

Mejora en la retención y distribución de agua en muros verdes usando materiales alternativos como medio de crecimiento

Improvement in the retention and distribution of water in green walls using alternative materials as a growing media

Rivas-Sánchez, Y.A.^{a1}, Moreno-Pérez, M.F.^{a2}, Roldán-Cañas, J.^{a3}

^aUniversity of Córdoba, Department of Agronomy, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba, Spain.
E-mail: ^{a1}z32risay@uco.es, ^{a2}mfatima@uco.es, ^{a3}jroldan@uco.es

Recibido: 23/02/2018

Aceptado: 30/05/2018

Publicado: 31/01/2019

Citar como: Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2019. Improvement in the retention and distribution of water in green walls using alternative materials as a growing media. *Ingeniería del agua*, 23(1), 19-31. <https://doi.org/10.4995/la.2019.9736>

RESUMEN

Este trabajo muestra como la fibra de coco mezclada con cascarilla de arroz es útil como medio de cultivo en muros verdes, reduciendo el impacto ambiental de la explotación de musgo *Sphagnum* a largo plazo. Por esto, se diseñó un prototipo de muros verdes para analizar la diferencia entre ambos sustratos. La escorrentía y la retención hídrica de los sustratos se analizaron mediante sensores de flujo y humedad. El sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco mostró mayor homogeneidad en la distribución del agua de riego que el musgo *Sphagnum*. Los análisis de clorofila mostraron diferencias estadísticamente significativas entre el material vegetal plantado en el sustrato de fibra de coco y cascarilla de arroz y en el de *Sphagnum*, pero no se encontraron diferencias en biomasa y en el contenido hídrico.

Palabras clave | *Sphagnum*; sustratos alternativos; Jardín vertical; Flujo de agua.

ABSTRACT

This work shows how coconut fiber mixed with rice husk is useful as a growing medium in green walls, reducing the environmental impact of the Sphagnum moss exploitation in the long term. For this, a prototype of green walls was designed to analyze the difference between both substrates. The runoff and the water retention of the substrates were analyzed by flow and humidity sensors. The substrate composed of rice husk and coconut fiber showed greater homogeneity in the distribution of irrigation water than Sphagnum moss. The chlorophyll analyzes showed statistically significant differences between the plant material planted in the coconut fiber substrate and rice husk than in the Sphagnum, but no differences were found in biomass and water content.

Key words | *Sphagnum*; alternative substrates; vertical gardens; water flow.

INTRODUCCIÓN

Los muros verdes pasivos se clasifican, generalmente en dos tipos de sistemas: modulares y continuos (Manso y Castro-Gomes, 2015). Los sistemas modulares son actualmente los más utilizados comercialmente debido a su fácil instalación y también a su aptitud para utilizar diferentes tipos de especies vegetales, pero estas requieren sustratos especiales como musgos o materiales sintéticos que exigen un mantenimiento regular (Safikhani *et al.*, 2014). Los sistemas modulares son, generalmente, cajas con una capa de vegetación establecida verticalmente. La mayoría de los muros verdes modulares basados en musgo *Sphagnum* como sustrato, son relativamente costosos de instalar en comparación con otros sistemas como los continuos. En los últimos años, se han realizados diferentes investigaciones sobre los muros verdes mostrando así algunas desventajas especialmente en los materiales utilizados en el medio de crecimiento debido a su alta carga ambiental (Ottelé *et al.*, 2011).

Desde el punto de vista paisajístico, la finalidad de los sustratos alternativos como medio de cultivo es producir una planta de calidad, reduciendo costes de producción y la carga ambiental. Por otro lado, la obtención y eliminación del sustrato, una vez utilizado, no debería provocar un impacto negativo sobre el medio ambiente.

Existe poca investigación sobre la diversidad de muros verdes en España. Actualmente, cuando existe la necesidad de establecer un muro verde por arquitectos o paisajistas, estos los instalan siguiendo razones no ecológicas, tales como recursos estéticos, la concesión de préstamos orientados al financiamiento de proyectos que promueven el uso sostenible de los recursos naturales renovables, esto es, los denominados préstamos verdes, así como por el valor económico. No los usan como aislamiento térmico o para reducir el agua de escorrentía, ya que las inundaciones están convirtiéndose en una problemática cada vez mayor debido a la impermeabilidad de las áreas urbanas (Francis y Lorimer, 2011). En estas condiciones, el sustrato de *Sphagnum* preparado en capas muy finas directamente sobre un soporte, es el habitualmente utilizado en muros verdes que, además, no permite ni la colonización vegetal natural ni la variedad ambiental. En los últimos años, los estudios se han concentrado en los beneficios económicos en vez de en la biodiversidad (Perini y Rosasco, 2013), pero, no obstante, estas investigaciones son vitales si los muros verdes se convirtieran en parte de la planificación y el desarrollo de las ciudades.

Así nace la necesidad de encontrar nuevos materiales alternativos reciclados que posean un impacto ambiental menor para una mayor sostenibilidad del medio ambiente, siendo pues el objetivo de este trabajo usar materiales alternativos tales como cascarilla de arroz, lana de roca y fibra de coco (Larcher *et al.*, 2013), los cuales han mostrado en los últimos años que poseen características fisicoquímicas similares a las de los materiales convencionales como el *Sphagnum* que es, además, un material costoso (Rose y Haase., 2000; Holman *et al.*, 2005). En este trabajo se analizarán estas alternativas sostenibles, rentables, de fácil adquisición, bajo coste y eficiencia ambiental para su uso como sustrato en muros verdes modulares en el mercado español.

En este estudio, se analizó la naturaleza del sustrato, que es la base de todo el sistema de muro verde. Se han elaborado normas para la industria del techo verde en Alemania, sin embargo, no existen normas especiales para los muros verdes en España y muchas de las normas utilizadas en el extranjero, siguiendo los estándares del Reino Unido, no siempre son compatibles con el mercado (FLL, 2002). Se ha publicado relativamente poco sobre sustratos alternativos para muros verdes, pues para conseguir un muro verde ambientalmente correcto, su sustrato debe ser adecuadamente caracterizado ya que es importante determinar si los materiales alternativos donde estará apoyada la vegetación, tendrán éxito en áreas con temperaturas extremas como el sur de España (Mickovski *et al.*, 2013). En este trabajo, se considerarán dos objetivos, en primer lugar, utilizar materiales alternativos como sustrato en las tecnologías de muros verdes en regiones cálidas del sur de España, y, en segundo lugar, comprobar que los sustratos reciclados son alternativas viables partiendo del estudio de las propiedades físicas, químicas y de los costes económicos (Molineux *et al.*, 2009).

Los diseñadores de muros verdes están buscando alternativas a muchos de los componentes tradicionales de los medios de cultivo, como el musgo *Sphagnum*. Debido a que los costos de transporte son un factor importante en el costo de los medios de cultivo, los diseñadores deben considerar más componentes locales, incluyendo la fibra de coco y la cascarilla de arroz.

Para ello, se diseñó un prototipo de muros verdes para analizar la diferencia entre sustratos alternativos eco-compatibles, como la cascarilla de arroz mezclada con cascara de coco de acuerdo a trabajos preliminares donde se demostró la eficiencia de estos materiales (Rivas *et al.*, 2017a), y el musgo *Sphagnum* como medio de crecimiento en muros verdes (Vijayaraghavan y Raja, 2014) Se estudiaron las características fisicoquímicas de los dos medios de crecimiento y también se analizaron parámetros como

la retención de agua en los sustratos establecidos en el muro verde y la homogeneidad en la distribución del agua dentro de los prototipos por medio de sensores electrónicos. Además, se analizó el desarrollo de las plantas en cada uno de los sustratos.

Para verificar la idoneidad de los sustratos se utilizaron sensores de humedad y de flujo conectados a un microcontrolador que registrara los datos tomados por estos, los cuales fueron instalados en los prototipos para muro verde tanto en los compuestos por la mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz como los de musgo *Sphagnum*, y para identificar la mejor combinación de planta y sustrato, se utilizaron dos diferentes especies, como planta tapizante *Aptenia cordifolia* y como planta de flor con mayor porte *Lampranthus spectabilis* (Emilsson, 2008).

Para conocer el efecto que el sustrato tiene sobre el crecimiento de las plantas, se determinaron el contenido de clorofila, la biomasa y la cantidad de agua en el material vegetal.

El contenido de clorofila en las hojas es un parámetro muy útil para evaluar el estado fisiológico de las plantas establecidas en los muros verdes. El contenido de pigmentos fotosintéticos puede cambiar como respuesta a factores causantes de estrés, a la capacidad fotosintética o al estado de desarrollo de la planta (Ustin *et al.*, 1998). La determinación de clorofila en tejidos vegetales por extracción con acetona a 85 %, es un método utilizado para estimar el estado nutricional del cultivo (Hansmann, 1973). El cálculo del contenido de clorofilas en las plantas de los muros verdes, haciendo correlaciones con las concentraciones de clorofila extraíble, permite obtener los valores del rendimiento del material vegetal establecido en los dos tipos de sustratos utilizados en los prototipos de muros verdes.

La biomasa es una variable clave de un proceso biológico, ya que su análisis nos ayuda a comprender la eficiencia del mismo. Se trata de una variable importante para establecer las tasas de producción, de consumo de nutrientes y el cálculo de los balances de masa del proceso biológico de las plantas establecidas en los muros verdes.

El agua compone gran parte de las plantas y en solución acuosa ocurre la mayor parte de las reacciones metabólicas, además de procesos necesarios como el crecimiento celular, la fotosíntesis y, por tanto, la misma productividad (Taiz y Zeiger 2006). Por esta razón, es importante analizar el contenido de agua en el material vegetal ya que la falta de agua en la planta origina respuestas en su crecimiento y productividad en los muros verdes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización y sistemas de muros verdes

El experimento se estableció en el campus de Rabanales de la Universidad de Córdoba (37°54'51.3"N 4°43'28.5"W), con unas condiciones climáticas medias anuales de 17.8 °C de temperatura, pluviosidad de 612 mm y humedad relativa de 60%. Los ocho prototipos de muro verde de 1 m² de superficie por 0.1 m de espesor, se instalaron con orientación sur, y se componen de una estructura de aluminio con una tapa de malla que tiene la función mecánica de soporte, también poseen un canal de recolección de agua de PVC que dirige el agua al recipiente contenedor para la recirculación de agua a cada prototipo y tiene un revestimiento de fieltro para mantener la humedad (Jørgensen *et al.*, 2014). El módulo de aluminio se fija en una estructura de acero mayor instalada sobre el suelo del edificio dejando 5 centímetros de espacio entre el muro y la cubierta verde. En cada prototipo de muro verde se estableció una tubería de 16 mm flexible para el riego en la parte superior, y en su parte media se han colocado 96 goteros autocompensantes de la marca ClickTif HD cada 20 cm de tubo, proporcionando a través de cada gotero 4 L/h. En la Figura 1 se pueden observar los prototipos.

Se ha realizado un ensayo de uniformidad de los emisores del sistema de riego utilizando la norma UNE-EN-ISO 9261. En total, se analizaron 9 de los 12 emisores de cada módulo, es decir, un total de 72 goteros en los 8 módulos analizados.



Figura 1 | Prototipos de muros verdes.

Medios de crecimiento

Para este experimento se utilizaron dos tipos de sustrato, el sustrato alternativo compuesto de una mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz con un porcentaje de 50%/50%, el cual se comparó con el sustrato de referencia el musgo *Sphagnum*, uno de los sustratos comúnmente utilizados para el diseño para muros verdes de sistemas modulares como se observa en la Figura 2. Los sustratos fueron distribuidos de forma aleatoria en los 8 prototipos, de tal manera que cuatro contenían la mezcla de fibra de coco/cascarilla de arroz y cuatro el musgo *Sphagnum*.

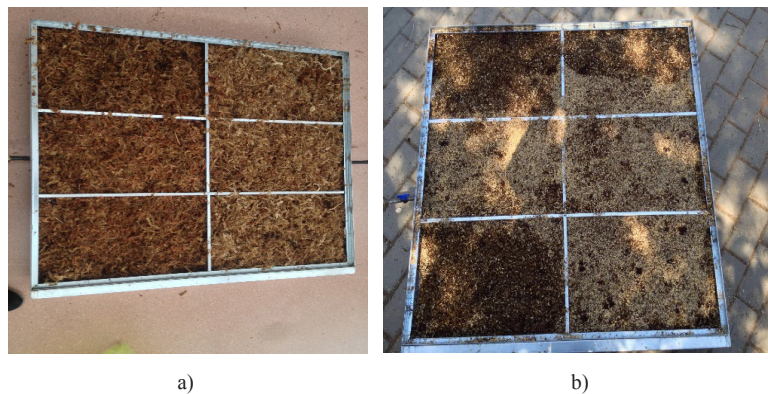


Figura 2 | Sustrato para prototipos de muro verde a) musgo *Sphagnum*, b) sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco.

Las propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados se obtuvieron en el laboratorio por medio del fotómetro multiparamétrico hi 83200 de Hanna Instruments, tomando una muestra del sustrato y dejándolo en 100 mL de agua desionizada por 24 horas. Para su posterior análisis se cogió extracto en saturación de cada uno de los sustratos utilizados para el experimento.

Plantación, Irrigación y fertilización

En este experimento se han utilizado dos diferentes especies de material vegetal *Lampranthus spectabilis* por su cobertura y como planta de flor con mayor porte *Aptenia cordifolia* (ver Figura 3). Las dos especies fueron seleccionadas teniendo en cuenta

la exposición solar del lugar de establecimiento del prototipo de muro verde y por la fácil adquisición de estas plantas en la región. La densidad de siembra de las plantas ha sido de 36 plantas por prototipo, 6 filas×6 columnas, espaciadas de forma equidistante entre los bordes del prototipo plantadas en agosto del 2016. Se han ubicado aleatoriamente en cada prototipo, pero cada uno poseerá la misma cantidad de plantas (Egea *et al.*, 2014). Para la irrigación se utilizó una bomba centrífuga horizontal CRI mhb-3/03m (H = 24 m; Q = 3 m³/h; 230 V; 3.6 A) que suministra agua para cada uno de los prototipos de muro verde. La bomba está conectada a un programador Rain Bird ESP RZX4i, que la activa dependiendo de la lectura de los sensores de humedad, regando por goteo de dos a tres veces por día según la humedad del sustrato. El ciclo de experimentación fue el comprendido entre el 2 de agosto del 2016 a 8 de agosto del 2017, y en los meses en los que se regó más fueron junio y julio. La fertilización se realizará mediante el riego adicionando el fertilizante comercial orgánico de guano al agua proporcionando N, P, K en cada uno de los prototipos para muros verdes.

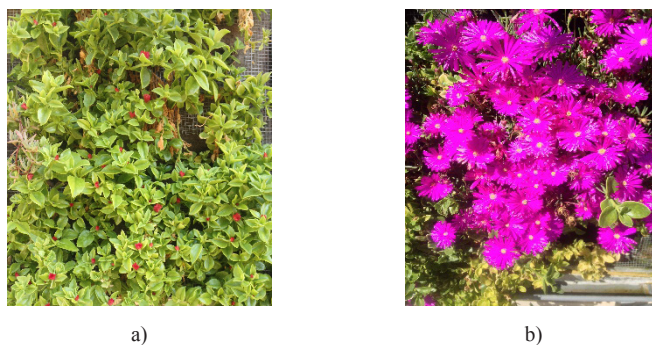


Figura 3 | Material vegetal a) *Aptenia cordifolia* y b) *Lampranthus spectabilis*

La escorrentía y la retención de humedad

La escorrentía de los sustratos se analizó mediante sensores de flujo YF-S402, que utilizan un sistema “hall” para su funcionamiento instalados en el sistema de recolección de agua, en tanto que la retención de humedad del sustrato se midió con sensores de humedad FC-28 de bajo coste los cuales miden dicha humedad dependiendo de su conductividad. Estos sensores fueron instalados en diferentes partes del sustrato en los prototipos de muro verde. Los sensores de flujo y humedad estaban conectados a internet registrando los datos para su posterior análisis (Rivas *et al.*, 2017b).

La calibración del sensor de flujo se realizó mediante el método volumétrico, tomando un volumen de referencia y así poder calibrar la programación para el microcontrolador según cada sensor. También para evitar errores en la toma de datos por medio de los sensores de flujo se tuvo en cuenta la correcta sujeción del sensor al tubo debido a que este puede tener variaciones según la inclinación o las pérdidas de agua por una mala conexión con la tubería de agua. La calibración del sensor de humedad se realizó mediante pruebas de ensayo en los sustratos húmedos, para así determinar el nivel de humedad óptimo para las plantas (Rivas *et al.*, 2017b).

Los dos sensores estaban conectados a un microcontrolador Arduino el cual enviaba los datos a una base de datos por medio de internet. Los datos fueron tomados cada 5 minutos durante toda la fase del experimento. Un microcontrolador es un dispositivo electrónico que integra dentro un encapsulado y un gran número de componentes, como resistencias, condensadores, etc., conectados entre sí de forma muy específica y que tiene la característica de ejecutar de forma autónoma una serie de instrucciones previamente definidas por el programador (Rivas *et al.*, 2017b). El microcontrolador es el componente principal del circuito de procesamiento y control (Artero, 2016). En Arduino tanto el hardware como el software son de código abierto (Banzi y Shiloh, 2016).

Crecimiento de plantas

La recolección del material vegetal se ha hecho un año después de su implantación, agosto de 2017. Hasta entonces el crecimiento de las plantas se ha caracterizado controlando el número de marras que se ha producido en cada prototipo y con cada sustrato, así como observando visualmente el desarrollo de las plantas en cada etapa de su crecimiento.

Tras la recolección, para la determinación del contenido de clorofilas totales de la biomasa se utilizó el método espectrofotométrico propuesto por Hansmann (1973) donde las muestras de 1 g de la parte aérea de las plantas se trituraron y suspendieron en un volumen de 10 mL de acetona-agua al 85% (v/v) como disolvente extractor de los pigmentos. La clorofila absorbe la energía solar necesaria para iniciar el ciclo fotosintético de muchas plantas. La principal propiedad fisicoquímica responsable de este hecho es la elevada absorbancia que presenta la clorofila en el intervalo de longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm. La clorofila A presenta máximos de absorción en 420 nm y 663 nm, mientras que la clorofila B los presenta en 430 nm y 644 nm. La posición exacta de estos máximos depende del disolvente que se utilice. Por esto, y debido a la utilización de acetona como disolvente, se midió la densidad óptica del sobrenadante a 663 para la clorofila A y 644 para la clorofila B, comprobando que no existiera turbidez ni partículas en suspensión, como blanco se utilizó el propio disolvente.

Para la determinación de la biomasa y el contenido hídrico se utilizó el método de secado al horno tomando una muestra de 100 gramos de materia húmeda de cada uno de los prototipos de muros verdes, que se secaron durante 48 horas al horno. Finalizado este período se pesó nuevamente la muestra y se estimó el % de materia seca por diferencia de peso antes y después de la colocación en el horno (Samuelsson *et al.*, 2006).

Análisis estadístico

Para estudiar la influencia del tipo de sustrato en el crecimiento y desarrollo de las plantas, se han analizado los datos obtenidos en laboratorio, para cada una de las especies vegetales y cada uno de los sustratos utilizados realizando un análisis de la varianza (ANOVA) al 5% de nivel de significación ($\alpha = 0.05$). Los datos estudiados fueron sometidos a un análisis estadístico completamente al azar, utilizando el software estadístico Statistix8®, con el objetivo de observar si existen diferencias significativas dentro de los sustratos utilizados. El test de Tukey se utilizó para estudiar la diferencia entre las medias.

RESULTADOS

Los resultados de caudal medio, q_i (L/h), para cada una de las presiones que fija la norma P_i (kPa), obtenidos en el ensayo de los emisores del sistema de riego, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 | Caudal en función de la presión.

| P_i (kPa) | \bar{q}_i (L/h) |
|-----------------|-------------------|
| 40 | 3.8 |
| 80 | 3.9 |
| 100 | 4 |
| 120 | 3.9 |
| 140 | 4 |
| \bar{q} Total | 3.92 |

Siguiendo la norma ISO 9261:2004 se ha calculado la desviación del caudal (ecuación 1) y su coeficiente de variación (ecuación 2).

$$\text{Desviación caudal} = \frac{\bar{q} - q_n}{q_n} \cdot 100 \quad (1)$$

$$C_v = \frac{S_q}{\bar{q}} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

\bar{q} : Caudal medio de la muestra, en litros por hora.

q_n : Caudal nominal, 4 L/h

S_q : Desviación típica de los caudales de la muestra, en litros por hora.

C_V : Coeficiente de variación del caudal.

En nuestro caso resulta una variación de caudal del 2% y un coeficiente de variación de caudal del 2.1 % que cumple con dicha norma, que nos dice que se consideran aceptables si la desviación de caudal no supera $\pm 7\%$ del caudal nominal, y el coeficiente de variación de caudal tampoco excede del $\pm 7\%$.

También se ha calculado la ecuación de gasto del gotero para comprobar si cumple con la condición de autocompensante:

$$q = k \cdot p^x \quad (3)$$

Donde:

k : Coeficiente adimensional que depende de la geometría del gotero

x : Exponente hidráulico adimensional

Usando los datos de la Tabla 1, se obtiene un valor de x igual a 0.045, que demuestra su condición de autocompensante, y un valor de k igual a 3.75.

Los valores de las propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados, obtenidos en el laboratorio, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 | Propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados para muros verdes.

| Propiedad | Cascarilla de arroz | Fibra de coco | Mezcla | <i>Sphagnum</i> |
|--|---------------------|---------------|--------|-----------------|
| Densidad aparente g/m ³ | 0.098 | 0.105 | 0.108 | 0.099 |
| Densidad real g/m ³ | 0.61 | 0.35 | 0.214 | 0.48 |
| Porosidad total % | 84 | 70.7 | 86.2 | 80.2 |
| Retención de humedad % | 17 | 43 | 36 | 52 |
| pH | 7.245 | 6.605 | 7.1 | 4.2 |
| Conductividad eléctrica dS/m ⁻¹ | 0.8 | 3.6 | 2.7 | 0.6 |
| N% | 0.51 | 0.43 | 0.74 | 0.80 |
| P mgL ⁻¹ | 3.9 | 19 | 13.9 | 5.2 |
| K mgL ⁻¹ | 108 | 582 | 562 | 19 |

La Figura 4 muestra la liberación de agua en los dos sustratos estudiados tomando como referencia dos prototipos por cada uno de los sustratos estudiados utilizando la misma cantidad de agua para cada prototipo en la semana del 23/02/2017 hasta el día 01/03/2017, puesto que estos días se reprogramó el sistema de riego para que el sustrato sobrepasara la capacidad de campo y así tener el excedente de agua para su análisis. En la gráfica se puede ver como el sustrato de musgo *Sphagnum* tiene mayor retención que el sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco. Ello implica que este último puede necesitar ajustes en el riego, como menor tiempo de riego e intervalos más cortos entre riegos, para mejorar su retención de agua.

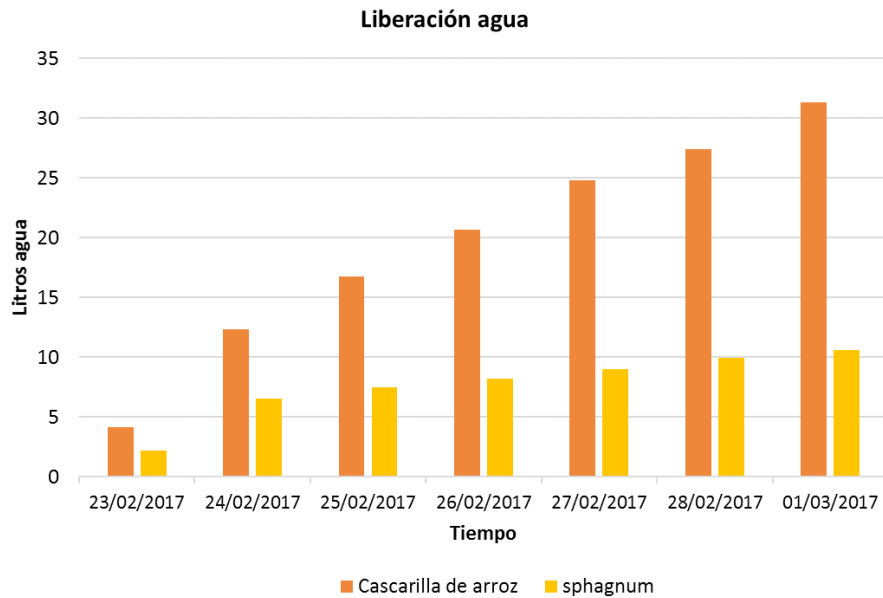


Figura 4 | Liberación de agua de los dos sustratos utilizados en el experimento.

La Figura 5 muestra el tiempo durante el cual cada uno de los sustratos libera el agua retenida en los módulos de experimentación de muro verde. En la gráfica se puede observar como el sustrato de musgo *Sphagnum* libera el agua más lentamente que el sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco y en menor cantidad. Las muestras fueron tomadas del día 26 de febrero de 2017, a primera hora y en las horas donde existe mayor incidencia solar.

La Figura 6 muestra la homogeneidad del agua contenida en los sustratos tanto en la parte inferior como en la parte superior, observándose que el sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco posee más homogeneidad en la distribución del agua en todo el módulo, a diferencia de los módulos compuesto de musgo *Sphagnum*, donde se acumulaba más agua en la parte inferior de los prototipos compuestos de este sustrato, estos datos fueron tomados en los días correspondientes al 01/02/2017 hasta 12/02/2017.

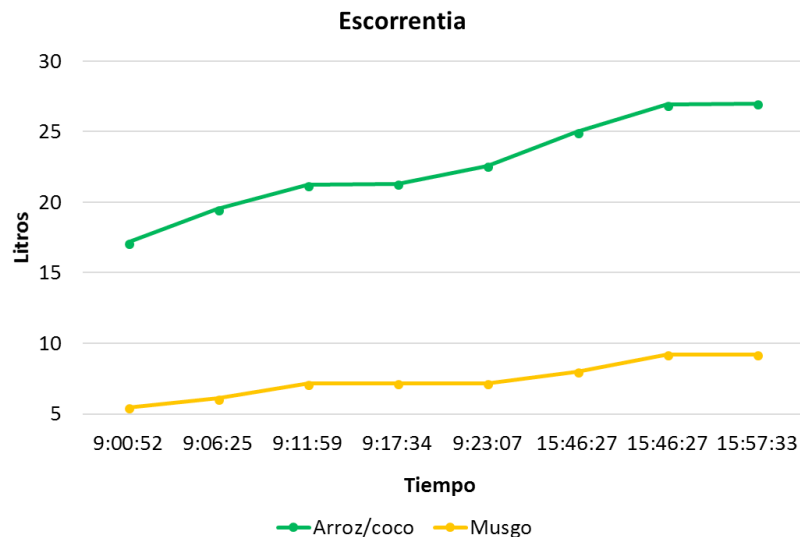


Figura 5 | Escorrentía en los sustratos compuestos de fibra de coco y arroz en comparación con el musgo *Sphagnum*.

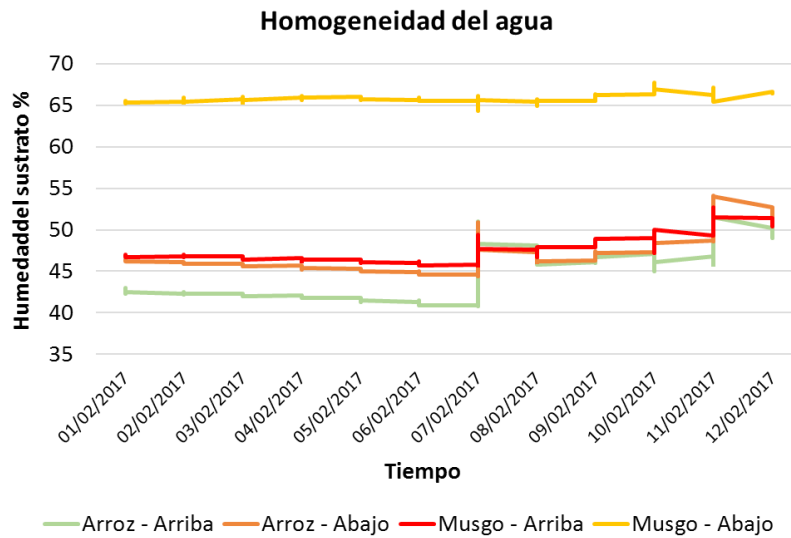


Figura 6 | Homogeneidad de la distribución del agua en la parte superior e inferior de los prototipos con los dos sustratos utilizados como medio de crecimiento para muros verdes.

Tanto la *Aptenia cordifolia* como la *Lampranthus spectabilis* mostraron que pueden ser utilizadas en el establecimiento de muros verdes modulares. Las plantas soportaron tanto las altas temperaturas de la región que llegaron a 50 °C en la época de verano y la exposición directa al sol como las heladas de invierno. El porcentaje de marras de las plantas desarrolladas no superó el 10% en cada uno de los sustratos.

Visualmente, en la Figura 7 se puede apreciar la clorosis que presentan los sustratos compuestos de musgo *Sphagnum*. Esto demuestra que las plantas se adaptaron mejor en el sustrato compuesto por cascarilla de arroz como se ve en la Figura 8, probablemente a que estas plantas necesitan una baja cantidad de agua para su óptimo desarrollo. La acumulación de agua en la parte inferior de los módulos compuestos por musgo *Sphagnum* puede ocasionar problemas con las raíces afectando esto el aspecto visual de los muros verdes.



Figura 7 | Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de *Sphagnum*.



Figura 8 | Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de mezcla de cascarilla de arroz y fibra de coco.

Respecto a la calidad del material vegetal (*Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis*) plantados en los dos diferentes tipos de sustratos, en la Figura 9 se muestra el efecto de los mismos sobre la biomasa, el contenido hídrico absoluto y la suma de las clorofilas A y B en las plantas. Según el test Tukey de comparaciones múltiples, $p = 0.05$, (Egea *et al.*, 2014), no existen diferencias estadísticamente significativas en el caso de la biomasa y del contenido hídrico absoluto (ver Figura 9 a y b).

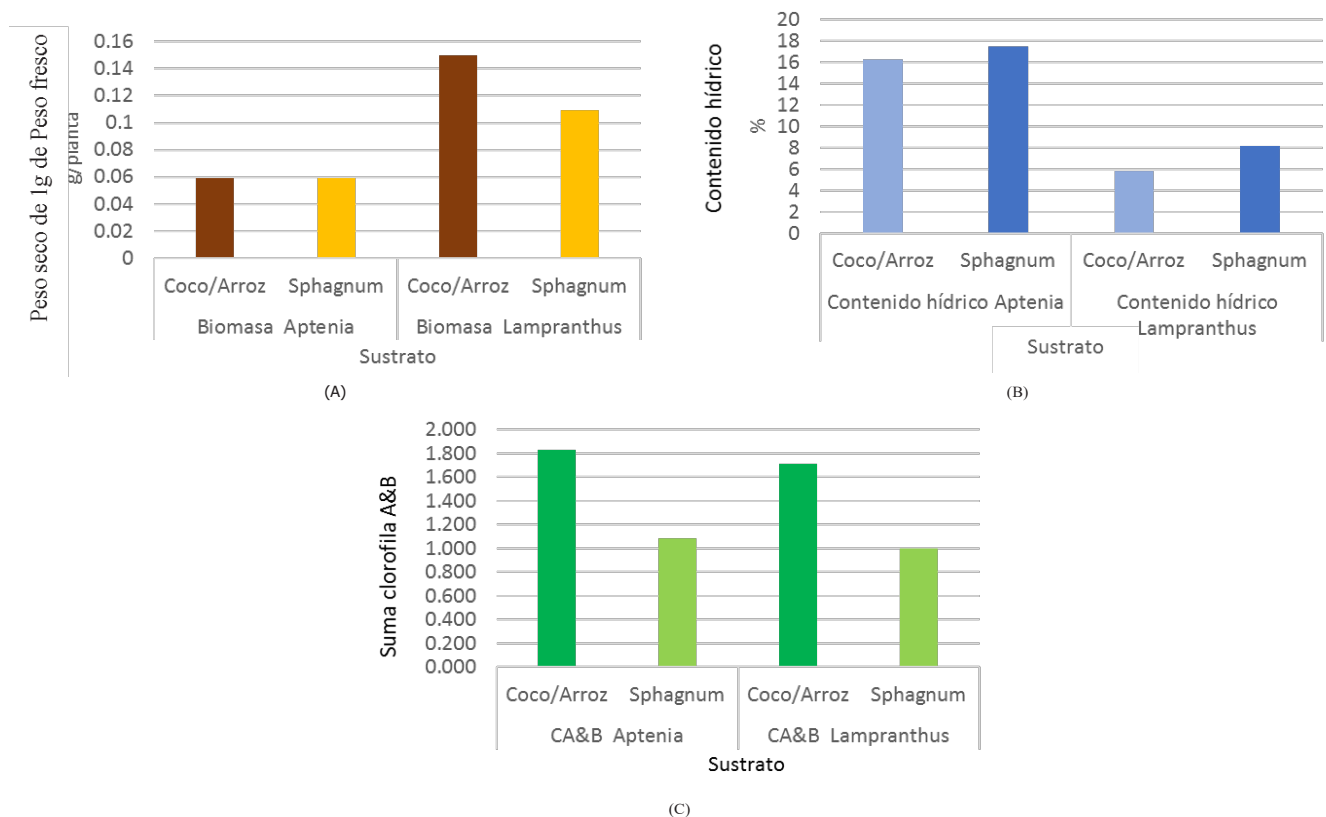


Figura 9 | Efecto de los dos sustratos en las plantas sobre la biomasa (A), el contenido hídrico absoluto (B) y la suma de las clorofilas A&B (C).

En el caso de la suma de clorofilas, aparecen en cambio diferencias según el medio de crecimiento. Existe una disminución en el contenido de clorofila del material vegetal plantado en el sustrato del musgo *Sphagnum* con respecto al material vegetal plantado en los sustratos de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz. El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre el uso de los dos sustratos manifestando una mayor cantidad de clorofila en las plantas establecidas en el sustrato de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz, haciendo de este último una alternativa viable como sustrato para muros verdes.

DISCUSIÓN

Por la influencia de la gravedad, la mayor parte de agua se acumula en la base de los prototipos de muro verde, donde se llenan los espacios porosos, reduciendo la disponibilidad de aire para las raíces. La mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz que es un material que posee una fuerte capilaridad, proporcionó unas condiciones de humedad más uniformes para las raíces de la parte inferior del prototipo. Este sustrato es capaz de aumentar la aireación en la base del sustrato y reducir el secamiento de la superficie cerca al fieltro de los prototipos de muro verde, por esto la gestión de la humedad superficial del mismo es mucho más fácil ya que el material tiene la capacidad de extraer la humedad del sustrato en la parte más profunda para reemplazar las pérdidas por evaporación.

El sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz es un material elástico con una estabilidad física excepcional con respecto al musgo *Sphagnum*. En este contexto, la estabilidad física se refiere a la capacidad del sustrato para proporcionar aire y humedad a las raíces de las plantas. Un problema que se encontró sobre el musgo *Sphagnum* fue que sus propiedades físicas cambiaban considerablemente con el contenido de humedad, cuando estaba muy húmedo, tendía a colapsarse, disminuyendo el aire disponible y cuando está seco, se contrae dejando espacios en los prototipos, en comparación con el sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz que no cambia mucho cuando se moja o se encoge excesivamente cuando se seca. También tuvo una buena estabilidad física a lo largo del experimento, esto asegura que la salud de las plantas no se perjudicará con el tiempo.

El hecho de que el contenido de clorofila en las plantas del sustrato mezclado de fibra de coco y cascarilla de arroz sea significativamente superior al encontrado en el musgo *Sphagnum*, podría deberse, entre otros factores, a que la mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz permitiría una adecuada disponibilidad de nutrientes, entre los que se podrían encontrar el nitrógeno y el magnesio, que son componentes fundamentales de la molécula de clorofila.

CONCLUSIONES

El sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco mostró mayor homogeneidad en la distribución del agua de riego que el musgo *Sphagnum*, aunque tuvo poca retención de agua en comparación con el sustrato compuesto de musgo *Sphagnum*.

El material vegetal tuvo un óptimo desarrollo en los dos tipos de sustratos analizados. Las especies *Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis* analizadas en este trabajo que fueron plantadas en el sustrato a base de fibra de coco y cascarilla de arroz, igualan en calidad visual y porcentaje de marras a las plantas desarrolladas en sustratos a base de musgo *Sphagnum*. Los resultados obtenidos demostraron que el medio de crecimiento de arroz mezclado con fibra de coco puede ser utilizado con éxito en la implementación como medio de cultivo en muros verdes.

Se encontró una mayor concentración de clorofila en el material vegetal plantado en el sustrato alternativo de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz con respecto al material vegetal plantado en el musgo *Sphagnum*. En cuanto a los análisis de biomasa y contenido hídrico no se encontraron diferencias significativas entre el uso de los diferentes sustratos utilizados en este experimento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está soportada con fondos propios de la línea de investigación “Sostenibilidad de Recursos Naturales” integrada en el Programa de Doctorado “Recursos Naturales y Gestión Sostenible” de la Universidad de Córdoba.

Se agradece a María Benlloch González y a Manuel Benlloch Marín, profesores del área de producción vegetal de la Universidad de Córdoba, la colaboración prestada en los ensayos de laboratorio.

REFERENCIAS

- Artero, T.O. 2016. *El mundo Genuino-Arduino: Curso práctico de formación*, RC libros, Madrid.
- Banzi, M., Shiloh, M. (2016). *Introducción a Arduino*, O'Reilly media, Grupo Anaya S.A. Madrid.
- Egea, G., Pérez-Urrestarazu, L., González-Pérez, J., Franco-Salas, A., Fernández-Cañero, R. 2014. Lighting systems evaluation for indoor living walls, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.009>
- Emilsson, T. 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix, *Ecological Engineering*, 33(3-4), 265-277.
- FLL. 2002. *Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung. Landschaftsbau e.V, ISBN:393448459x, pp. 99.
- Francis, A., Lorimer, J. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls, *Journal of environmental management*, 92(6), 1429-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Hansmann, E. 1973. Pigment Analysis. In *Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements*; Stein, J.R., Ed.; Cambridge University Press: London, UK. Vol. 1, pp. 359-368.
- Holman, J., Bugbee, B., Chard, J. 2005. *A Comparison of Coconut Coir and Sphagnum Peat as Soilless Media Components for Plant Growth*, Utah State Univ, Department of Plants, Soils, and Biometeorology.
- Jørgensen, L., Dresbøll, D.B., Thorup-Kristensen, K. 2014. Root growth of perennials in vertical growing media for use in green walls, *Scientia Horticulturae*, 166, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.006>
- Larcher, F., Fornaris, A., Devecchi, M. 2013. New Substrates for Living Walls, III International conference on landscape and urban horticulture, *Acta Horticulturae*, V: 999, 277-281.
- Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015. Green wall systems: A review of their characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(C), 863-871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Mickovski, S., Buss, K., McKenzie, B., Sökmener, B. 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs, *Ecological Engineering*, 61C, 706-714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015>
- Molineux, C., Fentiman, C., Gange, A. 2009. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K, *Ecological Engineering*, 35(10), 1507-1513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010>
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, *Energy and Buildings*, 43(12), 3419-3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Perini, K., Rosasco, P. 2013. Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems, *Building and Environment* 70, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Rivas, Y., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2017a. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. *European Geosciences Union General Assembly 2017*, 23-28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604

- Rivas, Y., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2017b. Puesta en marcha de un sistema inteligente de riego por goteo para muros verdes con el uso de microcontroladores y microprocesadores. *XXXV Congreso Nacional de Riegos*, Tarragona, España, <https://doi.org/10.25028/CNRiegos.2017.B05>
- Rose, R., Haase, D. 2000. The use of coir as a containerized growing medium for Douglas fir seedlings. *Native Plants Journal*, 1(2) 107-111. <https://doi.org/10.3368/npj.1.2.107>
- Safikhani, T., Aminatuzuhariah M.A., Ossen, D.R., Baharvand, M. 2014. A review of energy characteristic of vertical greenery systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40(C), 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>
- Samuelsson, R., Burvall, J., Jirjis, R. 2006. Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, *Biomass & Bioenergy*, 30(11), 929-934. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.004>
- Taiz, L., Zeiger, E. 2006. *Plant physiology*. 4th Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M.M., Govaerts, Y. 1998. GeoBotany: Vegetation mapping for Earth sciences, in *Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences*, edited by A. N. Rencz, 3rd ed., John Wiley, Hoboken, N. J. 3:189248.
- Vijayaraghavan, K., Raja, F. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption, *Water Research*, 63, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>