

## EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UN SUSTRATO DE FIBRA DE COCO

Freddy Soto-Bravo<sup>1/\*</sup>, Alejandro Betancourt-Flores<sup>2</sup>

**Palabras clave:** Cultivo sin suelo; capacidad de contenedor; capacidad de aireación; agua total disponible.

**Keywords:** Soilless crops; container capacity; aeration capacity; total available water.

**Recibido:** 03/11/2021

**Aceptado:** 22/02/2022

### RESUMEN

**Introducción.** El incremento en la demanda de sustratos como medio de cultivo alternativo a suelos contaminados con complejos de fitopatógenos, plantea la necesidad de validar metodologías para la evaluación agronómica de sus características físicas y químicas. Aunque existen diferentes métodos, la falta de validación y homologación entre y dentro de países, dificulta el control de calidad de materiales nacionales e importados, lo que limita el éxito de cultivos en sustrato. **Objetivo.** Evaluar 3 distintas metodologías para determinar las características físicas de un sustrato de fibra de coco. **Materiales y métodos.** Se evaluaron los métodos de porómetro, contenedor “in situ” y caja de arena para determinar la densidad aparente (DA) y los porcentajes de componente sólido (CS), de humedad ( $\theta$ ) a capacidad de contenedor ( $\theta_{CC}$ ), de capacidad de aireación (CA) y de porosidad total (PT). Adicionalmente, la caja de arena permitió determinar los contenidos de humedad a diferentes potenciales mátricos desde  $\theta_{CC}$  hasta punto de marchitez permanente (PMP). **Resultados.** Los valores de CA,  $\theta_{CC}$ , PT y CS no fueron

### ABSTRACT

**Evaluation of methodologies to determine the physical characteristics of a coconut fiber substrate. Introduction.** The increase in the demand for substrates as an alternative growing medium to soils contaminated with phytopathogen complexes, raises the need to validate methodologies for the agronomic evaluation of their physical and chemical characteristics. Although there are different methods, the lack of validation and standardization between and within countries makes it difficult to control the quality of national and imported materials, which limits the success of substrate crops. **Objective.** To evaluate 3 different methodologies for the evaluation of the physical characteristics of coconut fiber substrate. **Materials and methods.** The porometer, “in situ” container and sandbox methods were evaluated to determine apparent density (AD) and the percentages of solid component (SC), volumetric water content ( $\theta$ ) at container capacity ( $\theta_{CC}$ ), aeration capacity (AC) and total porosity (TP). Additionally, the sandbox method allowed determining moisture contents

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.  0000-0003-1959-9597.

2 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.  0000-0002-7757-5967.

estadísticamente diferentes ( $p > 0,05$ ) entre métodos, y únicamente la DA fue ligeramente inferior ( $p < 0,05$ ) en el método del porómetro. Conforme incrementó la  $\theta_{CC}$  desde 74,9% en el método de contenedor hasta 77,18% en la caja de arena, al mismo tiempo la CA tuvo un comportamiento inverso al disminuir desde 16,33% hasta 15,13%. Consecuentemente, la PT y el CS fueron similares entre métodos, con valores promedio de 91,67% y 8,47%, respectivamente. El método de caja de arena, a diferencia de los otros, permitió construir la curva de desorción de agua:aire y así determinar los contenidos de agua fácilmente disponible (AFD: 23,6%), de agua de reserva (AR: 2,3%) y de agua no disponible (AND: 49,9%). **Conclusión.** Todos los métodos permitieron determinar las características físicas de DA, CA,  $\theta_{CC}$ , PT y CS de la fibra de coco. Los métodos de porómetro y contenedor “in situ”, presentan las ventajas de ser muy prácticos a un bajo costo, sin embargo, en comparación al método de caja de arena no permiten la elaboración de la curva de liberación de agua y aire y la determinación de los diferentes tipos de agua en el sustrato.

## INTRODUCCIÓN

Un sustrato es todo material sólido distinto del suelo “in situ”, natural de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor en forma pura o en mezcla, tiene funciones de anclaje radicular como sostén, protege las raíces y almacena el aire, el agua y los nutrientes necesarios para la planta (Ansorena 1994, Rivière y Caron 2001, Castro *et al.* 2019).

La aplicación excesiva o el déficit de agua en el sustrato afectan con igual magnitud el crecimiento del cultivo, el rendimiento y calidad de frutos. El exceso de riego favorece la contaminación ambiental con nitratos y metales pesados e incrementa los costos de producción. De aquí

at matric potentials from  $\theta_{CC}$  to permanent wilting point (PWP). **Results.** The values of AC,  $\theta_{CC}$ , TP and SC were not statistically different ( $p > 0,05$ ) between methods, and only DA was slightly lower ( $p < 0,05$ ) in the porometer method. As the  $\theta_{CC}$  increased from 74.9% in the container method to 77.18% in the sandbox, and at the same time the AC had an inverse behavior decreasing from 16.33% to 15.13%. The PT and CS were very similar in the three methods, with average values of 91.67% and 8.47%, respectively. The sandbox method, unlike the others, made it possible to construct the water:air desorption curve and to determine the contents of readily available water (AFD: 23.6%), reserve water (AR: 2.3%) and water not available (AND: 49.9%). **Conclusion.** All the methods allowed to determine the physical characteristics of AD, AC,  $\theta_{CC}$ , PT and CS of the coconut fiber. The “in situ” porometer and container methods have the advantages of being very practical at a low cost, however, compared to the sandbox method, they did not allow the elaboration of the water and air release curve and the determination of the different types of water in the substrate.

se desprende la premisa de que para una óptima nutrición del cultivo es indispensable realizar un manejo preciso del riego, para lo cual es imprescindible conocer las características físicas del sustrato (Chamindu Deepagoda *et al.* 2013a).

En cultivos sin suelo, antes de sembrar, es muy importante asegurarse que el sustrato tenga las características físicas óptimas, ya que una vez establecido no es posible mejorarlas. Por tanto, uno de los principales factores que determinan el éxito de un cultivo sin suelo es la calidad física del sustrato, lo cual permite una correcta dosificación y programación del riego y la nutrición del cultivo. Por el contrario, la mayoría de las propiedades químicas es posible enmendarlas. Por ejemplo, un exceso de sales se puede corregir

mediante lavado; altos o bajos niveles de uno o varios nutrientes puede solucionarse al ajustar las concentraciones en la solución nutritiva (Carlile *et al.* 2015).

En los últimos años a nivel mundial, el uso de sustratos para la producción agrícola ha incrementado sustancialmente, desde pequeños huertos familiares de autoconsumo hasta unidades productivas comerciales (Bracho *et al.* 2009). En algunos sistemas de producción convencional en suelo bajo invernadero, como es el caso de la fresa en Costa Rica, el mal manejo nutricional y fitosanitario del suelo trae como consecuencia su agotamiento nutricional y la contaminación con complejos fitopatógenos, lo que ha conllevado a un aumento en la aplicación de pesticidas, que, junto al monocultivo, promueve un círculo vicioso que agrava la problemática y hace imposible la producción. Lo anterior ha provocado que productores emigren hacia el cultivo hidropónico, quienes utilizan principalmente la fibra de coco como sustrato (González *et al.* 2015).

Para el cultivo de plantas sin suelo se pueden utilizar diferentes tipos de materiales importados como el peatmos y la fibra de coco o locales como arena, piedra pómez, carbón vegetal, fibra de coco y cascarilla de arroz, entre otros. Sin embargo, la variabilidad en cuanto a la naturaleza, el origen y la granulometría de los diferentes materiales, genera una alta inestabilidad en las propiedades físicas e hídricas tanto de materiales comerciales o como de los preparados en finca. El desconocimiento de las características físico-hídricas de los sustratos dificulta el manejo del riego, principalmente cuando se cambia a nuevos lotes de sustratos, ya que la variabilidad físico-hídrica dificulta la estandarización del volumen y la frecuencia de riegos. Por el contrario, un sustrato con una selección estandarizada de tamaños de partículas permite mayor estabilidad en las características físicas del sustrato, lo cual consecuentemente facilita el manejo del riego (Quesada y Méndez 2005, Ortega *et al.* 2016).

La necesidad de conocer las características físico-hídricas de un sustrato con el objetivo

de realizar un adecuado manejo del riego y por tanto de la nutrición de los cultivos sin suelo, crea la necesidad de contar con metodologías estandarizadas que permitan una correcta evaluación agronómica de estos. Por tal razón, en algunos países como por ejemplo la Unión Europea, se han estandarizado metodologías mediante la norma UNE-EN-13041 (2007) que permite una homologación de criterios entre países miembros para una correcta interpretación de la información técnica de materiales importados o locales.

La problemática actual es que, en Costa Rica, actualmente no existen metodologías validadas y homologadas, para evaluar las características físicas y así el control de calidad de sustratos agrícolas. Esto limita el éxito del cultivo sin suelo y hace que los productores incurran en pérdidas durante la curva de aprendizaje.

En este estudio se evaluaron 3 distintas metodologías para determinar las características físicas de un sustrato: i- el porómetro (Fonteno y Harden 2003), iii- la caja de arena y ii- un método local denominado contenedor "in situ". Diversos estudios han evaluado las características físicas mediante la comparación de diferentes tipos de sustratos (Cayosso-Rodríguez *et al.* 2018, Acuña *et al.* 2013, Castro *et al.* 2019, López-Baltazar *et al.* 2013), sin embargo, la variabilidad entre referencias metodológicas dificulta la estandarización y homologación de métodos. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar 3 distintas metodologías para determinar las características físicas de un sustrato de fibra de coco, con el fin de disponer de metodologías alternativas sencillas y estandarizadas, para los productores de cultivos en sustratos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N y 84° 16' W, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, 22°C y 78%, respectivamente.

**Análisis granulométrico.** Para realizar el análisis granulométrico se utilizó una columna de tamices (Geotech) que consta de un soporte plástico con escala porcentual (1 a 100), 4 frascos con sus respectivas cribas de > 2,0 mm (72 OPN), > 1,0 - < 2,0 mm (40 OPN), > 0,5 - < 1,0 mm (20 OPN) y > 0,25 - < 0,5 mm (9 OPN), respectivamente, y un último frasco que recoge las partículas finas de < 0,25 mm (Figura 1). Para el análisis granulométrico se utilizaron 8 repeticiones de la fibra de coco, que se colocaron en el primer cilindro con la criba de 2,0 mm, la cual se agitó manualmente hasta obtener la separación de partículas en cada uno de los 5 frascos. Seguidamente, se determinó para cada fracción de tamaño de partículas, la distribución porcentual en base a volumen ( $v.v^{-1}$ ) según la escala del texturómetro. Además, cada fracción fue pesada por separado para determinar su distribución porcentual en base a peso ( $p.p^{-1}$ ).



Figura 1. Columna de tamices formada por soporte plástico con escala porcentual (1 a 100) y 5 frascos con sus respectivas cribas, utilizado para determinar distribución de tamaños de partículas en sustratos.

**Metodologías de análisis físico.** Para determinar la DA, PT, CS, CA y el contenido de  $\theta_{CC}$  se utilizaron 3 distintas metodologías: i- el porómetro, ii- el contenedor "in situ" y iii- caja de arena. La recolección de las muestras del sustrato de fibra de coco se realizó con el procedimiento de la norma europea UNE-EN 12579 (2000).

**El porómetro.** En este estudio se hizo una adaptación al método de North Caroline State University descrito por Fonteno y Harden (2003), el cual consistió en un recipiente plástico de aproximadamente 500 mL y con una proporción altura y diámetro 1:1. En la parte inferior del recipiente se hicieron 5 perforaciones, donde se insertaron microtubos (4 mm) sellados con silicón y con tapones de goma que permitieron cerrar y abrir los orificios (Figura 2a).

Se utilizaron 16 repeticiones colocadas cada una en su respectivo porómetro (Figura 2b). Seguidamente, se procedió a saturar con agua destilada hasta alcanzar la marca de aforo, cuando se observó el brillo metálico del agua (Figuras 2c, 2d), sin que haya excesos sobre la superficie del sustrato.

El proceso de saturación para cada repetición consistió en 3 ciclos de saturación y drenaje con agua destilada, con el fin de mejorar la capacidad de hidratación, desplazar burbujas de aire en el interior del sustrato y obtener una saturación más homogénea. Se cuantificó el peso del sustrato saturado e inmediatamente se quitaron los tapones de los agujeros ubicados en la base del porómetro para proceder a cuantificar el volumen de agua drenada ( $V_d$ ) hasta cesar completamente el drenaje (Figura 2e). La duración del proceso de humectación y drenaje puede variar según la granulometría y tipo de material. Para el caso de la fibra de coco se presentó una duración de aproximadamente 30 minutos.

A cada porómetro se le midió el volumen a rellenar con sustrato ( $V_s$ : 350 mL) y se cuantificó su peso (g) sin sustrato (Pp) con una balanza analítica (BOECO, BPS 40 plus). Después de cesar el drenaje, se cuantificó el peso (g) del porómetro con sustrato húmedo (PpSh). A continuación, las muestras de PpSh se secaron en estufa a 105°C hasta alcanzar peso seco constante, para obtener así el peso del porómetro con sustrato seco

(PpSs). Finalmente, se determinó el peso del sustrato húmedo (PSh) y el peso del sustrato seco (PSs) según las ecuaciones:

Ecuación 1

$$PSh (g) = [PpSh (g) - Pp(g)]$$

Ecuación 2

$$PSs (g) = [PpSs (g) - Pp (g)]$$

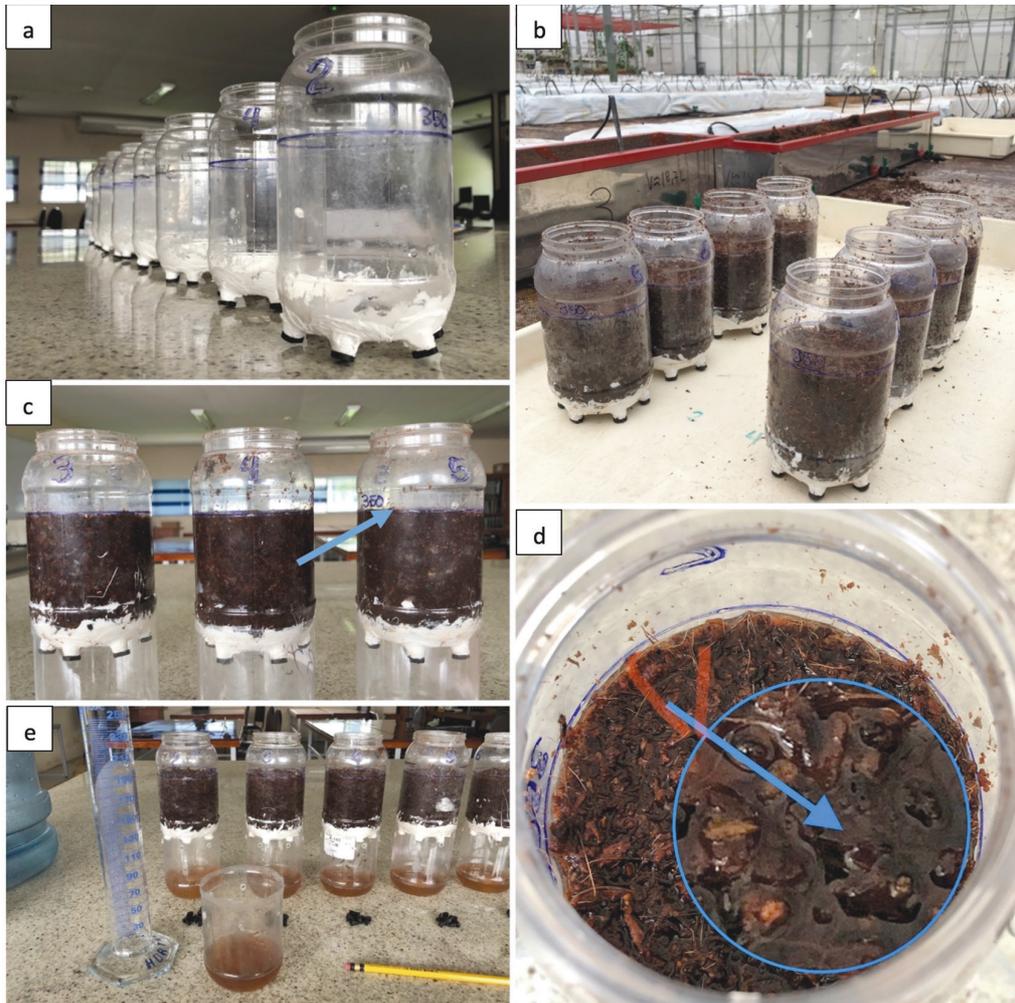


Figura 2. Recipiente plástico utilizado como porómetro con una proporción 1:1 de altura y diámetro (a), colocación de muestras en el recipiente (b), saturación de muestras (c), brillo metálico del agua (d) y recolección y medición de drenajes (e).

La DA, CA,  $\theta_{CC}$ , PT y CS de la fibra de coco, se determinaron según el procedimiento descrito a continuación, según normas UNE-EN-13041 (2007). Para determinar el porcentaje de  $\theta$  ( $V.V^{-1}$ ) a diferentes potenciales mátricos, primero se determinó el contenido de humedad gravimétrica ( $g.g^{-1}$ ) con la ecuación:

$$\theta_g = \frac{PSh(g) - PSs(g)}{PSs(g)}$$

Seguidamente se calculó el porcentaje de  $\theta$  volumétrica como el producto de la  $\theta_g$  por la DA por 100.

El porcentaje de CA se obtuvo al dividir el volumen drenado (Vd) entre el Vs según la ecuación:

$$CA = \frac{Vd(mL)}{Vs(mL)} \times 100.$$

La DA ( $g.cm^{-3}$ ) se obtuvo como el cociente entre el peso seco de sustrato (PSs) a  $105^{\circ}C$  y el volumen total de la muestra del sustrato (Vs) según la ecuación:

$$DA(g.cm^{-3}) = \frac{PSs(g)}{Vs(cm^3)}.$$

La DR se obtuvo por el método del picnómetro según Ansorena (1994), ya que dicho método considera únicamente la porosidad efectiva, la cual es un factor determinante para efectos de manejo del riego en los cultivos. Otros métodos como el de las cenizas, considera la

porosidad ocluida o cerrada, que no interfiere en la dinámica de desorción de agua y aireación en el sustrato.

Para el cálculo de la porosidad total se utilizó la Ecuación  $PT = (1 - DA.DR^{-1}) \times 100$ , según la recomendación de Ansorena (1994). La DA depende de la granulometría y de la naturaleza del sustrato, mientras que la DR puesto que no considera el volumen de poros totales, depende básicamente del tipo y naturaleza de las partículas de material. Finalmente, el porcentaje CS fue obtenido como la resta entre 100 menos la PT.

**Método de contenedor “in situ”.** Este método es útil para evaluar DA, CA,  $\theta_{CC}$ , PT y CS de un sustrato “in situ”, colocado directamente en el contenedor de cultivo antes de sembrar, independientemente del tipo de contenedor. Los orificios de drenaje en el fondo del contenedor de cultivo deben ser impermeabilizados o sellados temporalmente para poder saturar el sustrato.

En este estudio, el sustrato de fibra de coco tenía una presentación en tablas comprimidas, que una vez hidratadas alcanzaron dimensiones de 14,5 cm de alto por 13 cm de ancho y 100 cm de largo, para un volumen de 18,2 L, las cuales se colocaron en recipientes (repeticiones) de acero inoxidable con las mismas medidas. A cada contenedor se le realizaron 3 perforaciones en la parte inferior a un lado, donde se colocaron llaves de paso plásticas (1/2”) selladas en su base con silicón para evitar fugas. A cada contenedor se le midió el volumen real con agua (Vc) y se le cuantificó el peso sin sustrato (Pc) (Figura 3).



Figura 3. Recipiente metálico con sus respectivos drenajes (a) que contiene una tabla de fibra de coco saturada de un volumen aproximado de 18,2 L (b).

Se seleccionaron al azar 16 tablas de fibra de coco dentro de un lote de 408 tablas. A cada una se les removió el empaque plástico, se colocaron en el contenedor y se hidrataron mediante riegos cortos y frecuentes hasta alcanzar el tamaño equivalente al volumen de 18,2 L. Una vez hidratado el sustrato, se procedió al proceso de saturación, mediante el mismo procedimiento descrito para el porómetro, y se cubrió la superficie con plástico para evitar la evaporación de agua. Seguidamente, se determinó el peso del sustrato saturado (PSs). Posteriormente, se abrieron las llaves de drenaje y se midió el volumen drenado. A continuación, después de cesar el drenaje, se cuantificó el peso del contenedor con el sustrato húmedo (PcSh), las cuales se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante, para obtener así el peso de contenedor con sustrato seco (PcSs). La determinación de la DA, DR, CA,  $\theta_{CC}$ , PT y CS de la fibra de coco, se realizó por medio del mismo procedimiento descrito para el porómetro.

**Método de caja de arena.** Este método se basa en el principio de la dinámica hídrica en la planta, que extrae agua del sustrato mediante una succión o potencial mátrico ( $\psi_m$ ), por medio de la columna de transpiración que fluye desde las raíces hasta las hojas en la interacción sustrato-planta-clima. Dicha dinámica hídrica puede ser representada a través de la curva de desorción de agua, al someter submuestras de sustrato a  $\psi_m$  crecientes, en las cuales se determina el contenido de  $\theta$  respectivo.

Para ello se utiliza un equipo denominado “caja de arena” (Figura 4), compuesto por un reservorio con arena sílica, un depósito de agua destilada, tuberías internas interconectadas a una manguera transparente (12,5 mm) que funge

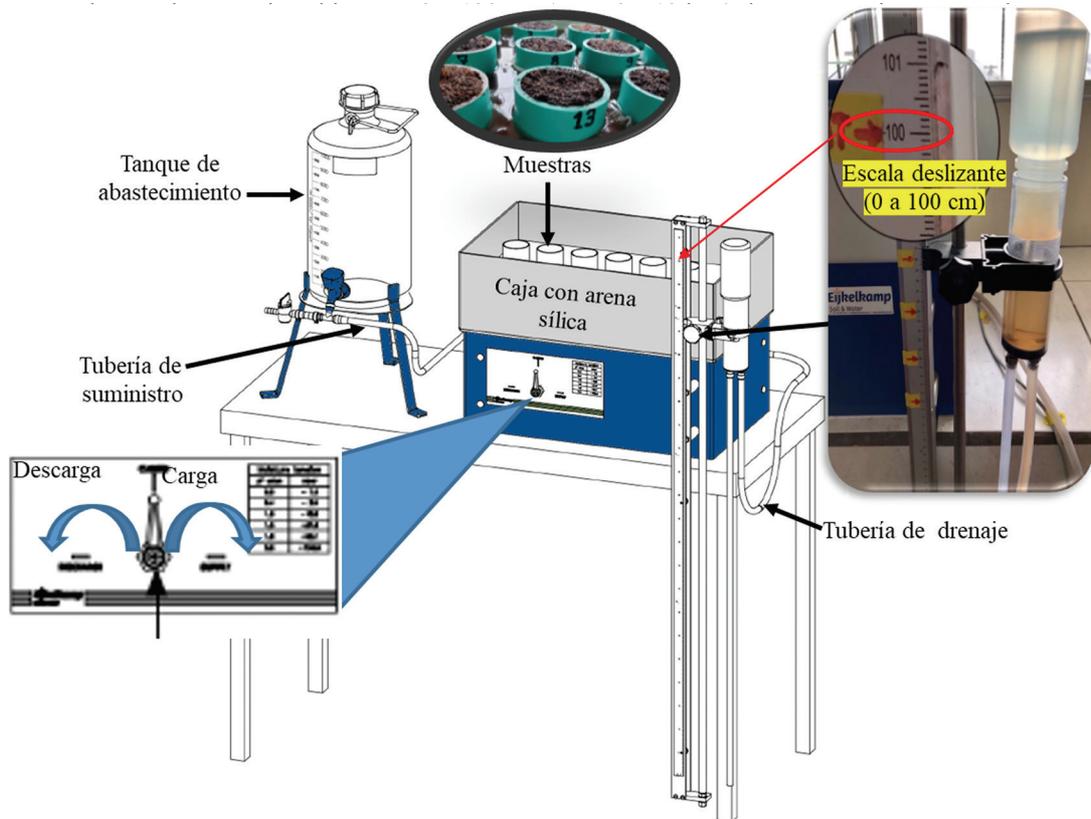


Figura 4. Equipo de “caja de arena” silica, con una columna de agua ajustable (0-100 cm) que permite someter muestras de sustrato a diferentes succiones ( $\psi_m$ ).

Para extraer las muestras de fibra de coco se utilizó un tubo metálico (52,5 mm) con bordes afilados (Figura 5a), el cual se hacía girar de forma circular y constante para cortar las fibras más largas y evitar su compactación y disturbación. La muestra se tomó horizontalmente en la parte media del perfil del sustrato (Figura 5b).

En este método se recolectaron 16 muestras de fibra de coco que se colocaron en cilindros estándar de 52,5 mm de diámetro y 46 mm de alto con un volumen de 97,691 mL, se enrasaron a la altura de cada cilindro con una navaja, y se cubrió con una malla 45 mesh sujeta con una liga en la base de los cilindros, para evitar la pérdida de

sustrato durante el pesado (Figura 5c). Los cilindros con las muestras se colocaron en una bandeja de plástico donde se realizaron 3 ciclos de saturación y drenaje (Figura 5d) para llenar los micro, meso y macroporos y así desplazar burbujas de aire. Finalmente, las muestras se dejaron con drenaje durante un periodo de 24 horas.

Después de saturar y drenar las muestras, se colocaron en la caja de arena, para hacer coincidir la columna de agua a 100 cm (10 kPa) con la altura media de los cilindros (23 mm) y se dejó estabilizar por una hora (Figura 6). Las succiones de la columna de agua de 0 a 100 cm se expresaron en kPa (10 a 100 cmca = 1 a 10 kPa).



Figura 5. Equipo de muestreo (a), toma de muestra (b), colocación de la muestra en el cilindro (c) y saturación de la muestra (d).

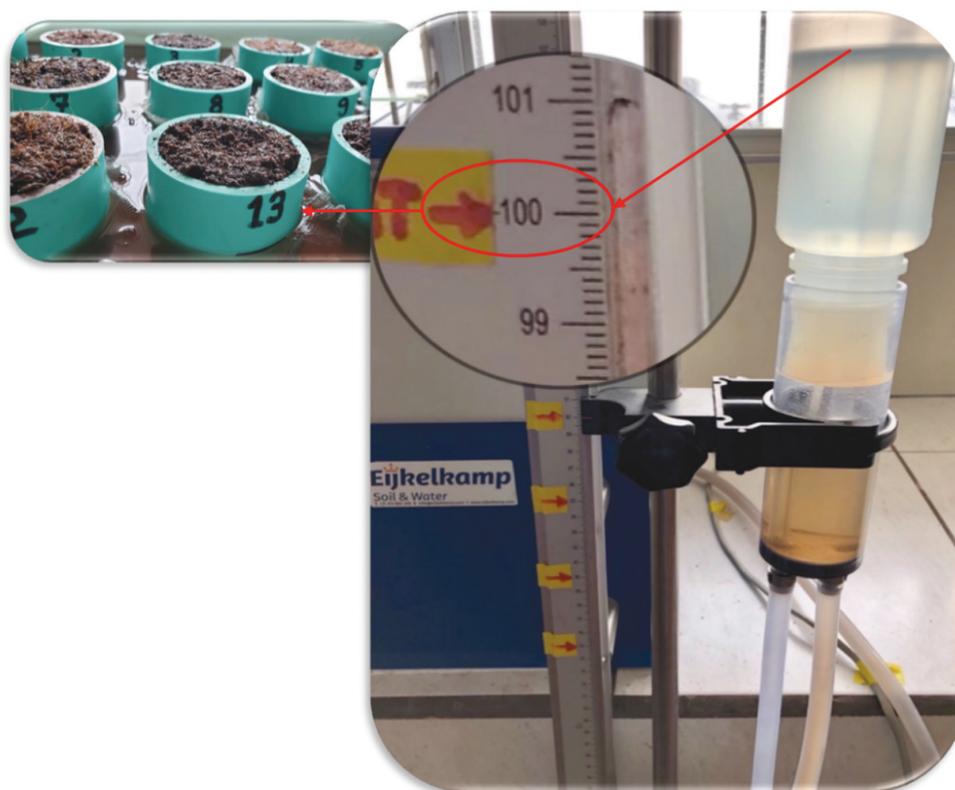


Figura 6. Estabilización de las muestras en la caja de arena, que coinciden con la columna de agua a 100 cm y la altura media de los cilindros.

Las muestras fueron progresivamente sometidas a 10 diferentes succiones ( $\psi_m$ ): 0,25 kPa; 0,5 kPa; 1,0 kPa; 1,5 kPa; 2,0 kPa; 2,5 kPa; 3,0 kPa; 5,0 kPa; 7,5 kPa y 10 kPa, coincidente con un día por cada  $\psi_m$  para un periodo de evaluación de 10 días. Para cada  $\psi_m$  se utilizaron 16 repeticiones. Cada día las muestras se pesaban en una balanza analítica (BOECO, BPS 40 plus), se ajustaba la columna de agua al siguiente  $\psi_m$  y se dejaban en estabilización para al día siguiente volver a determinar el peso húmedo, y así sucesivamente hasta completar los 10 puntos de  $\psi_m$  a los 10 días.

Al finalizar el periodo de 10 días de pesado de las muestras de sustrato húmedo sometidas a las diferentes succiones, estas fueron secadas en estufa (105°C) hasta peso constante. Seguidamente se determinó la DA, PT, CS y los porcentajes de  $\theta$  volumétrica ( $V.V^{-1}$ ) de las muestras sometidas a las 10 diferentes  $\psi_m$  desde 2,5 hasta 10 kPa, con el procedimiento descrito para el porómetro. La CA para cada  $\psi_m$  se obtuvo a partir de la diferencia entre PT (saturado a 0 kPa) menos el respectivo contenido de  $\theta$  en cada  $\psi_m$ .

Para determinar los distintos tipos de agua en el sustrato, se asumió que el contenido de  $\theta$  a 1 kPa correspondió a la  $\theta_{CC}$  y la  $\theta$  a 10 kPa al punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ). Adicionalmente, para verificar si el contenido de  $\theta$  a  $\psi_m$  de 1 kPa correspondió a la  $\theta_{CC}$  del sustrato, se colocaron 6 cilindros con muestras de sustrato dentro de la caja de arena sin ser sometidas a succión, al evitar el contacto de las muestras con la arena sílica.

El agua fácilmente disponible (AFD) se obtuvo a partir de la resta entre  $\theta_{CC}$  menos la humedad a 5 kPa ( $\theta_5$ ) mientras que el agua de reserva (AR) se estimó por la diferencia entre  $\theta_5$  menos  $\theta_{PMP}$ . La sumatoria de AFD más el AR totalizan el agua total disponible (ATD) para la planta (ATD = AFD + AR).

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de homogeneidad y heterocedasticidad y si se cumplían dichos supuestos, se procedió

a realizar un análisis de varianza. Cuando se detectaron diferencias significativas entre métodos, se procedió a la prueba de medias de Tukey a un nivel de significancia de 0,05. Para los análisis se utilizó el programa estadístico InfoStat Di Rienzo *et al.* (2008).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Granulometría.** El porcentaje acumulado de partículas gruesas según la escala porcentual de la columna de tamices basada en volumen (> a 2 mm) fue superior (54,2% v.v<sup>-1</sup>) que la distribución basada en peso (28,1% p.p<sup>-1</sup>; Figura 7). Consecuentemente, se presentó un comportamiento similar con el IG (tamaño > 1 mm), que fue mayor con base a volumen (80% v.v<sup>-1</sup>) y menor en base a peso (55% p.p<sup>-1</sup>).

El comportamiento anterior, probablemente se debió a que el sustrato es una mezcla de partículas granulares y fibras de diferente longitud que como mezcla tiene características propias. Sin embargo, al agitar el material y separar las fibras del material granular, estas por ser largas no atraviesan fácilmente los tamices y se quedan en la primera criba. Dicho comportamiento en cuanto a la variabilidad en la longitud de las fibrillas en sustratos a base de fibra de coco ha sido descrito por Sengupa y Basu (2016).

Al separar las fibras largas y el material granular en las diferentes cribas, la sumatoria de sus volúmenes individuales es mayor que cuando estos se encuentran en mezcla, debido al reacomodo de partículas de menor tamaño entre las fibras largas. Lo anterior sugiere que la distribución de partículas según escala de la columna de tamices (%V.V<sup>-1</sup>), según el tipo de sustrato, puede ser una medición subjetiva y consecuentemente inducir a interpretaciones erróneas. Por tanto, en el caso particular de la fibra de coco, sería recomendable utilizar la distribución porcentual en base al peso de los diferentes tamaños de partículas que quedan en las cribas.

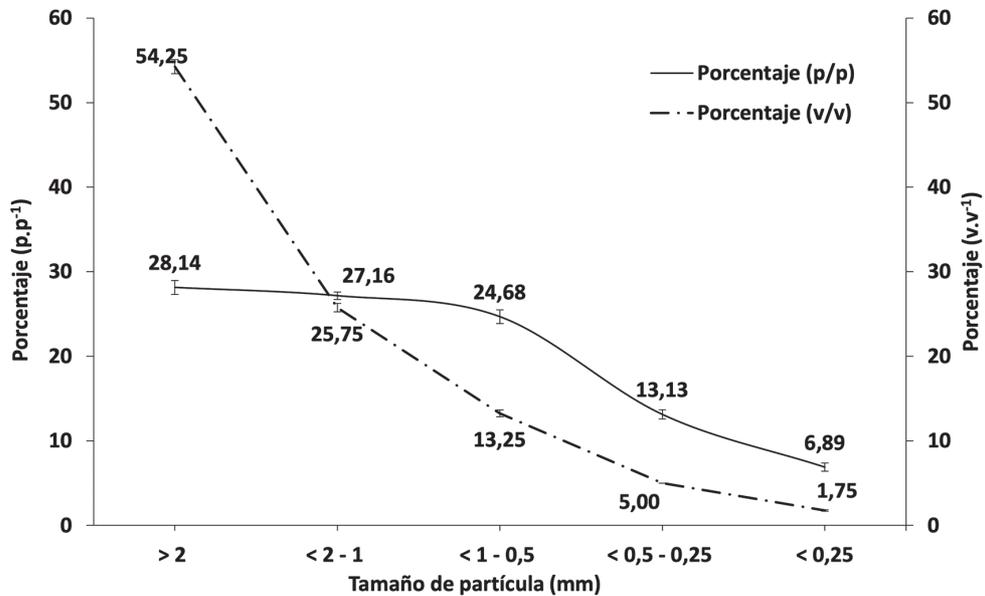


Figura 7. Distribución de tamaños de partículas en base a peso (%p.p<sup>-1</sup>) y según escala del texturómetro (%v.v<sup>-1</sup>) de un sustrato de fibra de coco (n = 8). Alajuela, Costa Rica.

Un IG alto, indica un mayor porcentaje de partículas gruesas que incrementa el contenido de macroporos y disminuye los microporos, lo que consecuentemente aumenta la CA y el drenaje, al disminuir la retención de  $\theta$ . Por otra parte, un bajo IG implica mayor porcentaje de partículas finas lo cual afecta drásticamente la CA y aumenta la retención de agua hasta afectar las raíces por hipoxia (Vargas-Tapia *et al.* 2008).

Un IG de 55% (p.p<sup>-1</sup>) en la fibra de coco, evidencia que hay un aceptable contenido de macroporos que le proveen una buena CA, aspecto importante para una adecuada oxigenación y el reacomodo de una gran masa de raíces en un contenedor con volumen reducido de sustrato, característico del sistema de cultivo sin suelo. Simultáneamente, una óptima CA favorece un adecuado drenaje de los aportes excesivos de agua. Sin embargo, aunque el IG permite visualizar la capacidad potencial de aireación y de drenaje del sustrato, este parámetro no permite conocer las cualidades hídrico-físicas tales como

la capacidad de retención de agua ( $\theta_{CC}$ ) y los diferentes tipos de agua (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018).

Otro parámetro que depende directamente de la granulometría es la capilaridad, la cual favorece el movimiento horizontal y vertical del agua que permite una distribución homogéneamente en todo el volumen del sustrato colocado en el contenedor. Para un sustrato grueso el agua aplicada drena por gravedad sin llegar a humedecer horizontalmente los bordes del sustrato; mientras que para un sustrato de una granulometría adecuada, la humedad se distribuye a lo ancho y profundo del contenedor para garantizar una buena uniformidad de humedecimiento y por tanto una buena colonización de las raíces en todo el volumen del sustrato (Martínez y Roca 2011).

**Propiedades físico-hídricas.** Los 3 métodos evaluados para el análisis físico del sustrato de fibra de coco, presentaron valores similares ( $p < 0,05$ ) de Da, CA, CC, PT y CS, que a la vez fueron comparados con valores óptimos (Tabla 1).

Tabla 1. Valores promedio de las variables evaluadas con los 3 métodos de análisis de características físicas de sustratos. 2020, Alajuela, Costa Rica.

| Característica física                        | Contenedor "in situ" | Porómetro | Caja de arena | Óptimo              |
|--|----------------------|-----------|---------------|---------------------|
| Densidad aparente (DA= g.cm-3)               | 0,083 (a)            | 0,075 (b) | 0,096 (a)     | 0,4 <sup>1</sup>    |
| Capacidad de aireación (CA= %)               | 16,33 (a)            | 15,46 (a) | 15,13 (a)     | 15–30% <sup>2</sup> |
| Capacidad de contenedor ( $\theta_{CC}$ = %) | 74,98 (a)            | 75,56 (a) | 77,18 (a)     | 55–70 <sup>2</sup>  |
| Porosidad total (PT= %)                      | 91,32 (a)            | 91,03 (a) | 92,25 (a)     | >85% <sup>2</sup>   |
| Componente sólido (CS= %)                    | 8,68 (a)             | 8,97 (a)  | 7,75 (a)      | <15% <sup>2</sup>   |

<sup>1</sup>Abad *et al.* (1993), <sup>2</sup>Ansorena (1994).

Únicamente, el método de caja de arena obtuvo una  $\theta_{CC}$  ligeramente superior ( $\pm 1,62\%$ ) a los otros métodos, pero sin diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ), lo cual desde el punto de vista práctico no tendrían mayor efecto sobre el manejo del riego del cultivo. Las variaciones observadas pueden ser atribuidas a una mayor evaporación desde la superficie húmeda y expuesta de las muestras de sustrato en el porómetro y contenedor in “situ” donde la evaporación no es totalmente controlable. En la caja de arena al ser un sistema cerrado con tapa, la pérdida de agua por evaporación es mínima.

Por otra parte, deben tenerse en cuenta i- la forma y tamaño del contenedor y ii- la alteración de la estructura del sustrato al recolectar la muestra, ya que el potencial hídrico total ( $\psi_T$ ) de un sustrato es la suma de  $\psi$  matricial de las partículas sólidas ( $\psi_m$ ),  $\psi$  osmótico ( $\psi_o$ ),  $\psi$  de presión ( $\psi_p$ ) y  $\psi$  gravitacional ( $\psi_g$ ). En un sustrato estabilizado después de cesar el drenaje, bajo condiciones atmosféricas y calidad de agua equivalente, el  $\psi_o$  y el  $\psi_p$  es similar en todas las muestras independiente de la forma del recipiente, mientras que, por el contrario, el  $\psi_g$  incrementa a mayor altura del contenedor (Fonteno 1993, Cannavo y Michel 2013).

Diferentes estudios han demostrado que la morfología del recipiente puede afectar la  $\theta_{CC}$  (Arguedas *et al.* 2006, Gómez *et al.* 2019), debido al efecto de la gravedad sobre el contenido de agua en el perfil del sustrato conforme varía la forma del contenedor. Para un mismo tipo y

volumen de sustrato, hay un mayor  $\psi_g$  conforme incrementa la altura del sustrato en el contenedor, lo anterior se evidencia en un gradiente de mayor  $\theta$  desde el estrato superior hacia las capas inferiores, hasta alcanzar una zona saturada en el estrato más bajo.

Dicha saturación ocurre debido a que, en el cultivo en contenedor, a diferencia de suelo, se corta la columna de agua al tener un límite del contenedor en la parte inferior. La altura del perfil saturado es prácticamente constante, por lo que al pasar de un contenedor alto y angosto a otro más bajo y ancho, el contenido de agua almacenada incrementa (Handreck y Black 2002).

En este estudio, la forma de los recipientes utilizados en cada uno de los 3 métodos probablemente tuvo poco efecto sobre los resultados de las propiedades físicas de los sustratos, ya que la proporción entre altura y ancho se mantuvo constante en 1:1. Sin embargo, es un factor esencial para considerar cuando se evalúan las características físicas de un sustrato, ya que puede inducir a errores importantes cuando al renovar un cultivo se cambia el tipo de contenedor.

Adicionalmente, es imprescindible tener un protocolo definido para la toma de la muestra, ya que una fuerte manipulación del sustrato puede afectar los parámetros físicos del sustrato. En el método de caja de arena al utilizar cilindros estándar (Eijkelkamp Soil & Water 2019), la recolección y posterior colocación de muestra en los cilindros, implica mayor manipuleo, lo que podría alterar la estructura del sustrato. En

el caso del contenedor in situ, la tabla de coco comprimida se colocó entera en el contenedor y se hidrató sin manipular el sustrato.

La DR obtenida ( $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$ ) por el método del picnómetro (Ansorena (1994), relaciona el peso seco de las partículas sólidas con el volumen del CS de la fibra de coco, sin incluir, el volumen total de poros (macroporos + microporos + ultramicroporos), por lo cual es característica según la naturaleza del sustrato. El valor obtenido ( $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$ ) fue similar a otros valores para fibra de coco reportados por Abad *et al.* (1993) y Vargas-Tapia *et al.* (2008) y a otros valores reportados por la marca comercial (Fico) de las tablas de fibra de coco utilizadas en este estudio.

La DA representa la relación entre el peso seco y el volumen total del sustrato que incluye la PT y el CS. Los valores de DA de la fibra de coco evaluada fueron bajos, con variaciones leves ( $p > 0,05$ ) desde  $0,075 \text{ g.cm}^{-3}$  con el porómetro hasta  $0,096 \text{ g.cm}^{-3}$  con la caja de arena (Tabla 1). Por tanto, indistintamente del método, los bajos valores de DA afectaron directamente la proporción entre PT y CS, que favoreció el incremento del contenido de macroporos ( $>$  aireación) y una reducción en el CS. Además, valores bajos de DA, representan una ventaja desde el punto de vista práctico, ya que está directamente relacionada con un menor peso del sustrato, lo que facilita su manipulación durante el establecimiento del cultivo (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018), sobre todo cuando son grandes áreas de cultivo. Cabe mencionar que la DA obtenida mediante los 3 métodos fue muy similar a la reportada en otros estudios para este tipo de material orgánico (Rhie y Kim 2017).

Al ser un material liviano como consecuencia de una baja DA, no hubo diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) entre métodos en los valores de PT, CA y CS, con variaciones  $< 1\%$  entre CA y de  $< 1,5\%$  en PT (Tabla 1). Esto demuestra que los 3 métodos son fiables para evaluar dichas variables. La PT promedio de los 3 métodos (91,5%) incluyó el volumen total de poros (macroporos, mesoporos, microporos y ultramicroporos)

correspondientes a los componentes promedio de aireación (15,64%) y de agua (75,91%).

Cuando el sustrato alcanzó progresivamente la saturación, el aire que ocupaba los poros grandes entre partículas fue desplazado por el agua, la cual posteriormente drena por efecto de la gravedad mediante desalojo progresivo de los macroporos, y así nuevamente al aire pasa a ocupar dichos poros, hasta cesar el drenaje. En ese momento, el agua almacenada a capacidad de contenedor ( $\theta_{CC}$ ) en los mesoporos, microporos, ultramicroporos, alcanzó un promedio de 75,91%.

Para realizar un buen manejo del riego es importante el equilibrio entre capacidad de aireación y retención de agua, ya que facilita el manejo del riego y minimiza los efectos de aplicaciones deficientes o excesivas de agua. Para determinar esta relación, se utilizan la curva de liberación de aire-agua en el sustrato (Figura 8), la cual relaciona la succión de retención del agua (kPa) con el contenido de  $\theta$  (%) en el sustrato (Soto 2018).

El dato de agua total almacenada en un sustrato ( $\theta_{CC}$ ) no es suficiente información para realizar un manejo eficiente del riego, y por tanto se requiere conocer su distribución en los diferentes tipos de agua. Al respecto, el método de caja de arena, comparado con los otros métodos, permitió construir la curva de desorción de agua y de aire del sustrato desde  $\theta_{CC}$  (77,18%) hasta  $\theta_{PMP}$  (52,35%) y con ello determinar los diferentes tipos de agua en el sustrato (Figura 2). De esta forma se obtuvo el AFD (23,62%) para la planta almacenada en los mesoporos, el AR (2,37%) que se aloja en los microporos y el AND (51,28%) para la planta retenida con alta succión en los ultramicroporos. Altos contenidos de AND se presentan en sustratos muy finos, los cuales, a pesar de retener mucha agua, la mayor parte no es disponible para la planta, aunado a una condición de hipoxia que induce a la muerte de las raíces (Drzal *et al.* 1999, Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018).

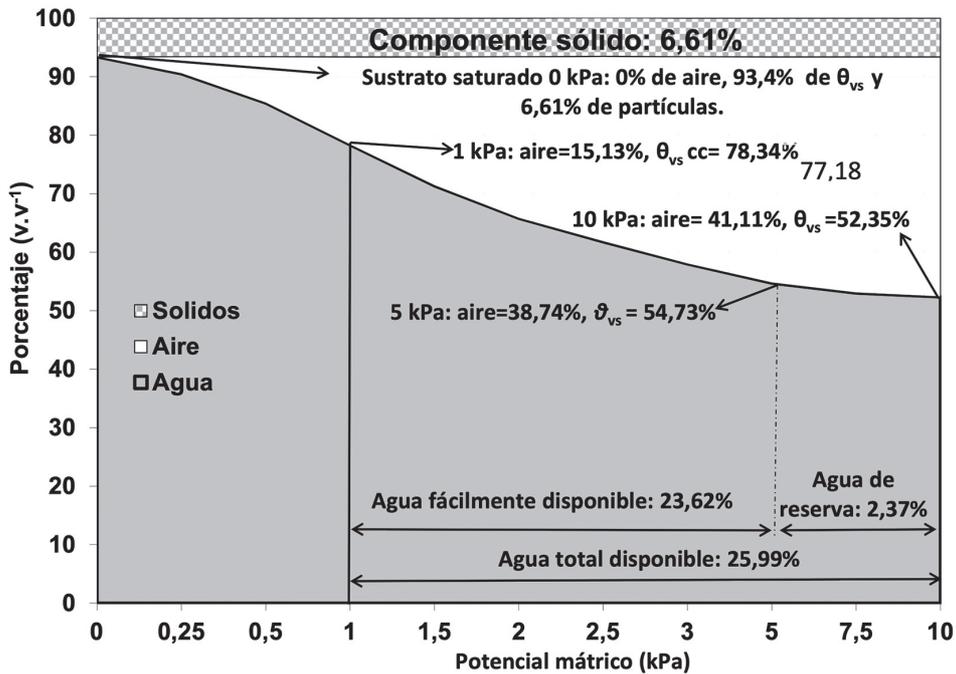


Figura 8. Curva de liberación de agua y aire de un sustrato de fibra de coco, evaluado mediante el método de "caja de arena". Alajuela, Costa Rica, 2020.

La  $\theta_{CC}$  de la fibra de coco (77,18%, Figura 8) fue superior al rango óptimo (50 - 70%) según Ansorena (1994). El contenido de agua total disponible (ATD= 25,9%) para la planta, almacenada entre  $\theta_{CC}$  (1 kPa) y  $\theta_{PMP}$  (10 kPa) se distribuyó en AFD (23,6%=  $\theta_{CC} - \theta_5$ ) y AR (2,37%=  $\theta_5 - \theta_{10}$ ).

A continuación, se describe la dinámica de agua en la interacción sustrato-planta-atmósfera según una curva de liberación de  $\theta$  y aire obtenido por el método de caja de arena (Figura 8). Durante el proceso de saturación del sustrato, el agua desplazó el aire que ocupa los espacios entre partículas (macroporos) hasta alcanzar la saturación completa. En este punto, el contenido de agua es equivalente a la PT (92,25%) y ocupó la totalidad de poros (macro, meso y microporos y ultramicroporos), por lo que la CA

es 0% mientras que el CS (7,75%) se mantuvo constante.

Posteriormente, inició el proceso de drenado por efecto del potencial gravitacional ( $\psi_g$ ), el cual cesó a un  $\psi_m$  de 1 kPa, donde el total de agua que quedó almacenada correspondió a la  $\theta_{CC}$  (77,18%) con una CA de 15,13%. La  $\theta_{CC}$  del sustrato obtenida (77,18%) fue corroborada al colocar 4 muestras testigo dentro de la caja de arena, que drenaron libremente sin ser sometidas a succión al aislarlas del contacto directo con el lecho de arena sílica. Dichas muestras mantuvieron un contenido de  $\theta$  ligeramente constante (77,18%) al final de los 10 días de evaluación, el cual fue muy similar al contenido de  $\theta_{CC}$  obtenido en la fibra de coco (77,18%) con el método de caja de arena (Figura 9).

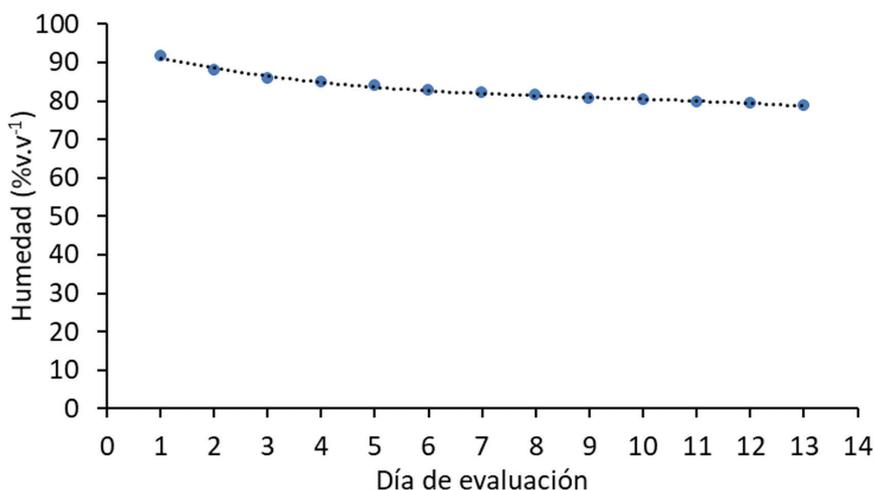


Figura 9. Evolución del contenido de humedad de muestras de sustrato de fibra de coco después de saturación y drenaje, sin someter a succión en el método de caja de arena (n= 6).

A partir de la descripción de la dinámica del agua según la Figura 8, una vez que el drenaje cesa y se estabiliza el contenido de  $\theta$  en el sustrato a  $\theta_{CC}$  (77,18%), las plantas para extraer agua al sustrato aplican una succión por medio del flujo de transpiración desde las raíces hasta las hojas. Después del amanecer, conforme incrementa la radiación solar aumenta progresivamente la demanda hídrica del cultivo y simultáneamente el sustrato se seca poco a poco como resultado de la extracción que realiza la planta. Conforme este proceso de transpiración y secado avanza durante el día, la planta paulatinamente tiene que ejercer cada vez mayor succión para abastecer el flujo de transpiración requerido. Si no se repone agua mediante el riego, el  $\psi_m$  con que las partículas sólidas retienen el agua aumenta gradualmente hasta alcanzar el PMP, en el cual el agua no es disponible para la planta (AND), ya que el  $\psi_m$  con que las partículas sólidas retienen el agua es superior al que la planta es capaz de ejercer para extraer agua del sustrato (Noguera *et al.* 2000, Martínez y Roca 2011, Gohardoust *et al.* 2020).

En el presente estudio, la  $\theta_{CC}$  del sustrato (77,18%) fue ligeramente superior al máximo valor dentro del rango óptimo (70%) según

Ansorena (1994), del cual una alta proporción es AND (52,35%). Esto probablemente estuvo relacionado con el hecho de que este sustrato posee casi un 45% de partículas de tamaño inferior a 1 mm, de las cuales hay un 20% de partículas finas < a 0,5 mm. La fracción de tamaño de partículas comprendidas entre 0,1 y 1,0 mm es la más determinante en las propiedades físicas de los sustratos, lo cual consecuentemente se reflejó en una retención de  $\theta$  ligeramente superior al óptimo (Prasad y Chualáin 2004, Anicua *et al.* 2009).

No obstante, aunque la  $\theta_{CC}$  de la fibra de coco evaluada fue alta (77,18%), al mismo tiempo la CA (15,3%) fue óptima, ya que se mantuvo dentro de los rangos recomendados (15 a 30%) según Ansorena (1994). La CA (macroporos) es una característica esencial en un sistema de cultivos sin suelo, ya que el sistema radical tiene una alta demanda de oxígeno debido a una alta actividad metabólica y de crecimiento. Además, dicha propiedad es lo que permite que un gran volumen de raíces de una planta pueda acomodarse en un pequeño volumen de sustrato confinado en un pequeño espacio en contenedor (Abad *et al.* 2004, Chamindu Deepagoda *et al.* 2013b).

De acuerdo con lo investigado, cabe destacar que el paradigma de “sustrato ideal” es difícil de obtener, sin embargo, es aceptable afirmar que “no hay sustrato malo”, ya que si se conocen sus características físicas, se puede implementar una adecuada estrategia de manejo del riego adaptada a las características del sustrato y así evitar problemas derivados de déficit o de excesos de riego.

## CONCLUSIONES

No hubo diferencias entre los métodos evaluados, en los valores de densidad aparente, capacidad de aireación, contenido de humedad a capacidad de contenedor, porosidad total y de componente sólido del sustrato de fibra de coco. Por tanto, cualquiera de estos métodos podría ser utilizado para determinar las características físicas de un sustrato. No obstante, los métodos de porómetro y contenedor “in situ” por su sencillez, practicidad y bajo costo serían muy recomendables para utilizar a nivel de finca. Sin embargo, estos no permiten la elaboración de la curva de liberación de agua y de aire y la determinación de los diferentes tipos de agua en el sustrato.

Por su parte, el método de caja de arena tiene la ventaja adicional de que permite construir la curva característica de desorción de agua y de aire y con ello determinar los diferentes tipos de agua en el sustrato. Esta información es útil para diseñar diferentes estrategias de manejo del riego, basado en la determinación del volumen de riego a partir de un porcentaje de agotamiento del agua total disponible.

## AGRADECIMIENTO

Al técnico especializado Julio Vega por su valioso apoyo en el proceso de investigación.

## LITERATURA CITADA

- Abad, M; Martínez, P; Martínez, M; Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas Hort.* 11:141-154.
- Abad, M; Noguera, P; Carrión, B. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *In* Urrestarazu, M (ed.). *Tratado de Cultivo Sin Suelo*. Madrid, España, Mundi-Prensa. p. 113-158.
- Acuña, RA; Bonachela, S; Magán, JJ; Marfà, O; Hernández, JH; Cáceres, R. 2013. Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates physical properties and crop production. *Elsevier B.V* 160(2):139-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.031>
- Anicua, SR; Gutiérrez, CMC; Sánchez, GP; Ortiz, SC; Volke, HVH; Rubiños, PJE. 2009. Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agric. Téc. Méx.* 35:147-156.
- Ansorena, MJ. 1994. *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Madrid, España, Mundi Prensa. 167 p.
- Arguedas, F; Lea-Cox, J; Méndez, CH. 2006. Calibration of ECH20 Probe Sensors to Accurately Monitor Water Status of Traditional and Alternative Substrates for Container Production. *SNA Research Conference: Water Management* 51:501-505.
- Bracho, J; Pierre, F; Quiroz, A. 2009. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado Lara, Venezuela (en línea). s.l., s.e. Consultado 23 oct. 2021. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85714162006>
- Cannavo, P; Michel, JC. 2013. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae* 151:11-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.021>
- Carlile, WR; Cattivello, C; Zaccheo, P. 2015. Organic Growing Media: Constituents and Properties. *Vadose Zone Journal* 14(6):2014.09.0125. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>
- Castro, S; Aldrete, A; López, J; Ordaz, V. 2019. Physical and chemical characterization of substrates based on pine bark and dust. *Madera y Bosques* 25(2):e2521520.
- Chamindu Deepagoda, TKK; Chen Lopez, JC; Møldrup, P; de Jonge, LW; Tuller, M. 2013a. Integral parameters for characterizing water, energy, and aeration properties of soilless plant growth media. *Journal of Hydrology* 502:120-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.031>
- Chamindu Deepagoda, TKK; Møldrup, P; Tuller, M; Pedersen, M; Chen Lopez, JC; Wollesen de Jonge, L; Kawamoto, K; Komatsu, T. 2013b. Gas Diffusivity-Based Design and Characterization of Greenhouse Growth Substrates. *Vadose Zone Journal* 12(3):vzj2013.03.0061. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2013.03.0061>
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2008. *InfoStat*, versión

- 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Drzal, MS; Fonteno, WC; Cassel, DK. 1999. Pore fraction analysis: A new tool for substrate testing. *Acta Hort.* 481:43-51.
- Eijkelkamp Soil & Water. 2019. Sandbox for pF-determination, User manual (en línea). s.l., s.e. 25 p. Consultado: 22 jun. 2021. Disponible en <https://www.eijkelkamp.com/producten/laboratorium-apparatuur/set-voor-pf-bepalingen.html>
- Fonteno, WC. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulture* 342:197-204.
- Fonteno, WC; Harden, CT. 2003. Procedures for determining physical properties of horticultural substrates. En NCSU Porometer. Manual (en línea). Horticultural Substrate Laboratory, North Caroline State University, Raleigh, USA. Consultado: 18 jul. 2021. Disponible en [https://projects.ncsu.edu/project/hortsublab/pdf/porometer\\_manual.pdf](https://projects.ncsu.edu/project/hortsublab/pdf/porometer_manual.pdf)
- Gayosso-Rodríguez, S; Borges-Gómez, L; Villanueva-Couoh, E; Estrada-Botello, EA; Garruña, R. 2018. Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia* 52:639-652.
- Gohardoust, MR; Bar-Tal, A; Effati, M; Tuller, M. 2020. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy* 10(9):1403. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gómez, A; Reyes, J; García, E; Pimentel, J; Silos, H. 2019. Efecto de la orientación y forma de contenedor sobre el crecimiento y desarrollo de chile ancho cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(22):43-51. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1857>
- González, L; Solís, N; Oses, M. 2015. Situación Actual del cultivo de fresa en la región Central Occidental. San Pedro de Poás de Desarrollo Rural. Alajuela, Costa Rica. p. 15.
- Handreck; KA; Black, N. 2002. Growing media for ornamental plants and turf. 3 ed. Australia, UNSW Press. 542 p.
- López-Baltazar, J; Méndez-Matías, A; Pliego-Marín, L; Aragón-Robles, E; Robles-Martínez, ML. 2013. Evaluación agronómica de sustratos en plántulas de chile 'onza' (*Capsicum annum*) en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (6):1139-1150.
- Martínez, P; Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo (en línea). 1 ed. s.l., Editorial Universidad Nacional de Colombia. p. 37-77 Consultado 23 oct. 2021. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/237100771>
- Noguera, P; Abad, M; Noguera, V; Puchades, R; Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically friendly peat substitute. *Acta Hort.* 517:279-288.
- Ortega, ML; Martínez, VC; Ocampo, MJ; Sandoval, CE; Pérez, AB. 2016. Efficiency of substrates in soil and hydroponic system for greenhouse tomato production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3):643-653.
- Prasad, M; Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Hort.* 648:161-166. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.19>
- Quesada, RG; Méndez, SC. 2005. Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana* 16(2):171-183.
- Rhie, YH; Kim, J. 2017. Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations. *HortScience* 52(1):162-166. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11362-16>
- Rivière, LM; Caron, J. 2001. Research on substrates: state of the art and need for the coming 10 years. *Acta Horticulturae* 548:29-42. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.1>
- Sengupta, S; Basu, G. 2016. Properties of Coconut Fiber. In Saleem, H (ed.). Reference module in materials science and materials engineering. Oxford, Elsevier. p. 1-20.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2):59-73. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33779>
- UNE-EN-12579 (Una Norma Española-European Norm). 2000. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Toma de muestras. Madrid, España, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 11 p.
- UNE-EN-13041 (Una Norma Española-European Norm). 2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Madrid, España, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 24 p.
- Vargas-Tapia, P; Castellanos-Ramos, JZ; Sánchez-García, P; Tijerina-Chávez, L; López-Romero, RM; Ojodeagua-Arredondo, JL. 2008. Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(4):375-381. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.375>



