendo beneficios como: reducción del efecto isla de calor urbano (Alexandri y Jones, 2007; MacIvor y Lundholm, 2011), retención de la humedad¹, favorece la biodiversidad (Gedge y Kadas, 2005), mejora la visibilidad estética del edificio donde se implemente (White y Gatersleben, 2011) y contribuye con la disminución del estrés en las personas (Maas *et al.*, 2006), entre otros. Para que estos beneficios sean posibles, es importante el crecimiento y el desarrollo de la vegetación con el apoyo de medios de cultivo (Graceson *et al.*, 2014) que contribuyan a reducir el peso del sistema de naturación utilizado (jardín vertical o techo verde) y su efecto sobre la capacidad de carga del edificio por lo que la demanda de estos materiales, cada vez se intensifica². Por ejemplo, los techos verdes extensivos están diseñados para requerir poco mantenimiento, por lo que requieren medios de cultivo menos profundos a diferencia de los techos verdes intensivos que pueden apoyar una amplia gama de plantas y requieren considerable mantenimiento.

Desde hace algún tiempo la turba de *Sphagnum* ha sido el medio de cultivo más utilizado para la producción de plantas en macetas ornamentales. Sin embargo, desde finales de 1970 ha habido una búsqueda mundial de nuevos sustitutos de turba (Raviv *et al.*, 1986; Robertson, 1993). Una razón para esto es el alto precio de la turba hortícola de alta calidad, especialmente en los países sin recursos de turba. Una segunda razón es la disponibilidad cuestionable de turba en un futuro próximo debido a las restricciones ambientales (Abad *et al.*, 2001). Razones económicas y ambientales, incitan a indagar sobre la utilización de materiales alternativos que contribuyan al uso en menor escala o casi de la eliminación de estos materiales³ (López-Cuadrado *et al.*, 2006). Esto estimula la búsqueda de nuevos materiales que presenten buenas características tanto físicas e hidrofísicas (Evans *et al.*, 1996) (Noguera *et al.*, 2003), principalmente, así como también químicas (como una elevada capacidad de intercambio catiónico) (Evans *et al.*, 1996; Konduru *et al.*, 1999; Noguera *et al.*, 2003; Abad y Carrión, 2004). Además,

que cumplan funciones de soporte físico de la vegetación, que permitan un desarrollo satisfactorio en el sistema radicular y proporcionen una relación óptima agua/oxígeno y nutrientes necesarios⁴. La mayoría de los sustratos fabricados en la actualidad son mezclas de dos o más componentes, pero las propiedades físicas y químicas del producto final no siempre es similar a la suma de las partes (Masaguer, 2015).

Las características que debe reunir un componente o sustrato de cultivo varían en función de las necesidades del material vegetal a utilizar, del objetivo del cultivo, de los medios de control disponibles en la explotación y de las incidencias de factores no controlados⁵. Antes de la utilización de un sustrato es muy importante conocer las propiedades intrínsecas que le definen como tal. La caracterización física e hidrofísica de los sustratos envuelve principalmente el estudio de su granulometría, densidades tanto de partículas como aparente, la porosidad o distribución de agua y el aire en el espacio poroso. Una vez conocidas las características y propiedades, si resultan no ser óptimas para una aplicación en concreto, pueden mejorarse corrigiendo la granulometría, el pH, lixiviación de sales en exceso o la mezcla con otros materiales⁶. Los resultados obtenidos en este estudio contribuirán a los conocimientos en relación con las características físicas e hidrofísicas de sustratos existentes así como de nuevos medio de cultivos que surjan en el futuro, favoreciendo la gestión del riego en contenedores y espacios confinados. Por lo que, el objetivo principal de este estudio fue evaluar las propiedades físicas e hidrofísicas de sustratos orgánicos sostenibles potenciales para jardines verticales y terrazas naturalizadas.

MÉTODOS

Descripción de los sustratos evaluados

Se evaluaron sustratos elaborados a partir de subproductos forestales, agrícolas y urbanos, concretamente corteza de pino compostada, fibra de coco (formatos chips y polvo de coco, importados de Sri Lanka) y restos vegetales urbanos compostados. A partir de estos materiales se fabricaron siete mezclas las cuales, se presentan en la Tabla 1. Las mezclas de los materiales para la elaboración de los sustratos fueron realizadas por la empresa PONS Agropecuaria. Estos sustratos corresponden a nuevos medios de cultivo potenciales para el desarrollo de especies vegetales en sistemas de naturación en espacios urbanos e incluso en horticultura.

- 1 BERGHAGE, R., A. JARRETT, D. BEATTIE, K. KELLEY, S. HUSAIN, F. REZAI and B. LONG: Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain, National Decentralized Water Resources Capacity Development Project, 2007.
- 2 FLL (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU/ LANDSCAPE, RESEARCH, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION SOCIETY): Introduction to the FLL Guidelines for the Planning, 9pp., Construction and Maintenance of Green Roofing 2008, Edition of the Green Roofing Guideline, 2008.
- 3 LÓPEZ-CUADRADO, M.C., J. RUIZ-FERNÁNDEZ, and A. MASAGUER: Producción de planta ornamental en contenedor con sustratos alternativos a la turba, 173pp., IMIDRA, Madrid España, 2006.
- 4 BAIXAULI, C., y J. AGUILAR: Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias, 110pp., Valencia (España), Generalitat Valenciana, 2002.
- 5 TERÉS TERÉS, V: Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Agronomos. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 483pp., 2001.
- 6 CARRIÓN, C: Desarrollo de nuevos sustratos de cultivo para la producción de planta ornamental en maceta a partir de compost de residuos de cultivos hortícolas, Valencia, España, Tesis de doctorado, Universidad de Valencia, Valencia, España, 2006

TABLA 1. Composición volumétrica de sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos. Códigos de tratamiento se derivan de las iniciales del tipo de material orgánico utilizado

Nomenclatura	Componentes (v/v)
FC+PE (Testigo)	90% Sustrato testigo en base de polvo de coco + 10% poliestireno expandido.
RVC+PV	70% Restos vegetales compostados + 30% puzolana volcánica.
CPC+PV	70% Corteza de pino compostada + 30% puzolana volcánica.
CPC+FC	70% Corteza de pino compostada + 30% fibra de coco.
FC+CPC	70% Fibra de coco + 30% corteza de pino compostada.
RVC+CPC	70% Restos vegetales compostados+ 30% corteza de pino compostada.
RVC+FC	70% Restos vegetales compostados+ 30% fibra de coco.

Determinaciones analíticas de los sustratos

Las determinaciones analíticas se realizaron (por triplicado) en los laboratorios del Departamento de Producción Agraria, Unidad de Edafología, de la E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Se utilizaron procedimientos metodológicos según la normativa europea UNE-EN (AENOR, 2000-2008). En la Tabla 2 se detallan los procedimientos para las determinaciones analíticas y la referencia de según lo establecido en la norma.

TABLA 2. Normas europeas (UNE-EN, AENOR 2000-2008) para la caracterización física y química de mejoradores de suelos y sustratos de cultivo

Referencia	Determinación Analítica
UNE-EN 12579	Toma de muestras.
UNE-EN 12580	Determinación de cantidad.
UNE-EN 13040	Preparación de la muestra para los ensayos físicos y químicos: Contenido de materia seca, humedad y densidad aparente compactada de laboratorio.
UNE-EN 13041	Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente, volumen del aire, contracción y porosidad total.

Fuente: AENOR, 2000-2008.

La caracterización física incluyó: 1) Granulometría, mediante el método propuesto por Martínez (1997), con tamices de 0.125, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0 y 4.0 mm; 2) Índice de grosor (IG), como porcentaje en peso de partículas con diámetro mayor a 1 mm (Richards *et al.*, 1986); 3) Densidad aparente (Da), por la Norma UNE-EN 13040:2000; 4) Densidad real (Dr) y espacio poroso total (EPT) (UNE-EN 13041:2000); 5) Capacidad de retención de agua (CRA), mediante el método descrito por (Ansorena, 1994); y 6) Curva de liberación de agua, por el método descrito por De Boodt *et al.* (1974) y las modificaciones de Martínez (1997) que incluyen capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua total disponible (ATD) y agua difícilmente disponible (ADD).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) en el programa estadístico Infostat®. Previamente al ANOVA se realizaron las verificaciones de los supuestos, la normalidad se obtuvo mediante la prueba de Kruskal Wallis y gráficamente con los residuos versus predichos en un QQ-plot. La homocedasticidad se verificó con la prueba de Levene. Los datos donde no se cumplieron estos supuestos fueron transformados a raíz cuadrada. Para la detección de diferencias entre las medias se realizaron comparaciones utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas: contenido de humedad, densidad aparente, densidad de partículas y espacio poroso total

En la Tabla 3 se presentan los valores medios correspondientes a: contenido de humedad (Hg) densidad aparente (Da), densidad de partículas (Dp) y espacio poroso total (EPT) obtenidos en sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos. El contenido de humedad (Hg), la densidad aparente (Da), la densidad real (Dr) y el espacio poroso total (EPT) mostraron diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$) entre sustratos (Tabla 3). En cuanto a la Hg, se obtienen valores promedios en el rango de 9,4% (RVC+PV) y 72,5% (FC+PE). Los sustratos RVC+PV, CPC+PV y RVC+FC presentaron una Hg menor al 30% (Tabla 3). Según la norma inglesa (Ansorena, 1994), la humedad de algunos materiales debe alcanzar un valor mínimo al 30% para que pueda mezclarse y humedecerse de forma adecuada, por lo que estos tres sustratos no cumplen con el mínimo recomendado.

La Da media de los sustratos RVC+PV y CPC+PV se encontró por encima del valor óptimo recomendado (<400 Kg m⁻³) por Abad *et al.* (1993) (Tabla 3). Es deseable tener sustratos con una Da baja para facilitar su traslado y se reduce la carga estructural en las fachadas o techos de los edificios donde se implementen. Estos dos sustratos a diferencia de los demás, contienen un 30% de puzolana volcánica, material muy denso que ayudó al incremento de dicha densidad. El sustrato testigo,

presentó la menor Da media, y mayor EPT, siendo esta última superior al 85% (nivel mínimo recomendado por Abad *et al.*, 1993). En ese sentido, RVC+PV presentó los mayores Da y tamaño de partículas y menor EPT (Tabla 3). El incremento de Da mayor a 40 Kg m⁻³ implica un alto grado de compactación y puede reflejar un mal desarrollo en el sistema radicular de cualquier planta.

TABLA 3. Propiedades físicas en sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos (valores promedios)¹

Sustrato	Hg (%)	Da (K kg m ⁻³)	Dr (kg m ⁻³)	EPT (%)
FC+PE (testigo)	72,51 g	80 a	1680 a	95,28 g
RVC+PV	9,43 a	805 g	2420 d	65,05 a
CPC+PV	16,06 b	740 f	2380 d	68,93 b
CPC+FC	45,06 e	190 c	1830 b	89,25 e
FC+CPC	59,14 f	140 b	1840 b	92,46 f
RVC+CPC	36,40 d	306 d	2030 c	82,06 d
RVC+FC	27,20 c	402 e	2030 c	79,66 c
Niveles de referencia ²	-	< 400	1450-2650	>85

¹Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes (p≤0,05), Tukey HSD. FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada. Hg=humedad gravimétrica, Da=densidad aparente, Dr=densidad real o de partículas y EPT=espacio poroso total. ²Abad *et al.*, 1993.

La Dr mostró menor diferencia significativa (p≤0,05) en el sustrato testigo, mientras que los sustratos con puzolana volcánica mostraron la mayor Dr media, seguido de los sustratos con un 70% de restos vegetales compostados. Los valores medios mínimo y máximo de Dr oscilaron entre 1,7 y 2,4 g cm⁻³, valores por encima del valor óptimo recomendado (1,5 g cm⁻³) por Arenas *et al.* (2002). No obstante, los valores medios de Dr registrados en los sustratos se encontraron dentro de los niveles de referencia (1,45-2,65 g cm⁻³) reportados por Abad *et al.*, (1993) (Tabla 3).

Valores medios de EPT fueron estadísticamente diferentes (p≤0,05) en todos los sustratos. Los valores mínimos y máximos de EPT oscilaron entre 65,1% y 95,3%, respectivamente, Landis *et al.* (1990) señalan que muchos autores recomiendan de 60 a 80% de porosidad total, no obstante, Abad *et al.*, (1993) sugiere valores de EPT superiores al 85%. El sustrato testigo fue estadísticamente superior (p≤0,05), con valor de 95%, similar al reportado por Noguera *et al.* (2000) y Arenas *et al.*, (2002), mientras que los sustratos con 30% de puzolana volcánica fueron estadísticamente inferiores (p≤0,05) y estadísticamente diferentes (p≤0,05) entre sí. Los valores medios del EPT en los sustratos con 30% puzolana volcánica y en los de 70% de restos vegetales compostados fueron menores al 85%, nivel mínimo recomendado por Abad *et al.*, (1993), donde mostraron altas densidades y bajo EPT. Sin embargo, los valores de EPT de todos estos sustratos estuvieron dentro del rango (45-99%) recomendado por Aendekerk *et al.* (2000).

Granulometría e índice de grosor

En la tabla 4 se presenta el análisis granulométrico correspondiente a la distribución de partículas con diámetro

menor a 1 mm. El análisis granulométrico correspondiente a las fracciones de partículas menores a 1 mm fue estadísticamente superior (p≤0,05) en el sustrato RVC+PV, seguido de RVC+FC y estadísticamente inferior (p≤0,05) en FC+CPC y en el sustrato testigo (Tabla 4).

TABLA 4. Distribución de partículas de hasta 1 mm de diámetro en sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos. Valores medios expresados en porcentaje en peso¹

Sustrato	Tamaño de partículas (mm)			
	< 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 1,00	< 1mm
FC+PE (testigo)	13,33 a	19,56 d	26,31 e	59,19 d
RVC+PV	24,91 d	16,88 c	16,43 c	58,22 d
CPC+PV	16,37 b	11,93 a	14,04 a	42,35 a
CPC+FC	16,44 b	14,36 b	16,53 c	47,33 b
FC+CPC	10,98 a	12,31 a	14,94 b	38,23 a
RVC+CPC	17,07 b	16,99 c	18,86 d	52,91 c
RVC+FC	21,10 c	17,49 c	20,20 d	58,79 d
MEDIA	17,17	15,65	18,19	51,00

¹Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes (p≤0,05), Tukey HSD. FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada.

La proporción media de partículas se registró en el sustrato testigo, y correspondió al intervalo de 0.5 mm a 1,0 mm, resultados similares a los encontrados por Tapia *et al.* (2008) en sustratos de polvo de coco. En sustratos con contenido de fibra de coco, Evans *et al.* (1996), reportó variaciones en un intervalos de partículas entre 0,5 mm y 2 mm. La distribución de tamaño de partículas y por lo tanto, la porosidad inter-partículas afectan el equilibrio entre el agua y el contenido de aire para cada nivel de humedad (Raviv, *et al.*, 1987)thermophilically digested cow manure (TFM. El mejor sustrato es el que con textura media a gruesa, equivalente a una distribución de tamaño de partícula entre 0,25 y 2,5 mm, que permite la retención suficiente de agua fácilmente disponible junto con un contenido de aire adecuada. Por otro lado, Hendreck (1983) estudió el tamaño de partícula y propiedades físicas de los medios de cultivo para contenedores y concluyó que la fracción más pequeña que 0,5 mm, y en particular entre 0,1 y 0,25 mm, tiene la mayor influencia sobre la porosidad y la retención de agua.

En la Tabla 5 se presenta el análisis granulométrico de distribución de partículas con diámetro mayor a 1 mm y el índice de grosor (IG) obtenido en los sustratos evaluados. Richards *et al.* (1986) define un “índice de grosor” como el porcentaje de volumen acumulativo de partículas mayores de 1 mm.

TABLA 5. Distribución de partículas superiores a 1 mm de diámetro e índice de grosor en sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos. Valores expresados en porcentaje en peso.

Sustrato	Tamaño de partículas (mm) ¹					Índice de grosor (IG)
	1 – 2	2 – 4	4 – 8	8 - 16	>16	
FC+PE (testigo)	25,79 d	13,49 a	1,53 a	0,00 a	0,00 a	40,81 a

Sustrato	Tamaño de partículas (mm) ¹					Índice de grosor (IG)
	1 – 2	2 – 4	4 – 8	8 - 16	>16	
RVC+PV	15,92 b	13,90 a	10,74 c	1,23 a	0,00 a	41,78 a
CPC+PV	16,82 b	18,65 b	19,25 e	2,94 b	0,00 a	57,65 d
CPC+FC	16,82 b	14,58 a	14,04 d	6,48 c	0,75 a	52,67 c
FC+CPC	13,72 a	11,87 a	17,24 e	16,46 d	2,46 b	61,77 d
RVC+CPC	17,95 c	13,76 a	10,97 c	4,41 a	0,00 a	47,09 b
RVC+FC	18,62 c	12,40 a	7,65 b	2,54 a	0,00 a	41,21 a
MEDIA	17,95	14,09	11,63	4,87	0,46	49,00

¹Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada.

En la fracción entre 1 y 2 mm el testigo fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) concentrando el 26% de las partículas con dicha granulometría. El mayor porcentaje significativo ($p \leq 0,05$) de partículas comprendidas entre 2 y 4 se registró en CPC+PV (19%). En fracciones entre 4 y 8 mm, la proporción significativamente mayor ($p \leq 0,05$) se observó en CPC+PV y FC+CPC con 19% y 17%, respectivamente. En partículas por encima de 8 mm se registró una mayor concentración de partículas en FC+CPC, así como entre 8-16 mm y partículas superiores a 16 mm. (Tabla 5). Graceson *et al.* (2013) en estudios realizados con medios de cultivo provenientes de materiales inorgánicos (ladrillo picado) mezclados con residuos vegetales compostado reportaron mayor porcentaje de partículas entre 4 y 8 mm. Jayasinghe (2012) informó que un exceso de partículas más grandes puede conducir a excesiva aireación y retención de agua inadecuada y que un exceso de partículas finas puede obstruir los poros y disminuir la porosidad de aire. Sustratos de cultivo con un alto porcentaje de partículas de entre 0,25 y 2,00 mm son óptimos para el crecimiento de plantas en macetas (Jayasinghe, 2010).

Propiedades hidrofísicas: capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y fracción de sólidos (MS)

La curva característica de humedad o curva de liberación de agua propuesta por De Boodt *et al.* (1974), corresponde a la relación que combina el contenido de humedad (θ) de un medio poroso y la energía (potencial matricial: Ψ_m) con la que el agua es retenida por el mismo. En la Tabla 6 se presentan los valores promedios de las propiedades hidrofísicas obtenidas en los sustratos estudiados: capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible o utilizable (ADD) y masa de sólidos o fracción de poros (MS). La CA obtenida en CPC+FC y FC+CPC, estadísticamente ($p \leq 0,05$) muestran la misma

capacidad de aireación, así como los sustratos RVC+PV y FC+CPC. Los rangos medios mínimos y máximos registrados en esta variable oscilaron entre 29,5% (RVC+CPC) y 42,0% (CPC+FC), respectivamente (Tabla 6). Según diferentes autores los requerimientos de un sustrato deben encontrarse en torno al 20% y 30% de CA (Abad *et al.*, 1993; Ansorena, 1994), sin embargo, estos rangos son contradictorios debido a que otros diferentes autores indica su propio criterio con respecto al nivel óptimo de CA, De Boodt y Verdonck (1972) sugiere un rango entre 10-30%; Puustjarvi y Robertson (1975) de 45% a 50%; Havis y Hamilton (1976) recomiendan una CA entre 20% y 25% y Whitcomb (1988) de 25% a 35%.

TABLA 6. Propiedades hidrofísicas en sustratos orgánicos potenciales para sistemas de naturación en espacios urbanos. Valores medios en porcentaje¹/ volumen

Sustrato	CA (%)	AFD (%)	AR (%)	ATD (%)	ADD (%)	MS (%)
FC+PE (testigo)	37,56 c	24,29 d	1,04 a	25,33 f	32,39 e	4,72 a
RVC+PV	39,83 d	4,42 a	2,58 b	6,99 a	18,23 a	34,96 g
CPC+PV	38,89 c	7,58 b	2,66 b	10,24 b	20,80 b	31,07 f
CPC+FC	41,98 e	8,59 b	3,52 c	12,11 c	35,16 f	10,75 c
FC+CPC	40,87 de	17,27 c	3,29 c	20,56 d	31,02 d	7,55 b
RVC+CPC	29,47 a	17,00 c	4,79 c	21,79 e	30,79 d	17,95 d
RVC+FC	31,66 b	16,72 c	3,18 bc	19,90 d	28,10 c	20,35 e
Nivel de referencia ²	20-30	20-30	4-10	24-40	25-31	-

¹Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada. CA=capacidad de aireación, AFD=agua fácilmente disponible, AR=agua de reserva, ATD (AFD+AR)= agua total disponible ADD=agua difícilmente disponible, MS= masa de sólidos. ²Abad *et al.*, 1993.

En cuanto al AFD, se encontraron valores medios que oscilan entre 4% (RVC+PV) y 24% (FC+PE), encontrándose diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre estos dos sustratos (Tabla 6). Algunos autores como Abad *et al.* (1993) sugieren que el AFD debe comprender un margen entre el 20-30%, en ese sentido, sólo el sustrato testigo cumple con la AFD recomendada. Cabe destacar que la AFD fue mayor en el testigo (24,3%), lo que se explica por ser un material que no aún no ha sido sometido a biodegradación, a este sustrato se le atribuye, un mayor EPT vinculado al poliestireno expandido con que fue mezclado. Los valores medios correspondientes a AR oscilaron entre el 1% y 5% en FC+PE y RVC+CPC, respectivamente (Tabla 6). Los niveles óptimos sugeridos de AR se encuentran entre el 4-10%, según diferentes autores (Abad *et al.*, 1993; Ansorena, 1994). Sólo el sustrato RVC+CPC (4,8%) se mostró cercano al mínimo recomendado, sin embargo, este sustrato fue estadísticamente similar ($p \leq 0,05$) a CPC+FC, FC+CPC y RVC+FC, siendo las mezclas con mayor capacidad compensadora de agua o agua de reserva. El sustrato CPC+FC

(3,5%) aunque se encuentra por debajo del límite inferior se acerca mucho al mínimo recomendado. De acuerdo a los resultados obtenidos de AFD y AR, el sustrato testigo presentó el mayor porcentaje de ATD, esto era de esperarse debido a que la fibra de coco en formato polvo de coco admite una capacidad elevada de almacenamiento de agua, asociadas a las fracciones granulométricas finas hacen que se retenga el agua con mucha fuerza. Este sustrato presenta un ATD cercano al límite inferior sugerido por Abad *et al.* (1993).

Los valores medios de ADD obtenidos en este estudio fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0,05$) en FC+CPC (31,0%) y RVC+CPC (30,8%) (Tabla 6). Los porcentajes óptimos recomendados por Abad *et al.* (1993) se encuentran en un rango de 25% a 31%, de acuerdo a este criterio, solamente los sustratos FC+CPC, RVC+CPC y RVC+FC cumplen con dicha característica (Tabla 6). El volumen de ADD registrado en RVC+PV con 18,2% fue estadísticamente inferior, seguido de CPC+PV con 20,8% y estadísticamente superior en CPC+FC con 35,2%. El porcentaje de ADD resultó ser inferior en sustratos que contenían puzolana volcánica al rango óptimo indicado por Abad *et al.* (1993), lo que demuestra la escasa capacidad de estos materiales para liberar el agua absorbida. Según Ansorena (1994), esta característica hace poco recomendable a estos como componente de sustratos. No obstante, puede ser de gran utilidad para sistemas con especies que requieran poca utilización de agua.

La fracción sólida (MS) observada muestra una gran variabilidad en las diferentes mezclas estudiadas, por lo que se presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre todos los sustratos, siendo inferior en el testigo y superior en los sustratos con contenido de puzolana volcánica (Tabla 6). La MS depende

del material de origen, por lo que puede observarse que esta variable está proporcionalmente relacionada con la densidad del sustrato.

Propiedades hidrofísicas: curvas de retención de humedad

En la Figura 1 se representan los valores medios correspondientes a las curvas de retención de humedad a diferentes tensiones (0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua) de los sustratos estudiados. El eje vertical indica el contenido de agua y el eje horizontal representa los diferentes puntos de tensión a la que fueron sometidos los sustratos. Las curvas características de estos sustratos muestran un comportamiento similar entre sí, debido a que las pendientes, inicialmente presentan valores superiores al 65% pero estos valores disminuyen un 25%, 21% y 18% al someter el sustrato a tensiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua, respectivamente. Se observa que para una misma tensión de succión, la tendencia entre los sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) es parecida, siendo los valores de CPC+PV ligeramente superiores en los diferentes puntos de tensión con respecto a RVC+PV. A una succión de cero cm de tensión de columna de agua todos los sustratos mostraron diferencias, siendo estos dos sustratos (RVC+PV y CPC+PV) los que presentan la menor retención de humedad a bajas tensiones (Figura 1). Contrario a ello, las mezclas que retienen la mayor cantidad de humedad volumétrica son los sustratos con mayor proporción en el contenido de fibra de coco, es decir, FC+PE (testigo) y FC+CPC, seguidos de CPC+FC (Figura 1).

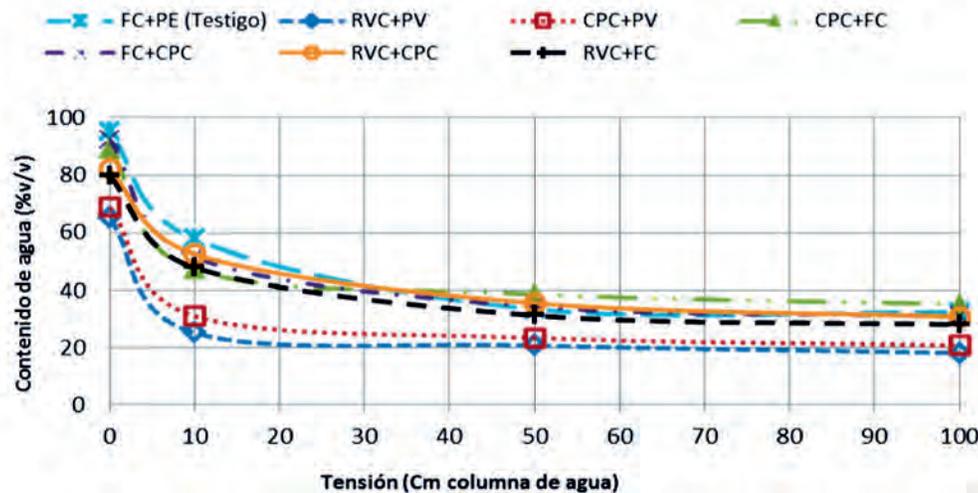


FIGURA 1. Propiedades hidrofísicas: Curvas de retención de humedad en sustratos de cultivos sostenibles con potencialidad de uso en jardines verticales y cubiertas vegetales en espacios urbanos (en porcentaje en volumen) Leyenda: FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada.

A una succión de cero cm de tensión de columna de agua los sustratos mostraron diferencias; los de contenido en puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) presentaron la menor retención de humedad a bajas tensiones y los orgánicos mostraron mayor retención de humedad (Figura 1). Los componentes minerales como la puzolana volcánica reducen la capacidad de retención tanto de la corteza de pino compostada como de los restos de podas compostados (Masaguer *et al.*, 2015). Los valores medios de retención de humedad registrados en el testigo (FC+PE) a una tensión de 10 cm de columna de agua fueron superior al resto de sustratos y se encontraron dentro del rango recomendado por Abad *et al.* (1993), mientras que los demás sustratos estuvieron por debajo de lo recomendado. Las retenciones de humedad a 10 cm registradas como las más bajas se observaron en los sustratos con

contenido de puzolana volcánica, principalmente en RVC+PV, cumpliendo el supuesto de que el sustrato que más retiene, menos libera. Desde un punto de vista físico, el uso de esta mezcla podría requerir riego frecuente, utilizando pequeña cantidad de agua cada vez, debido a sus bajos valores de AR descritos anteriormente en la Tabla 6. Con respecto a los demás sustratos, se asume que estos dos pierden gran cantidad del agua retenida a bajas tensiones. La representación de las curvas de retención de humedad para sustratos orgánicos (relación tensión/humedad), es un indicador muy sensible a las variaciones de materia orgánica. En la medida en que el contenido de la MO incrementa, aumenta la capacidad de agua retenida en el sustrato. Los componentes minerales como la puzolana volcánica reducen la capacidad de retención tanto de la corteza de pino compostada como de los restos de podas compostados. El aumento de la capacidad de retención de agua del sustrato testigo se consigue sin comprometer la alta capacidad de aire, lo que representa una característica distintiva de los sustratos inorgánicos (con contenido de puzolana volcánica). Sin embargo, la capacidad de retención de agua del polvo de coco se considera excesivamente baja si se compara con un sustrato ideal (De Boodt y Verdonk, 1972; Abad *et al.*, 2001), lo que hace necesario para la mayoría de las aplicaciones la utilización de este material en mezcla con componentes que aumenten la retención de agua más alto. Las guías alemanas de ambientalización de techos indican que la principal fuente de variación en las capacidades de retención de agua en los techos verdes dependerá de la profundidad del medios de cultivo (FLL, 2008). Los valores de referencia para el rango de retención de agua anual del 40% es de 20 mm de sustratos de cultivo para una cubierta verde extensiva, mientras que para una retención anual del más de 90% es de 500 mm de sustratos de cultivo para un techo verde intensivo. Para una retención de agua máximo anual de un 60% en cubierta verde semi-extensiva los sustratos de cultivo deben ser no más de 200 mm de profundidad, todo ello para minimizar los efectos sobre el apoyo a la capacidad de soporte de carga del edificio (FLL, 2008).

CONCLUSIONES

- La determinación de las propiedades físicas e hidrofísicas de los sustratos que se emplean en las diferentes modalidades de naturación en espacios urbanos (jardines verticales, terrazas vegetales, fachadas, etc.), agricultura urbana o sus variantes es esencial para garantizar el éxito del sistema. Los niveles de referencia con los que se analizan estos

resultados se refieren únicamente a las propiedades físicas e hidrofísicas de los sustratos evaluados. De las propiedades estudiadas se resalta la necesidad de bajas densidades y elevadas porosidades. Las variabilidades en cuanto a densidades registradas en los sustratos evaluados en este estudio podrían dar una idea de en qué tipo de sistema de naturación en espacios urbanos podrían emplearse, debido a que dependerá mucho de su aplicación. Se debe tener en cuenta el peso de los soportes incluyendo el contenedor, el sustrato, la vegetación, etc., si es para jardinería vertical o fachada vegetal lo más recomendable es que se traten de materiales ligeros, de fácil manipulación y transporte, por lo que las mezclas a base de materiales 100% orgánicos podrían ser adecuados para jardines verticales, tomando en cuenta las densidades registradas.

- La elevada Da observada en el sustrato restos vegetales compostados mezclado con puzolana volcánica puede limitar su uso. También, este sustrato presenta problemas de porosidad y baja retención en comparación con el resto de sustratos, los cuales tienen valores más adecuados. Los sustratos a base de fibra de coco en 70%, 30% y el testigo (90%) presentaron las más bajas densidades propiedad ideal para sustratos que se pueden emplear en jardines verticales, tanto interiores como exteriores, debido a que su utilización podría mejorar significativamente la capacidad operacional del medio de cultivo y por ende, disminuir los costos por transporte y manipulación, también, reduce la menor carga estructural sobre la fachada, lo que es importante si se va a poner en un jardín vertical o incluso en una terraza vegetal. Mientras que si se trata de cubiertas o terrazas vegetales, se requieren materiales no muy ligeros que sostengan la vegetación, permanezcan estables ante el viento y que no sean una gran carga para el edificio o estructura donde se instale, por los que los sustratos RVC+PV y CPC+PV podrían ser adecuados para este sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), Estación Experimental El Encín por el uso de sus instalaciones y al personal técnico por su colaboración. También agradecen a Pons Agropecuaria y a Intemper Española. S.L. El trabajo fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) de España (Plan Nacional de Investigación: CTM2013-47874-C2-1-R).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAD, M., P. F. MARTÍNEZ, M. D. MARTÍNEZ, y J. MARTÍNEZ: Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo, *Actas de horticultura*, 11: 141–154, 1993.
- ABAD, M., P. NOGUERA, and S. BURÉS: National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain, *Bioresource technology*, ISSN: 0960-8524, E-ISSN: 1873-2976, 77(2): 197–200, 2001.
- ABAD, N. y C. CARRIÓN: Los sustratos en los cultivos sin suelo, pp. 113–158, *Tratado de cultivo sin suelo*, Mundi Prensa, 2004.
- AENDEKERK, T.G.L., H.CEVAT, N. DOLMANS, C. VAN ELDEREN, J. A. KIPP, C. DE KREIJ, and C. SONNEVELD: *International substrate manual*, 94pp., Doetinchem: Elsevier International Business, 2000.
- ALEXANDRI, E., and P. JONES: Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs

- on the built environment: Comparison with experimental results, *Building and Environment*, ISSN: 0360-1323, 42(8): 2835–2849, 2007.
- ANSORENA MINER, J: *Sustratos: propiedades y caracterización*, 172pp., Mundi Prensa, 1994.
- ARENAS, M., C.S. VAVRINA, J.A. CORNELL, J.A. HANLON, and G.J. HOCHMUTH: Coir as an alternative to peat in media for tomato transplant production, *HortScience*, ISSN: 0018-5345, 37(2): 309–312, 2002..
- DE BOODT M., VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* ISSN: 0567-7572, 26:37-44, 1972.
- DE BOODT, M., VERDONCK, O. and CAPPAERT, I. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticultura*, ISSN: 0567-7572., 37: 2054-2062. 1974.
- EVANS, M. R., S. KONDURU, and R. H. STAMPS: Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. American Society for Horticultural Science, *HortScience*, ISSN: 0018-5345, 31(6): 965–967, 1996.
- GEDGE, D., and G. KADAS: Green roofs and biodiversity, *Biologist*, 52(3): 161–169, 2005.
- GRACESON, A., J. MONAGHAN, and N. HALL: The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering*, ISSN: 0925-8574, 61, Part A(0): 328–334, 2013.
- GRACESON, A., J. MONAGHAN, N. HALL, and M. HARE: Plant growth responses to different growing media for green roofs, *Ecological Engineering*, ISSN: 0925-8574, 69(0): 196–200, 2014.
- HANDRECK, K.A. Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Comm. Soil Sci. Plant Anal* 14: 209-222, 1983.
- HAVIS, J. R., and W.W. HAMILTON: Physical properties of container media., *Journal of Arboriculture*, 2(7): ISSN: 0278-5226, 139–140, 1976.
- JAYASINGHE, G.Y. Sugarcane bagasses sewage sludge compost as a plantgrowth substrate and an option for waste management. *Clean Technol. Environ. Policy*, ISSN: 1618-954X, 14: 625–632, 2010.
- JAYASINGHE, G.Y. Synthetic soil aggregates as a potting medium for ornamental plant production. *J. Plant Nutr.* ISSN: 0190-4167, 35: 1441–1456, 2012.
- KONDURU, S., M. R. EVANS, and R. H. STAMPS: Coconut husk and processing effects on chemical and physical properties of coconut coir dust, *HortScience*, ISSN: 0018-5345, 34(1): 88–90, 1999.
- MAAS, J., R. A. VERHEIJ, P. P. GROENEWEGEN, S. DE VRIES, and P. SPREEUWENBERG: Green space, urbanity, and health: how strong is the relation? *Journal of epidemiology and community health*, ISSN: 0143-005X, 60(7): 587–592, 2006.
- MACIVOR, J. S., and J. LUNDHOLM: Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats, *Urban Ecosystems*, ISSN: 1083-8155, 14(2): 225–241, 2011.
- MARTÍNEZ J. Physical and chemical properties of coir waste and their relation to plant growth. *Acta Hort.* ISSN: ISSN: 0567-7572, 450, 365-374, 1997.
- MASAGUER, A., LÓPEZ-FABAL, A., CARMONA-CHIARA, E., FORNÉS-SEBASTIÁ, F., ORDOVÁS-ASCASO, J., GÓMEZ-SÁNCHEZ, M. A., MORENO-AGUIRRE, M. T., MARFÁ-PAGÈS, O., CÁCERES-REYES, R., LÓPEZ-NÚÑEZ, R. y BELDA, R. Uso del compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor. Tomo 2. In: Recursos Orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales. Vol.III. Mundi Prensa, España. 244pp. 2015.
- NOGUERA, P., ABAD, M., NOGUERA, V., PUCHADES, R., M ISSN: AQUIEIRA, A. Coconut coir waste, a new and viable ecologically friendly peat substitute. *Acta Hort.* ISSN: ISSN: 0567-7572, 517: 279-286, 2000.
- NOGUERA, P., M. ABAD, R. PUCHADES, A. MAQUEIRA, y NOGUERA, V. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, ISSN: 0010-3624, 34:593–605, 2003.
- PUUSTJARVI, V., and R.A. ROBERTSON: *Physical and chemical properties: Peat in Horticulture*, DW Robinson and J. GD Lamb, eds. Academic Press, New York, pp.23–28, 1975.
- RAVIV, M., Y. CHEN, and Y. INBAR: Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants, *The role of organic matter in modern agriculture*, 25: 257, 1986.
- RAVIV, M., S. TARRE, Z. GELER, and G. SHELEF: Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting, *Biological Wastes*, 19(4): 309–318, 1987.
- RICHARDS, D., LANE, M., BEARDSELL, D.V. The influence of particle-size distribution in pine bark: sand: brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Sci. Hort.* 29:1-14, 1986.
- ROBERTSON, R. A: Peat, horticulture and environment, *Biodiversity and Conservation*, 2(5): 541–547, 1993.
- TAPIA, P. V., J.Z.C. RAMOS, P.S. GARCÍA, L. TIJERINA, R. M. CHÁVEZ, L. ROMERO, and J.L.O. and J.L.O. ARREDONDO: Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista fitotecnia mexicana*, ISSN:3 0187-7380, 1(4): 375–381, 2008.
- WHITE, E.V., and B. GATERSLEBEN: Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty? *Journal of environmental psychology*, ISSN: 0272-4944, 31(1): 89–98, 2011.

Recibido: 24/09/2015.

Aprobado: 30/11/2016.

Glenny López-Rodríguez, Ing. Agr. Estudiante doctorado, Programa en Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Agraria. Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense, 28040, Madrid, España, Móvil: +34 608 146 854. Correo electrónico: gaviotaomr@hotmail.com

Javier Pérez-Esteban, Correo electrónico: jpereze@madrid.uned.es

Juan Ruiz-Fernández, Correo electrónico: juan.ruiz.fernandez@madrid.org

Alberto Masaguer, Correo electrónico: alberto.masaguer@upm.es