

COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE SUSTRATOS EMPLEADOS EN CUBIERTAS AJARDINADAS

N. López-Lopez^{1*}, P. Calaza-Martínez², R.M. Pérez-Alborés³, A. López-Fabal¹

¹Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Campus universitario s/n. 27002-Lugo. e-mail: adolfo.lopez@usc.es

²Malvecin, S.L. Ingeniería del paisaje. Departamento I+D. Avda del Ejército 16, 1°C. 15006-La Coruña. e-mail: calaza@malvecin.es

³Maderas Pérez Giménez. Mañufe, s/n. 36388-Gondomar (Pontevedra). e-mail: rosaalbores@hotmail.com

RESUMEN. Se ensayaron 24 sustratos para uso en cubiertas ajardinadas extensivas, obtenidos por mezcla en distintas proporciones de materiales inorgánicos (arcilla expandida molida, arena volcánica, residuo de demolición, perlita y arena de sílice) y orgánicos (corteza de pino compostada, fibra de coco y compost de residuos orgánicos urbanos). Se determinaron propiedades físicas relacionadas con su comportamiento hídrico como porosidad total, máxima capacidad de agua, contenido de aire a pF 1,8 y las densidades en varios estados de humedad. Igualmente se llevó a cabo un ensayo en invernadero, siguiendo la evaporación del agua retenida tras el drenaje hasta la sequedad. Las densidades a máxima capacidad de agua y seca, determinadas en laboratorio, se correlacionaron bien con los estados inicial y final del ensayo de campo. Las distintas mezclas mostraron variabilidad tanto en la cantidad de agua retenida como en la velocidad a la que ésta se agota.

ABSTRACT. Twenty-four substrates were tested for use in extensive green roofs, obtained by mixing different proportions of inorganic materials (ground expanded clay, volcanic sand, demolition waste, perlite and silica sand) and organic (composted pine bark, coco fiber and compost of urban organic wastes). They were determined physical properties related to its water behaviour as total porosity, maximum water capacity, air content at pF 1.8 and densities in several states of moisture. A greenhouse test was conducted, following the evaporation of the water retained after drainage to dryness. The apparent density at maximum water capacity and dry were well correlated with the initial and final states of the field trial. The various mixtures showed variability in both the amount of water retained and the rate at which it was lost.

1.- Introducción

Antes de que el desarrollo humano comenzase a modificar los hábitats naturales, el suelo y la vegetación formaban parte de un ecosistema equilibrado en donde se lograba un balance ajustado de precipitación y de energía solar. En las áreas naturales, gran parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo o se devuelve a la atmósfera a través de la evapotranspiración, produciéndose una refrigeración que mitiga el exceso de carga solar; pero sin embargo, en las ciudades, la gran cantidad de superficie impermeable (edificios, carreteras, aparcamientos...) dificulta en gran

medida este equilibrio natural. Además, debido a dicha expansión urbanística, la necesidad de recuperar el espacio verde es cada vez un aspecto más crítico para poder mantener la calidad del medio ambiente en las ciudades. El establecimiento de material vegetal en las llamadas cubiertas verdes es un muy buen recurso para poder paliar este problema y que además reporta numerosos beneficios ecológicos y económicos entre los que destacan: la mejor gestión de las aguas pluviales, la conservación de la energía, la mejora de la calidad del aire, la mitigación del efecto “isla de calor” o la proporción de un entorno más estético y agradable en las urbes.

Las cubiertas verdes modernas pueden ser clasificadas en “intensivas” o “extensivas” dependiendo del material vegetal utilizado y del planteamiento de su uso. Las cubiertas verdes intensivas reciben este nombre debido a la necesidad de un intenso mantenimiento. Éstas están diseñadas de una forma similar a los jardines dispuestos sobre suelo natural, conteniendo una gran variedad de especies vegetales (Getter et al., 2006; Mentens et al., 2006). Por el contrario, las cubiertas verdes extensivas requieren un mantenimiento mínimo, y como además el espesor de la capa de sustrato es menor, éstas están más orientadas a otro tipo de vegetación más resistente y menos exigente, como especies de porte herbáceo, musgos o especies del género *Sedum*.

Entre las exigencias que debe cumplir un sustrato para cubiertas verdes extensivas se encuentra el bajo peso, mínima compactabilidad, alta permeabilidad, estructura estable y una actuación excelente a largo plazo (Lockett, 2009; Snodgrass et al., 2010).

Las cubiertas verdes extensivas no deberían contar con medios de cultivo con un elevado contenido en materia orgánica (Snodgrass et al., 2010). Ésta aporta características como retención de agua y capacidad de intercambio catiónico, pero se descompone fácilmente, disminuyendo el volumen y comprometiendo potencialmente el drenaje (Friedrich, 2005). Para la mayoría de los casos, el porcentaje de materia orgánica no debe superar el 20% en volumen para las cubiertas verdes extensivas establecidas a finales del verano o en el otoño y un 10% sería suficiente para cubiertas establecidas en primavera (Snodgrass et al., 2010). Para cuando las plantas se hayan establecido, un sistema de cubierta verde estable y saludable no debería de contener más de un 2-5% de materia orgánica en peso (Beattie et al., 2004).

Entre los materiales inorgánicos más comúnmente

utilizados en cubiertas verdes se incluyen los esquistos, arcilla expandida, pumita volcánica, escorias, trozos de teja rota, arena o arcilla cocida (Luckett 2009; Snodgrass et al., 2006). En cuanto a los materiales orgánicos existe una multitud de posibilidades; por ejemplo compost, turbas, cortezas envejecidas etc. (Luckett, 2009).

El uso de compost como componente del medio de cultivo en una cubierta verde extensiva se trata de una elección muy factible siempre y cuando provenga de una fuente segura. Entre los materiales usados se incluyen residuos animales compostados y lodos de depuradora, vermicompost y restos de sustratos empleados en el cultivo del champiñón (Snodgrass et al., 2010). Los compost que incluyen lodos de depuradora deben ser usados con precaución, no sólo porque su distribución de partículas tan fina pueda perjudicar la porosidad sino también por poder contener metales pesados y patógenos (Friedrich, 2005).

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento hídrico de diferentes mezclas de materiales inorgánicos y orgánicos de cara a su uso como medio de cultivo en cubiertas verdes extensivas, en relación a su capacidad de retención del agua de lluvia y su posterior disponibilidad para la cubierta vegetal. Para ello se compararon las principales características físicas determinadas en laboratorio con su comportamiento en condiciones de servicio.

2.- Material

Se elaboraron mezclas de diferentes materiales de naturaleza mineral y orgánica. Se partió de la selección de materiales inorgánicos, dado el requerimiento de que el sustrato final tenga un alto contenido mineral que le confiera estabilidad a largo plazo. Se utilizaron arcilla expandida (arilita) molida (AR), arena volcánica (AV), residuo de demolición (RD) destinado a uso como árido reciclado, perlita (PE) y arena de sílice (AS).

Para completar las mezclas, a los componentes minerales anteriores se le añadieron algunos materiales orgánicos, que tienen la función de contribuir a la retención de agua, aportar CIC y poder tampón, así como nutrientes, al menos durante la fase de establecimiento de la vegetación. Atendiendo al interés del reciclaje de residuos y a la reducción del uso de materiales no renovables todos los componentes orgánicos seleccionados fueron obtenidos a partir de materiales residuales. Por su estabilidad y resistencia a la degradación se decidió usar corteza de pino compostada (P) y fibra de coco (mezcla de turba de coco, fibra y chips) (C). Además se decidió utilizar un compost (Comp) de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) como fuente de nutrientes.

Las mezclas se definieron a partir de la fracción en volumen de sus componentes, como quedan reflejadas en la Tabla 1. Los criterios para el diseño de las mezclas fueron:

- cada tratamiento se realizó con un material inorgánico de base, excepto en el caso de la

arena de sílice, que se utiliza únicamente en combinación con perlita,

- la arcilla expandida, la arena volcánica y el residuo de demolición se emplearon en las mezclas al 90, 75 y 60 % (v/v). Por su parte la perlita presenta riesgos de pérdida por viento o lluvia y de degradación física que desaconsejan utilizarlas en proporciones elevadas, por lo que se utilizó sola únicamente al 60 % (v/v) y además al 30 % mezclada con otro 30 % de arena de sílice,
- todas las mezclas incluyeron un 10 % (v/v) de compost de FORSU como aporte moderado de nutrientes que se harán disponibles progresivamente y
- tras la mezcla del material inorgánico con el compost de FORSU, la fracción restante (15 % o 30 %) se cubrió con corteza de pino o coco; además cuando faltaba por cubrir el 30% también se incluye la combinación corteza de pino y coco cada uno al 15%.

Tabla 1. Composición (% v/v) de las mezclas ensayadas. AR = arcilla expandida molida 0-4 mm; AV = arena volcánica 0-6 mm; C = coco (turba + fibra + chips); P = compost de corteza de pino 0-8 mm; Comp = compost de FORSU

Mezcla	AR	AV	RD	AS	PE	C	P	Comp
AR90	90							10
AR75C	75					15		10
AR75P	75						15	10
AR60C	60					30		10
AR60CP	60					15	15	10
AR60P	60						30	10
AV90		90						10
AV75C		75				15		10
AV75P		75					15	10
AV60C		60				30		10
AV60CP		60				15	15	10
AV60P		60					30	10
RD90			90					10
RD75C			75			15		10
RD75P			75				15	10
RD60C			60			30		10
RD60P			60			15	15	10
RD60CP			60				30	10
PE.C					60	30		10
PE.CP					60	15	15	10
PE.P					60		30	10
PE.AS.C				30	30	30		10
PE.AS.CP				30	30	15	15	10
PE.AS.P				30	30		30	10

3.- Métodos

3.1.- Caracterización de los materiales y las mezclas

Las principales características físicas relacionadas con el comportamiento hídrico tanto de los materiales de partida como las mezclas, fueron medidos según el protocolo del FLL (2008), conjuntamente con las correspondientes normas UNE-EN referentes a “mejoradores de suelo y sustratos de cultivo”.

Siguiendo las indicaciones específicas de la normativa alemana (FLL, 2008), tras introducir una muestra de 2100-2500 mL en un cilindro de base perforada y compactarla golpeándola 6 veces con un martillo proctor (DIN 18127) se obtuvo la densidad aparente en húmedo (Cf). La muestra así compactada se saturó por inmersión en agua durante 24 h y se dejó drenar libremente para obtener el estado de “máxima capacidad de agua”, en el que se determina la densidad aparente a la máxima capacidad de agua (p_{wk}). Tras secado de la muestra a 105°C se obtuvo la densidad aparente seca (p_t) y por diferencia con la anterior el valor de la máxima capacidad de agua (W_{Kmax}).

La retención de humedad a pF 1,8 (6.3 kPa) se determinó en caja de arena (De Boodt et al., 1974). La densidad de partícula (PD) (densidad real) se determinó a partir del contenido de materia orgánica y cenizas (UNE- EN 13041). El volumen de la porosidad total se obtuvo a partir de las densidades de partícula y la aparente seca (UNE-EN 13041).

3.2.- Ensayo de evaporación

Para llevar a cabo el ensayo de drenaje y secado se reprodujo la capa de sustrato de una cubierta verde sobre una capa de geotextil y con drenaje libre. Para ello se usaron cajas de poliestireno expandido (Fig. 1) de 48 x 28.5 x 10.5 cm de dimensiones interiores con los bordes laterales cortados en forma de bisel para limitar la entrada de agua de lluvia y dotadas de un orificio inferior de drenaje. En el interior de esas cajas se colocaron 5 soportes cilíndricos de 5 cm de altura sobre los que se apoyó una malla metálica de alambre de 1,4 mm de diámetro y de 2.5 x 2.5 cm de luz, cubierta a su vez por una lámina de geotextil (Terram 700, FosRoc Euco S.A.) compuesto de un núcleo de polipropileno (70 %) y un recubrimiento de polietileno (30 %). Sobre la lámina de geotextil se colocaron 6.84 L de una de las mezclas a ensayar, equivalentes a una capa de 5 cm de espesor. Se llevaron a cabo 3 réplicas por material, que se dispusieron de forma aleatoria en mesas de un invernadero de cristal en Lugo (Fig. 2), en el mes de agosto de 2011

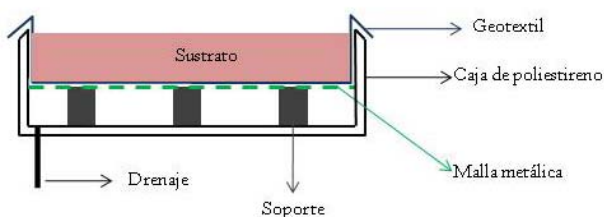


Fig. 1. Esquema de las cajas de poliestireno expandido con el sustrato



Fig. 2. Disposición de las cajas con los distintos sustratos en las mesas del invernadero.

Las muestras fueron regadas abundantemente durante 2 días y tras el último riego se taparon para evitar la evaporación, controlando la pérdida por drenaje pesando a las 2, 6, 12 h, 1, 2, 3 y 4 días. Después de cuatro días el drenaje prácticamente había desaparecido en todas las cajas, por lo que se destaparon y se dejó evaporar el agua, contabilizando el volumen de los drenajes que aún se producían. La fase de evaporación duró 64 días, hasta que el peso de todas las cajas dejó de bajar, lo que indicó el secado al aire del material. La pérdida de peso se controló diariamente los primeros 20 días y luego cada 2-3 días.

4.- Resultados y discusión

4.1.- Caracterización de los materiales iniciales.

Las principales características físicas determinadas en laboratorio sobre los materiales base de las mezclas se muestran en la Tabla 2. Los materiales con una porosidad total más elevada fueron la fibra de coco (C), la perlita (PE) y la corteza de pino (P), seguidas del compost de RSU (Comp). La perlita también presenta un alto contenido de aire a máxima capacidad de agua (W_{kmax}) seguida del residuo de demolición, lo que indica una importante fracción de porosidad muy gruesa y que se puede relacionar con una permeabilidad muy alta. La arena de sílice (AS) fue el material más pesado seguido de la arena volcánica (AV), del árido reciclado (RD) y luego de la arlita (AR), como así demuestran cualquiera de los dos parámetros de densidad aparente.

El contenido de humedad a “máxima capacidad de agua” es más alto en los materiales orgánicos que en minerales, siendo la corteza de pino compostada (P) la de mayor retención. Entre los productos de naturaleza mineral la arcilla expandida (AR) es la que más retiene y el residuo de demolición (RD) el que menos. Por su parte la diferencia entre la porosidad total y el aire a pF 1.8 representa el agua retenida a esa succión, que es la reserva de agua a un plazo más largo. Esta fue mayor en la corteza de pino y el compost de residuos, seguidos de la fibra de coco y la arcilla expandida; mientras que los demás materiales inorgánicos presentaron valores bastante más bajos.

Tabla 2. Caracterización de los principales parámetros físicos determinados en los materiales de partida: media y desviación típica (entre paréntesis); comparación con los valores de referencia de la FLL (2008). PT = porosidad total (%v/v), Wkmax = máxima capacidad de agua (%v/v); aire a Wkmax = contenido de aire a máxima capacidad de agua (%v/v); aire a pF 1.8 = contenido de aire (%v/v) bajo succión de 6.3 kPa; ρ_t = densidad aparente seca (g/cm³), Cf = densidad en húmedo (g/cm³); ρ_{wk} = densidad a máxima capacidad de agua (g/cm³).

	PT	Wkmax	Aire a Wkmax	Aire a pF 1.8	ρ_t	Cf	ρ_{wk}
AR	67.47 (1.58)	45.02 (2.11)	22.46 (3.48)	49.21 (5.21)	0.86 (0.04)	0.93 (0.03)	1.31 (0.06)
AV	48.32 (1.8)	39.35 (4.11)	8.97 (2.93)	36.04 (0.82)	1.37 (0.05)	1.47 (0.01)	1.76 (0.03)
RD	57.18 (0.42)	20.54 (1.11)	36.64 (1.38)	44.27 (1.17)	1.12 (0.01)	1.29 (0.02)	1.33 (0.02)
PE	93.45 (0.34)	35.34 (0.33)	58.11 (0.02)	76.7 (0.42)	0.17 (0.01)	0.38 (0.02)	0.53 (0.01)
AS	37.93 (3.39)	30.21 (2.08)	7.72 (2.67)	21.14 (1.89)	1.64 (0.09)	1.71 (0.08)	1.95 (0.08)
P	71.9 (10.51)	54.45 (0.17)	17.45 (9.11)	50.33 (2.77)	0.45 (0.17)	0.73 (0.03)	0.99 (0.03)
C	75.19 (5.17)	58.24 (0.18)	24.83 (1.32)	69.51 (2.11)	0.4 (0.08)	0.56 (0.03)	0.88 (0.05)
Comp	62.24 (1.23)	45.64 (0.02)	16.6 (0.77)	43.71 (0.71)	0.72 (0.02)	0.84 (0.06)	1.18 (0.01)
FLL		35-65	≥10	≥20			

En relación a las características deseables según el criterio de la FLL (2008), la capacidad de retención de agua del residuo de demolición resultó insuficiente (<35%); mientras que las arenas volcánica y de sílice presentaron una aireación algo escasa a máxima capacidad de agua (Wkmax) lo que indica menor capacidad de drenaje y mayor posibilidad de encharcamiento.

4.2.- Caracterización de las mezclas.

En la Tabla 3 se muestran los valores de los parámetros físicos definidos encontrados en las diferentes mezclas ensayadas. Todas las mezclas a base de arcilla expandida (AR) presentaron buenas propiedades y concretamente cumplieron todos los criterios marcados por la FLL (2008), resultando por tanto un material muy adecuado y versátil para este uso. En general todas las mezclas presentaron una densidad aparente baja, que se redujo ligeramente al aumentar la proporción de orgánicos. La porosidad fue elevada y a máxima capacidad de agua presentaron buena retención de humedad pero también suficiente aireación. A pF 1.8 la aireación fue buena e incluso alta; en ese estado retuvo entre un 25-30 % de humedad, más cuanto mayor proporción de orgánicos, pero que nunca fue inferior a la registrada en mezclas a partir de otros materiales.

En general la adición de componentes orgánicos y sobre todo fibra de coco a las mezclas de arlita hizo aumentar la porosidad total y la máxima capacidad de agua, disminuyendo el aire disponible en estas condiciones, pero sin llegar nunca a ser limitante. Se podría decir entonces

que los materiales orgánicos, y sobre todo la fibra de coco, confirieron a las mezclas de arlita un ligero incremento de la porosidad, pero sobre todo una redistribución de tal porosidad.

Las mezclas formuladas a base de arena volcánica (AV) mostraron una densidad relativamente elevada que se redujo ligeramente en las de mayor contenido orgánico, sobre todo cuando se le añadió fibra de coco. La porosidad fue sólo moderada, aumentando en las de mayor fracción orgánica. La retención de agua a máxima capacidad de agua fue buena, comparable a la de otras mezclas, lo que junto a la limitada porosidad dio lugar a que la aireación a máxima capacidad de agua (aire a WKmax) resultó inferior al valor óptimo de 10 %v/v), exceptuando la mezcla AV60_P cuyo contenido en aire a WKmax fue suficiente. Esta circunstancia de las mezclas, que reproducen la limitación que ya presentaba el material de partida, puede resultar sin duda limitante, impidiendo un rápido drenaje en condiciones de elevada precipitación y en consecuencia favoreciendo el encharcamiento y el sobrepeso en la cubierta. Igualmente al material de partida, la aireación a pF 1,8 no resultó limitante sino buena. Una posible solución sería la utilización de arena volcánica de mayor granulometría, que aumentaría la porosidad total y sobre todo la fracción más gruesa.

En las mezclas formuladas a base de residuo de demolición (RD) el tamaño de partícula del material de partida en general confirió a las mezclas un bajo valor de máxima capacidad de agua (WKmax), limitación que se ve atenuada con la adición de componentes orgánicos. La máxima capacidad de agua en las mezclas al 90 %v/v resultó insuficiente respecto del criterio FLL. Por todo lo anterior el uso del árido reciclado aquí ensayado debería limitarse a mezclas con las mayores proporciones de materiales orgánicos.

Por su parte en las mezclas formuladas a partir de perlita (PE) hubo diferencias claras entre las que la incluyeron como único componente mineral al 60 %v/v de aquellas en las que se hizo la sustitución parcial de la misma por arena de sílice (AS). Las que tuvieron sólo perlita, independientemente del material orgánico que la acompañó, presentaron una densidad muy baja y una porosidad muy elevada, que las distinguieron de todas las demás mezclas ensayadas. La elevada porosidad les permitió, además, presentar valores significativamente altos simultáneamente de agua y de aire en situación de máxima capacidad de agua. Igualmente los valores de aireación a pF 1.8 fueron los mayores registrados y al tiempo también los más altos de aire que más alto presentaron elevada capacidad máxima de agua.

La sustitución parcial de la perlita por la arena de sílice (mezclas PE.AS) hizo que se atenuaran los valores extremos de los anteriores parámetros llevándolos a rangos más parecidos a los de otras mezclas: aumentó la densidad, se redujo la porosidad total, la máxima capacidad de agua y la aireación en los dos puntos considerados.

Tabla 3. Caracterización de los principales parámetros físicos determinados en las mezclas: media y desviación típica (entre paréntesis); comparación con los valores de referencia de la FLL (2008). PT = porosidad total (%v/v), Wkmax = máxima capacidad de agua (%v/v); aire a Wkmax = contenido de aire a máxima capacidad de agua (%v/v); aire a pF 1.8 = contenido de aire (%v/v) bajo succión de 6.3 kPa; ρ_t = densidad aparente seca (g/cm^3), Cf = densidad en húmedo (g/cm^3); pwk = densidad a máxima capacidad de agua (g/cm^3).

	PT	Wkmax	Aire a Wkmax	Aire a pF 1.8	ρ_t	Cf	pwk
AR90	69.42 (2.03)	45.77 (3.65)	23.65 (5.65)	49.02 (0.80)	0.79 (0.05)	0.87 (0.03)	1.25 (0.09)
AR75C	73.66 (2.07)	44.86 (1.24)	28.80 (0.88)	50.07 (1.33)	0.67 (0.05)	0.73 (0.06)	1.12 (0.04)
AR75P	71.47 (1.35)	46.08 (8.04)	25.39 (6.74)	50.02 (2.63)	0.71 (0.03)	0.82 (0.06)	1.17 (0.05)
AR60C	79.23 (0.32)	59.61 (0.61)	19.62 (0.4)	52.98 (1.77)	0.52 (0.01)	0.61 (0.01)	1.12 (0.00)
AR60CP	76.70 (4.15)	58.28 (3.75)	20.81 (4.14)	49.57 (2.88)	0.57 (0.1)	0.63 (0.05)	1.23 (0.24)
AR60P	71.01 (0.36)	45.54 (1.65)	25.47 (1.95)	46.63 (0.54)	0.70 (0.01)	0.89 (0.05)	1.15 (0.02)
AV90	51.79 (0.70)	48.83 (2.07)	3.10 (2.45)	34.46 (1.45)	1.26 (0.02)	1.28 (0.16)	1.75 (0.02)
AV75C	60.83 (3.34)	56.39 (2.09)	3.82 (0.89)	37.93 (5.88)	1.02 (0.09)	1.25 (0.07)	1.58 (0.07)
AV75P	56.41 (1.74)	45.19 (5.87)	9.12 (2.78)	36.30 (1.18)	1.12 (0.04)	1.39 (0.04)	1.57 (0.01)
AV60C	64.10 (0.66)	57.48 (0.13)	6.30 (0.76)	44.11 (1.86)	0.92 (0.02)	1.09 (0.02)	1.49 (0.02)
AV60CP	63.48 (0.81)	54.89 (0.33)	8.92 (0.4)	43.56 (2.99)	0.92 (0.02)	1.07 (0.02)	1.47 (0.02)
AV60P	61.09 (1.99)	48.95 (1.13)	13.29 (1.19)	37.94 (0.91)	0.97 (0.05)	1.14 (0.06)	1.46 (0.05)
RD90	55.53 (0.89)	26.89 (0.28)	28.64 (0.68)	39.14 (2.47)	1.15 (0.02)	1.27 (0.02)	1.42 (0.02)
RD75C	58.07 (1.13)	39.10 (1.46)	18.97 (1.78)	40.93 (0.48)	1.08 (0.03)	1.26 (0.03)	1.47 (0.03)
RD75P	59.22 (2.98)	39.28 (5.06)	19.94 (2.22)	36.15 (1.10)	1.04 (0.08)	1.27 (0.01)	1.43 (0.03)
RD60C	58.18 (3.56)	43.01 (3.81)	15.17 (3.65)	46.53 (0.73)	1.06 (0.09)	1.24 (0.09)	1.49 (0.08)
RD60CP	59.58 (2.7)	41.69 (4.89)	17.89 (2.23)	41.26 (0.39)	0.99 (0.07)	1.23 (0.05)	1.41 (0.02)
RD60P	61.69 (0.63)	44.44 (3.01)	17.26 (3.52)	39.29 (0.39)	0.96 (0.02)	1.18 (0.01)	1.40 (0.04)
PE.C	89.82 (4.69)	59.46 (3.57)	38.10 (5.38)	67.42 (3.27)	0.17 (0.01)	0.26 (0.03)	0.74 (0.01)
PE.CP	88.89 (2.53)	62.09 (1.47)	34.21 (9.00)	63.54 (3.65)	0.21 (0.01)	0.36 (0.06)	0.80 (0.06)
PE.P	88.16 (0.17)	56.56 (2.99)	31.94 (3.58)	64.70 (1.92)	0.23 (0.01)	0.43 (0.09)	0.79 (0.04)
PE.AS.C	69.26 (0.26)	39.85 (1.35)	29.41 (1.60)	49.49 (0.61)	0.78 (0.01)	0.89 (0.00)	1.18 (0.02)
PE.AS.CP	71.69 (2.1)	52.16 (0.98)	19.53 (1.48)	47.63 (3.45)	0.70 (0.05)	0.90 (0.05)	1.22 (0.04)
PE.AS.P	67.82 (3.13)	47.91 (3.00)	22.98 (4.53)	48.12 (2.28)	0.81 (0.08)	0.97 (0.09)	1.24 (0.05)
FLL		35-65	≥ 10	≥ 20			

Sin embargo no se perdieron de todo las características de la perlita, ya que las mezclas con perlita y arena de sílice fueron aun moderadamente ligeras y porosas, y sobre todo presentaron buena aireación tanto a máxima capacidad de agua como a pF 1,8. A pesar de las diferencias observadas entre las mezclas de perlita con y sin arena de sílice, todas ellas cumplieron todos los requerimientos físicos de la FLL (2008), puesto que los valores extremos registrados lo fueron en el sentido no limitante.

Aunque presentaron características variadas, en general las mezclas ensayadas respondieron bastante bien a los requerimientos físicos para el uso de sustrato de cubierta verde extensiva, tomando como referencia los criterios de la norma alemana (FLL, 2008). Sólo las formulaciones con elevadas proporciones de arena volcánica presentaron limitaciones de aireación y las alto contenido de residuo de demolición adolecieron de baja retención de agua y excesiva permeabilidad.

Desde el punto de vista físico la inclusión de materiales orgánicos, fibra de coco o corteza de pino, en proporciones crecientes amortiguó los valores extremos que presentaron los materiales inorgánicos de base y permitió superar aquellos que resultaron limitantes. Más allá del aumento más o menos marcado de la máxima capacidad de agua, no se pueden establecer líneas generales del efecto de la adición creciente de fibra de coco o corteza de pino a los diferentes materiales inorgánicos de base, ya que la interacción entre ellos fue diferente y no siempre siguió pautas claras. Esta interacción no predecible entre componentes es frecuente en mezclas para sustratos y es responsable de que no se puedan prever las características físicas de una mezcla a partir de las de sus componentes, lo que obliga a la caracterización de las mismas.

A partir de los valores de las densidades seca (ρ_t) y a máxima capacidad de agua (pwk), se hizo el cálculo de la carga adicional que sobre la estructura de la cubierta supone el sustrato en ese estado de humedad, expresando el peso por unidad de superficie para una capa de sustrato húmeda de 5 cm de espesor, que es el mínimo que se recomienda utilizar (Fig. 3). Dado que no hubo grandes diferencias en la máxima capacidad entre las diferentes mezclas, las diferencias en las cargas se debieron principalmente a la densidad seca de los materiales sólidos utilizados, en las que si hubo distinciones importantes. Sin embargo estas diferencias quedaron atenuadas al considerar también el agua retenida. Las mezclas que contenían arena volcánica son las que impusieron mayores cargas debido a la mayor densidad de ésta. Cuando se utilizó un 90 % de este material inorgánico la carga alcanzó los 90 kg m^{-2} , disminuyendo a medida que se aumentó la proporción de materiales orgánicos, pero en todo caso se mantuvo siempre por encima de 75 kg m^{-2} . La arlita, con menor densidad aparente seca que la arena volcánica, permitió obtener cargas que rondaron los 60 kg m^{-2} . El árido reciclado con un peso seco de material muy similar al de la arena volcánica (75 kg m^{-2}) acumuló carga total ligeramente menor debido a la menor capacidad de

retener agua. Además, las distintas mezclas a base de este material prácticamente no presentaron diferencias, ya que el aligeramiento del peso seco debido a la inclusión de materiales orgánicos fue compensado por la mayor retención de humedad a máxima capacidad de agua que éstos también generaron. Por su parte la perlita fue el material más ligero con diferencia, que cuando se utilizó en la mayor proporción de las ensayadas (60 %) permitió que la carga bajase incluso de los 40 kg m⁻², de los que sólo aproximadamente un tercio correspondieron a la mezcla seca y los dos tercios restantes al agua retenida. Cuando con la perlita se incluyó arena de sílice, la alta densidad de ésta hizo que la ventaja comparativa de la perlita se perdiera en parte y esas mezclas impusieron cargas que rondaron los 60 kg m⁻², comparables a las de arcilla expandida.

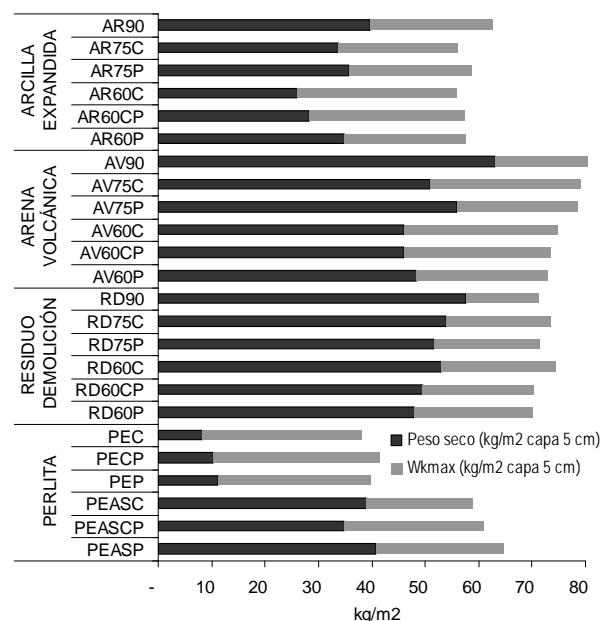


Fig. 3. Carga (kg/m²) que supone sobre la cubierta una capa de 5 cm de material en estado de “máxima capacidad de agua”, distinguiendo el peso del agua retenida del peso seco del material sólido.

4.3.- Ensayo de evaporación.

Los datos obtenidos del seguimiento del drenaje mostraron una importante variabilidad que no permitió obtener pautas claras que permitieran un análisis adecuado. Por su parte un resumen de la situación inicial y final del ensayo de evaporación se expone en la Tabla 4, mientras que en la Fig. 7 se muestra la evolución de la pérdida de agua en las muestras a lo largo de todo el tiempo del ensayo.

Los pesos de material húmedo al inicio del ensayo y seco al final del mismo reprodujeron bastante bien lo observado en las medidas de laboratorio con las densidades a máxima capacidad de agua (pwk) y seca (pt). De hecho estas dos determinaciones de laboratorio pueden utilizarse como buenos estimadores del comportamiento del material en la cubierta, dados los buenos coeficientes de regresión lineal obtenidos para un modelo y=ax (Fig. 4 y 5). Hay que notar,

sin embargo, que la pendiente de ambas ecuaciones lineales es significativamente menor de la unidad, lo que indica que la magnitud de los valores obtenidos en laboratorio es bastante mayor que lo obtenido en el ensayo de campo. Esto debe relacionarse con el grado de compactación al que se someten las muestras para las determinaciones de laboratorio, que no se alcanza con el asentamiento del material en el manejo normal del mismo, al menos en el tiempo del ensayo y sin haber estado sometido a presiones debidas al pisoteo o la circulación de maquinaria, que si podrían existir puntualmente en las cubiertas.

Tabla 4. Ensayo de evaporación: pesos (g cm⁻³) del material mojado al final del drenaje e inicio del ensayo de evaporación, del material seco al final de la evaporación y del agua evaporada total. Media ± desviación típica

	Inicio evaporación	Fin evaporación	Agua evaporada
AR90	0.871±0.039	0.510±0.007	0.361±0.043
AR75C	0.763±0.053	0.425±0.018	0.338±0.060
AR75P	0.794±0.028	0.436±0.011	0.357±0.036
AR60C	0.735±0.064	0.357±0.010	0.378±0.054
AR60CP	0.779±0.051	0.364±0.034	0.415±0.034
AR60P	0.780±0.025	0.392±0.012	0.388±0.018
AV90	1.210±0.040	0.875±0.031	0.335±0.011
AV75C	1.098±0.029	0.728±0.014	0.370±0.015
AV75P	1.059±0.041	0.774±0.012	0.285±0.051
AV60C	1.013±0.044	0.583±0.034	0.430±0.012
AV60CP	0.896±0.085	0.559±0.100	0.337±0.020
AV60P	0.997±0.008	0.633±0.009	0.364±0.008
RD90	1.003±0.028	0.810±0.014	0.193±0.015
RD75C	0.973±0.018	0.705±0.010	0.268±0.008
RD75P	1.008±0.043	0.713±0.026	0.295±0.019
RD60C	0.925±0.019	0.617±0.001	0.309±0.019
RD60P	0.964±0.029	0.622±0.019	0.342±0.013
RD60CP	0.959±0.054	0.610±0.045	0.349±0.008
PE.C	0.521±0.016	0.085±0.001	0.435±0.016
PE.CP	0.383±0.025	0.105±0.002	0.278±0.023
PE.P	0.541±0.029	0.126±0.014	0.414±0.015
PE.AS.C	0.797±0.019	0.392±0.010	0.406±0.021
PE.AS.CP	0.798±0.018	0.404±0.025	0.394±0.008
PE.AS.P	0.696±0.043	0.454±0.035	0.241±0.023

Por su parte la cantidad de agua evaporada es una estimación de la reserva de agua del material que puede movilizarse, tanto para evaporación como para consumo por las plantas, siendo este último el mayor interés del mismo. Este parámetro se obtiene por diferencia de los anteriores, que a su vez estaban bien relacionados con determinaciones de laboratorio. Sin embargo, la estimación del agua perdida por evaporación mediante la diferencia de esas dos medidas de laboratorio no resulta satisfactoria, dado que la acumulación de dos errores lleva a una regresión poco fiable (Fig. 6).

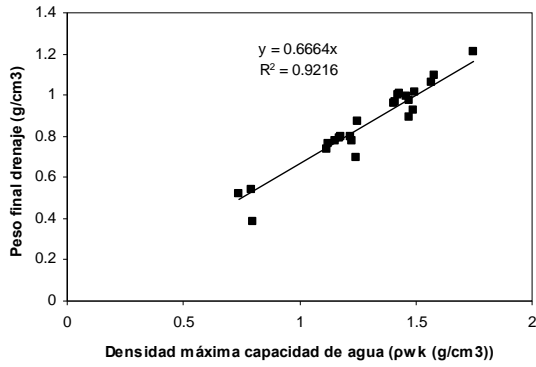


Fig. 4. Relación entre el peso del material húmedo al final del drenaje y la densidad a máxima capacidad de agua (pwk) medida en laboratorio.

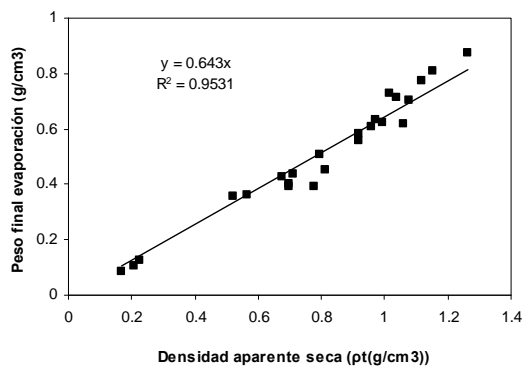


Fig. 5. Relación entre el peso del material seco al final de la evaporación y la densidad aparente seca (pt) medida en laboratorio.

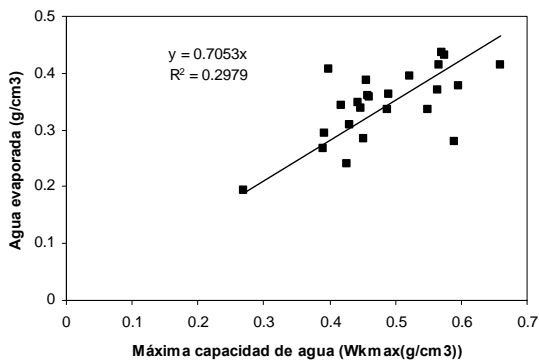


Fig. 6. Relación entre el agua perdida durante el ensayo de evaporación y la máxima capacidad de agua (Wkmax) determinada en laboratorio.

La cantidad de agua movilizada por evaporación durante el ensayo fue especialmente baja en las mezclas realizadas con altas proporciones de residuo de demolición (RD), pero la adición de fracción orgánica aumentó considerablemente esa cantidad, llegando a hacerla comparable a las de otros materiales. Por su parte, las mezclas con perlita fueron las que presentaron los mayores valores, mientras que las de arcilla expandida (AR) y arena volcánica (AV) tuvieron valores intermedios. Las diferencias fueron más marcadas

en las mezclas con altas proporciones de material mineral, y se fueron reduciendo con la inclusión de proporciones crecientes de materiales orgánicos.

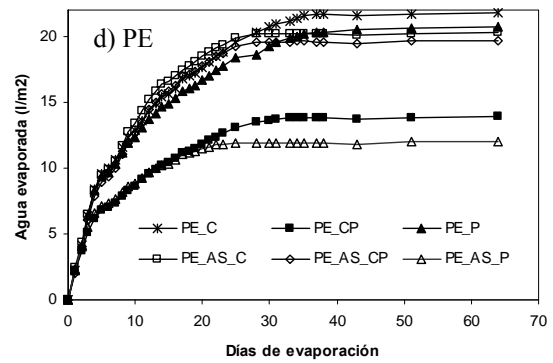
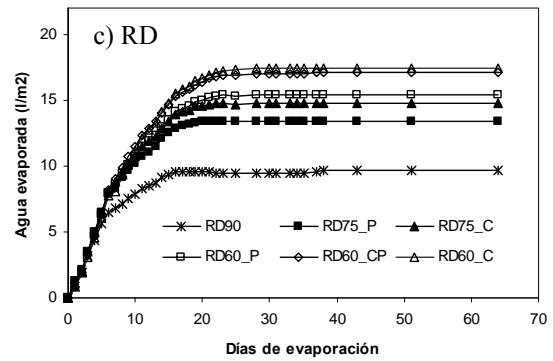
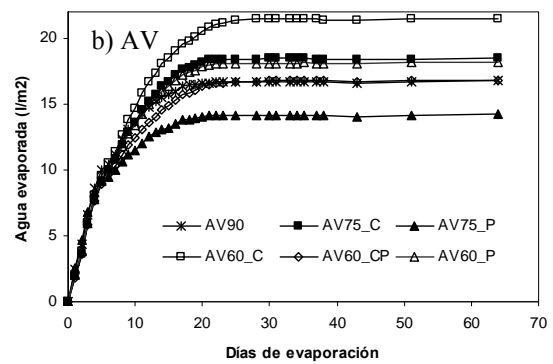
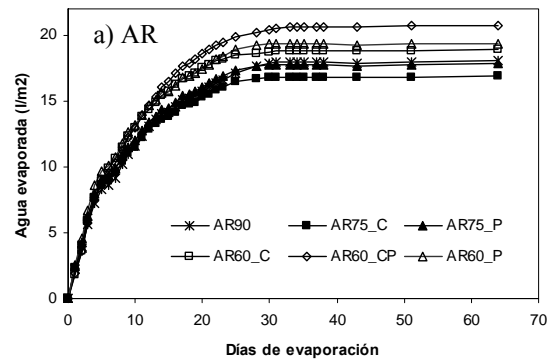


Fig. 7. Agua perdida durante el ensayo de evaporación en las mezclas realizadas a base de arcilla expandida (a), arena volcánica (b), residuo de demolición (c) y perlita (d).

Las mezclas con arcilla expandida mostraron cantidades elevadas de agua perdida durante el ensayo, incluso con las proporciones más altas de materia mineral (90 % y 75 %). Cuando la proporción mineral bajó al 60 % la retención de agua evaporable aumentó, sobre todo cuando se incluyeron simultáneamente corteza de pino y fibra de coco (AR_60CP). La pérdida por evaporación siguió una tendencia exponencial (Fig 7.a) y se completó entorno a los 30 días, de modo que a partir de ese momento prácticamente no había agua evaporable en estas mezclas.

Las mezclas con 90 % de arena volcánica (Fig. 7.b) presentaron una cantidad de agua evaporable sólo ligeramente inferior a las mismas de arcilla expandida. Sin embargo la pérdida de la misma fue bastante más rápida, pues se completó en tan solo 20 días, tras los cuales dejó de haber reserva de agua disponible.

La adición de materiales orgánicos en las mezclas con arena volcánica tuvo un efecto sensible; sobre todo cuando fue coco, que en las proporciones más altas generó un incremento significativo del contenido de agua evaporable y un retraso de su agotamiento hasta el día 25.

El residuo de demolición al 90 % presentó niveles de contenido de agua evaporable drásticamente más bajos que cualquier otra mezcla de cualquier material (Fig. 7.c), lo que sin duda debe relacionarse con la granulometría gruesa del mismo y práctica carencia de elementos finos. Además la evaporación se produjo intensamente hasta el agotamiento completo de la reserva de agua, que tuvo lugar antes de los 20 días. En este caso la sustitución de material inorgánico por orgánico tuvo una influencia drástica. Las mezclas al 60% presentaron contenidos comparables a las los de otros materiales; siendo el efecto más sensible el de la fibra de coco. El plazo para el agotamiento del agua se vio sólo ligeramente afectado pues siempre ocurrió antes de los 25 días.

Las mezclas con la mayor cantidad de perlita (60 %), independientemente del material orgánico que la acompañe, alcanzaron los valores más altos de contenido de agua evaporable del ensayo. (Fig. 7.d). Además, la pérdida de la misma fue más progresiva, de modo que se extiende prácticamente a 40 días, lo que permite disponibilidad de agua para la planta durante más tiempo. La sustitución de un 30 % por arena de sílice pareció no afectar al comportamiento de la mezcla cuando el material orgánico utilizado fue fibra de coco; pero si tuvo un efecto negativo cuando fue corteza de pino.

5.- Conclusiones

En general las mezclas ensayadas cumplieron los requerimientos físicos para el uso de sustrato de cubiertas verdes extensivas. Sólo aquellas con altas proporciones de arena volcánica presentaron limitaciones de aireación por la baja granulometría del material; y las de alto contenido en residuo de demolición escasa retención de agua.

Las composiciones a base de perlita presentaron densidades más bajas que las de arcilla expandida y éstas a su vez que las de residuo de demolición y de arena

volcánica. El aumento de la proporción de materiales orgánicos aligeró la densidad del sustrato seco, pero el efecto no fue tan claro en la carga de la capa de sustrato a máxima capacidad de agua, debido al incremento de la retención de agua

Las densidades a máxima capacidad de agua y seca, determinadas en laboratorio, se correlacionaron bien con los estados inicial y final del ensayo de campo.

Las distintas mezclas mostraron variabilidad tanto en la cantidad de agua retenida como en la velocidad a la que ésta se agota, que no estuvo directamente relacionada. Las composiciones con perlita fueron las que mantuvieron reserva de agua durante más tiempo, mientras que las de residuo de demolición la agotaron más rápidamente.

Agradecimientos. Los autores agradecen a Maderas Pérez Giménez, Malvecín S.L. y a la Xunta de Galicia la financiación de este trabajo como parte del proyecto "Desenvolvemento dun sistema de cubertas ecolóxicas adaptadas a Galicia" (10MRU004E)

6.- Bibliografía

- Alarcón, A., 2006. *Cultivos sin suelo*. Ed de Horticultura. Barcelona.
- Beattie, D. y R. Berghage., 2004. Green roof media characteristics: The basics. *Second annual greening rooftops for sustainable communities conferenc, Awards and Trade Show*; 2-4 June 2004, Portland, Oregon.
- Burés., S. 1997. *Sustratos*. Ed Agrotécnicas. Madrid
- De Boodt, M., O. Verdonck y I.Capaert,1974.Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37, 2054-2062.
- DIN-18127. Building Land. Testing soil samples. Proctor test. Normas DIN.
- FL, 2008. *Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing. Green roofing guideline*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
- Friedrich, C. R., 2005. Principles for selecting the proper components for a green roof growing media. *Proc. 3rd Intl. Green Roof Conf.: Greening roof-tops for sustainable communities.* 3, 262-274.
- Getter, K.L y D.B. Rowe, 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience.* 41(5), 1276-1285.
- Luckett, K. 2009. *Green roof construction and maintenance*. McGraw-Hill.
- Mentens, J., D. Raes y M. Henry, 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning.* 77, 217-226.
- Snodgrass, E.C. y L. McIntyre, 2010. *The green roof manual. A professional guide to desing installation, and maintenance*. Timber Press.
- UNE-EN-13041, 1999. Determinación de las propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Normas UNE.