

## ELECCIÓN DEL SUSTRATO Y MANEJO DEL RIEGO UTILIZANDO COMO HERRAMIENTA LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA

LILIA BEATRIZ VENCE<sup>1\*</sup>; OSVALDO RUBÉN VALENZUELA<sup>2</sup>; HÉCTOR ALEJANDRO SVARTZ<sup>3</sup> & MARTA ELVIRA CONTI<sup>4</sup>

Recibido: 24-01-13

Recibido con revisiones: 23-06-13

Aceptado: 27-06-13

### RESUMEN

La relación entre el contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ) y potencial mátrico ( $\psi$ ) se grafica como una curva de retención de agua (CR) que expresa el proceso de desorción del agua de un medio poroso. La modelización según van-Genuchten representa la distribución del tamaño de poros relacionada con aspectos estáticos del agua-aire. Sin embargo, la disponibilidad de agua para las raíces tiene que ver con aspectos dinámicos de resistencias del sustrato al flujo de agua. Dentro de este marco, los objetivos del trabajo fueron 1) Determinación de los parámetros que identifican las propiedades del equilibrio estático y dinámico referidas a la relación agua aire en dos sustratos y 2) Definición de los criterios básicos para el momento de aplicación del riego y elección de la altura del contenedor según los sustratos evaluados. Se determinaron la capacidad de retención de agua, agua fácilmente disponible y agua de reserva en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, se trazaron las CR y las curvas de conductividad hidráulica no saturada, según van-Genuchten. Los parámetros determinados en M1 y M2 han servido de base para conocer su relación agua-aire, sin embargo al trazar las CR se obtuvo información acerca de la presión de entrada de aire, mayor en M2 que en M1, asociadas a la "tabla de agua" que se forma en la base del contenedor. La CR sirvió de base para estimar la conductividad hidráulica no saturada, permitiendo cuantificar los umbrales de riego. Toda la información conjunta resultó apropiada para la elección del sustrato y del contenedor adecuado, y del criterio de manejo del riego, demostrando que la CR es una buena herramienta para estimar estos factores dentro de una visión sistémica. Los resultados deberían ser calibrados para cada cultivo.

**Palabras clave.** Curvas de liberación de agua, contenido hídrico volumétrico, potencial mátrico, conductividad hidráulica.

### WATER RETENTION CURVES AS A TOOL IN THE SELECTION OF A PLANT-GROWING SUBSTRATE AND THE WATERING SCHEME

#### ABSTRACT

The relationship between the volumetric water content ( $\theta$ ) and the water potential ( $\psi$ ) is represented by the function  $\theta = f(\psi)$  which depicts a water retention curve representing the process of water desorption in a porous media. This model, according to van-Genuchten, represents the pore-size distribution associated with air-water steady state. However, water availability for root uptake is a function of substrate resistance to water flowing. In this framework, the objectives of this study are to 1) determine the parameters which indicate both the static and dynamic properties referred to the air-water relationship in two substrates and 2) select the basic criteria for the proper timing of irrigation as well as the selection of the substrate-container height. Water holding capacity, available water and water buffering capacity were determined in: M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego. The water retention and unsaturated hydraulic conductivity curves were graphed according to the volumetric water content and adjusted according to the van-Genuchten model. The physical parameters of both substrates were used to estimate their air-water behavior. However, when the adjusted curves were drawn, more detailed information was obtained on the air-entry tension, higher in M2 than in M1, associated to the "water table" which is formed in the container bottom. Thus, the water retention curve was also used in modeling the unsaturated hydraulic conductivity which allowed quantifying the irrigation thresholds. All information obtained was appropriate for the selection of the substrate and the proper container and irrigation management scheme. The water retention curve is a good tool for selecting both factors with a systematic view. These results should be calibrated for every crop.

**Key words.** Water release curves; volumetric water content; matric potential; hydraulic conductivity.

1 y 3 Facultad de Agronomía-sede Devoto, Universidad de Buenos Aires UBA, Cátedra de Jardinería, Laboratorio de Sustratos, Habana 3870, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

2 EEA INTA San Pedro, Ruta Nac. 9, Km 170, provincia de Buenos Aires, Argentina

4 CONICET y FAUBA, Cátedra de Edafología, Av. San Martín 4453, Ciudad de Buenos Aires

\* Autor de contacto: [vence@agro.uba.ar](mailto:vence@agro.uba.ar)

## INTRODUCCIÓN

### Relación agua-aire en los sustratos

La relación entre el contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ) y la fuerza con que dicha agua está retenida en los poros del sustrato, expresada como el estado energético del agua ( $\psi$ ) se representa por la función  $\theta = f(\psi)$ . Esta función se grafica como curva de retención de agua (CR) en la cual, el estado energético del agua se explica a través del potencial agua ( $\psi_a$ ). Dicha curva expresa la evolución del proceso de desorción del agua de un medio sólido poroso (Klute, 1986).

El movimiento del agua se produce desde los puntos de mayor a los de menor potencial agua y su valor, en un sistema a flujo no saturado, se obtiene como la suma algebraica de los componentes matricial ( $\psi$ ), osmótico ( $\psi_o$ ) y gravitatorio ( $\psi_g$ ):  $\psi_a = \psi + \psi_o + \psi_g$  (Raviv *et al.*, 2007). El agua retenida por el sustrato dentro de un contenedor (con su base perforada y en un sistema de riego superior) está sometida al efecto de distintas tensiones, aunque no todas con la misma injerencia en un momento dado. Si el sistema de estudio es el flujo de agua dentro de un contenedor, el potencial osmótico no lo afecta significativamente, pero cobra importancia si se estudia la interacción entre las raíces de las plantas y el sustrato (Hillel, 1998). El  $\psi_g$  en cada punto del sistema, es la expresión del nivel energético debido a la atracción gravitatoria y se toma por convención respecto a un plano de referencia que pasa por la base del contenedor (Hillel, 1998), por lo tanto está directamente relacionado con su altura. El potencial mátrico ( $\psi$ ), es uno de los componentes más importantes del potencial agua total ( $\psi_a$ ) en el sistema sustrato-planta ya que es la energía motora que provoca el flujo de agua en los sistemas no saturados y en las paredes celulares del tejido vegetal. Está relacionado con las fuerzas asociadas a los fenómenos de capilaridad, en la interfase agua-sólido-aire y su magnitud depende en gran parte del diámetro de los poros del sustrato aceptando que estos se asemejan a tubos capilares de formas cilíndricas (Lemaire *et al.*, 1989). Dentro del contenedor el potencial gravitatorio es importante durante el drenaje rápido, que dependerá de su altura y se puede considerar despreciable a partir del par  $\theta - \psi$  que se corresponde con la capacidad de contenedor (CC) y a partir de ese valor se puede considerar que el potencial agua total está definido por el valor del potencial mátrico (Raviv *et al.*, 2007). A los efectos prácticos en este trabajo se adoptó el término tensión en vez de potencial negativo de acuerdo a Hillel (1998).

La caracterización física de cualquier sustrato se basa en el estudio de la distribución de las tres fases (sólido, líquido y gaseoso) expresadas en unidades volumétricas. De las mediciones de las variables del contenido hídrico volumétrico en función del potencial surgen los parámetros que relacionan volúmenes relativos de agua y aire (de Boodt & Verdonck, 1972; Martínez Farré, 1992) en el rango 0 a 100 hPa, que brindan información básica del factor agua, útil para la programación del riego.

Según de Boodt & Verdonck (1972) el agua en los sustratos debe estar disponible a las más bajas tensiones posibles en ese rango (o sea mayores contenidos hídricos) mientras no limite el volumen de aire necesario para las raíces. El valor de la capacidad de retención de agua (CRA) en 10 hPa y del rango 10 a 100 hPa como agua disponible proviene de considerar que, en invernaderos en los años 1970, la mayor parte de las plantas se cultivaban en contenedores de 10 a 15 cm de altura y que el valor de 10 hPa sería próximo a la tensión correspondiente al fin del drenaje libre (capacidad de contenedor), mientras que 100 hPa como límite superior, está basado en resultados experimentales (de Boodt & de Waele, 1968). De acuerdo a estos autores, el agua disponible después del drenaje debería repartirse en 75-90% como agua fácilmente disponible liberada entre 10 a 50 hPa (AFD) y un 4-5% de agua de reserva (AR) entre 50 a 100 hPa, para ser usada por la planta en momentos de excesiva transpiración, durante repentinos aumentos de la temperatura dentro del invernadero (el resto sería agua difícilmente disponible). Este paradigma introducido por de Boodt, ha sido adoptado hasta nuestros días y el manejo del riego se ha condicionado a los materiales, contenedores y especies que se cultivan en la industria viverista moderna. Así surgen trabajos que relacionan la disponibilidad de agua a esas tensiones como umbral de riego y la productividad de la planta (Fonteno *et al.*, 1981; Karlovich & Fonteno, 1986; Rivière *et al.*, 1995; Heiskanen, 1995; 1997; Marfà *et al.*, 1998; Raviv & Wallach, 2007). Estos parámetros así definidos, basados en el análisis de los estados energéticos del agua, representan un promedio de lo que sucede en todo el volumen del contenedor. Sin embargo, introduciendo el concepto de capacidad de contenedor (White & Mastalerz, 1966), definido como el máximo volumen de agua que es retenida por el sustrato en un contenedor de altura  $h$  una vez saturado y dejando drenar libremente, se observa que en recipientes de alturas diferentes, la CC es menor cuanto mayor sea la altura, por lo tanto la elección del sustrato a utilizar según los requerimientos está directamente relacionada a la

altura del contenedor. Dentro del mismo contenedor el contenido volumétrico de agua es menor (más seco) en la superficie y llega próximo a la saturación en la base cuando el drenaje está a presión atmosférica (Spomer, 1974). Esa porción al límite de la saturación se denomina "tabla de agua" y su altura depende de la distribución del tamaño de poros del sustrato y es independiente de las características del recipiente. Dentro del contenedor, el contenido de agua sigue un gradiente vertical similar a la curva de retención de agua del sustrato (Fonteno, 1989). Martínez *et al.*, (1991) hallaron buena correlación entre los valores predichos por las CR y las humedades en distintas secciones verticales del contenedor, mientras Drzal *et al.* (1999) encontraron igual CC en una maceta troncocónica de 11 cm de altura que en una cilíndrica de 15 cm. Teniendo en cuenta la CC, para la elección del sustrato y el criterio del manejo del riego no sólo se debe tener en cuenta las características del sustrato sino en que contenedor será usado.

### Disponibilidad de agua

Según Fonteno (1993), la estimación del agua disponible se hace difícil por la falta de consenso en la definición. Analizando el término "agua disponible", Fonteno considera que hay dos componentes, "capacidad de agua disponible" y "disponibilidad de agua". Desde la física de suelos, se consideraría "capacidad de agua disponible" a la cantidad de agua retenida en la reserva del sustrato, que puede ser absorbida por las plantas (Cassel & Nielsen, 1986). Sin embargo el término "disponibilidad de agua" incluye la integración del tipo de planta (especie, cultivar, condición física, estado y distribución de raíces), condiciones de la rizósfera (gradiente de potencial agua en la interfase raíz-sustrato) y transporte hidráulico del sustrato (conductividad hidráulica no saturada cercana a la porción de raíces que absorben el agua) (Fonteno, 1993). El análisis de estos términos contribuye a poner de manifiesto un concepto de la disponibilidad de agua en equilibrio dinámico, en contraposición al equilibrio estático habitualmente empleado, además de considerar el efecto del tramado de las raíces en el sustrato.

Según Teres (2002), en el planteo energético se asume el concepto de equilibrio estático que implica el supuesto que el agua no se acumula ni se agota en las diferentes secciones del continuo sustrato-planta-atmósfera. En este marco teórico, dentro del contenedor se considera que en cada par  $\theta - \psi$  se alcanza el equilibrio y el potencial agua es constante en todos los puntos del contenedor y por lo

tanto, no hay movimiento de agua. En estas condiciones, la relación agua-aire en el perfil del sustrato viene dada en cada punto por el par  $\theta - \psi$ , donde  $\psi$  se obtiene como diferencia entre el potencial agua (constante) y el potencial gravitatorio que depende de la altura a la base del contenedor. Las CR se obtienen midiendo valores de los pares  $\theta - \psi$  en el rango de interés y luego modelizándolos para análisis, caracterización y comparación de los diferentes materiales, y es esencial representar la curva en forma paramétrica y continua (Wallach, 2008). Una expresión paramétrica no-lineal del modelo de la CR debería contener la menor cantidad de parámetros posible para simplificar la estimación y describir su comportamiento en los límites de la curva, y con un mejor ajuste en la parte menos lineal (Raviv *et al.*, 2002; Wallach, 2008) ya que las CR son funciones altamente no-lineales que presentan dificultad para ser ajustadas con precisión. El modelo de van-Genuchten (van Genuchten & Nielson, 1980; 1985), indicado como VG (Wallach, 2008) es el más ampliamente utilizado en sustratos (Orozco & Marfà, 1985; Karlovich & Fonteno, 1986; Fonteno, 1989; Milks *et al.*, 1989a, b y c; Wallach *et al.*, 1992a,b; Raviv *et al.*, 2001; Carmona *et al.*, 2003). La curva así modelizada representa la distribución de tamaño de poros del sustrato por la relación directa que existe entre el diámetro del poro y el potencial mátrico que en él se genera (ley de la capilaridad) (Danielson y Sutherland, 1986).

Estudios posteriores recomiendan determinar experimentalmente el valor máximo de saturación, en vez de asumirlo como la porosidad total y también para el contenido hídrico residual, a pesar de que en el modelo de VG se lo estima (Orozco, 1995; Wallach *et al.*, 1992a). Dichos autores recomiendan la determinación de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) como parte de las metodologías de rutina de caracterización de sustratos. A partir de este parámetro y de la CR es posible predecir las relaciones de la conductividad hidráulica no saturada ( $K_{ns}$ ):  $K_{ns}(\theta)$  o  $K_{ns}(\psi)$  mediante modelos como el propuesto por VG (Orozco 1995).

Los objetivos del presente trabajo fueron:

1) Determinación de los parámetros que identifican las propiedades del equilibrio estático y dinámico referidas a la relación agua aire en dos sustratos formulados con turba y perlita.

2) Definición de los criterios básicos para el momento de aplicación del riego y elección de la altura del contenedor según los sustratos evaluados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las determinaciones analíticas se realizaron en el Laboratorio de Sustratos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires y en el Laboratorio de Sustratos del IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries en Cabrils, Barcelona.

**Selección de materiales.** Los sustratos analizados en laboratorio fueron dos mezclas: M1, sustrato formulado con: 80% de perlita comercial + 20% de turba *Sphagnum* nacional de Tierra del Fuego y M2, formulado con 80% de turba *Sphagnum* nacional de Tierra del Fuego + 20% de perlita comercial, basadas en los valores de la CRA presentados por Vence *et al.* (2010) según método EN13041 para los mismos materiales puros: perlita (P) con CRA= 0,29 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> y turba *Sphagnum* de Tierra del Fuego (T) con CRA= 0,84 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. El criterio de elección fue que fueran materiales ampliamente utilizados en producción nacional y que tuvieran valores distantes en los parámetros relacionados con la disponibilidad de agua-aire para las raíces de las plantas (ver parámetros en la Tabla 1).

**Curvas de retención de agua (CR): pares  $\theta$  -  $\psi$  de la función  $\theta = f(\psi)$ :** El primer paso, fue obtener los pares  $\theta$  -  $\psi$  en M1 y M2, según método basado en la norma europea EN-13041 (2007) aplicándose 11 puntos de tensión (ver Tabla 2). El cero de tensión se calculó mediante fórmula:

$$PT = 1 - \frac{DSs}{DP} \quad (1)$$

donde: PT: es porosidad total; DSs es densidad de sustrato seca y DP es densidad de partícula obtenidas según método EN-13041. La caracterización se completó con el análisis granulométrico por el método de tamizado basado en EN-15428:2007.

**Curvas de retención de agua: Ajuste matemático de  $\theta = f(\psi)$ :** Con los valores medios de  $\theta$  obtenidos se realizó un ajuste siguiendo la metodología aplicada por Wallach *et al.* (1992b) y propuesta por Milks *et al.* (1989a) según el modelo

paramétrico no-lineal desarrollado por van Genuchten (1980) para suelos:

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (2)$$

donde:  $\theta(\psi)$ : es el contenido hídrico volumétrico v/v correspondiente a la tensión  $\psi$  aplicada,  $\theta_s$ : es el contenido hídrico volumétrico v/v a saturación,  $\theta_r$ : es el contenido hídrico volumétrico residual v/v experimental a la tensión 100 hPa,  $\alpha$  y  $n$  son parámetros relacionados respectivamente con la inversa de la presión de entrada de aire y la distribución de tamaño del poro y se calculan por el modelo de acuerdo al mejor ajuste ( $R^2$ ). Se adoptó como restricción  $n > 1$ , ya que con valores menores se obtuvieron resultados sin sentido físico, y  $m$  es un parámetro relacionado con  $n$ , adoptándose la relación

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{van Genuchten y Nielsen, 1985}).$$

Para estimar los parámetros se utilizó el programa GraphPad Prisma versión 4.0.

**Determinación de la Ks de M1 y M2:** se realizó en el Laboratorio de Sustratos del IRTA, Cabrils Barcelona, mediante un permeámetro de carga constante utilizado por Orozco (1995), construido siguiendo el procedimiento descrito por Klute & Dirksen (1986) modificado. Se asumieron los valores restrictivos del gradiente hidráulico (dH/dx) con respecto al rango de validez de la ley de Darcy para flujo laminar, determinados por da Silva *et al.* (1993) en tobas volcánicas y aplicados también por Orozco (1995) para perlitas expandidas, ya que M1 y M2 presentaron una similitud en la distribución de tamaño de partículas que las perlitas analizadas por Orozco (1995).

Los sustratos conteniendo una humedad gravimétrica del 50%, se dispusieron en columnas de 22 cm de altura y 9,2 cm de diámetro interno. Se los saturó lentamente con aplicación de flujo vertical ascendente para evacuar al máximo el aire de la muestra. Una vez saturados, se mantuvo el flujo de agua

Tabla 1. Caracterización física de los sustratos M1 y M2 según método EN13041. DSs: densidad de sustrato seca; PT porosidad total; CRA capacidad de retención de agua; CA capacidad de aireación; AFD agua fácilmente disponible; AR agua de reserva; ADD agua difícilmente disponible. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.

Table 1. Physical characterization of substrates M1 and M2 according to the EN13041 method. DSs: bulk density; PT total porosity; CRA: water holding capacity; CA: air-filled porosity; AFD: available water; AR water buffering capacity; ADD: non- available water; M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego.

	DSs	PT	CRA	CA	AFD	AR	ADD
Material kg m <sup>-3</sup>	.....cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> .....						
M1	89	0,97	0,35	0,62	0,15	0,04	0,16
M2	76	0,96	0,73	0,23	0,28	0,07	0,38

a través de la columna hasta alcanzar caudales de salida constante. La pérdida de carga fue medida por medio de tubos piezométricos en puntos que distan entre sí 15 cm. La ( $K_s$ ) se calculó como:

$$K_s = \frac{Q}{At} \times \frac{\Delta z}{\Delta h}$$

donde  $K_s$  = conductividad hidráulica de la muestra saturada ( $\text{cm min}^{-1}$ ),  $Q$  = es el volumen de agua que sale de la columna de sustrato saturado ( $\text{cm}^3$ ),  $A$  = área de la sección transversal de la columna ( $\text{cm}^2$ ),  $t$ : tiempo (min);  $\Delta z$ : distancia entre los piezómetros (cm),  $\Delta h$ : diferencia de carga medida como altura del agua de los piezómetros.

Según Mualem-van Genuchten las funciones de la conductividad se puede predecir según

$$K(\psi) = \frac{\left\{ 1 - (\alpha\psi)^{n-1} \left[ 1 + (\alpha\psi)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[ 1 + (\alpha\psi)^n \right]^{m/2}}$$

$$K(\theta) = \theta^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - \theta^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{donde}$$

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{es la saturación efectiva en función de } \theta_y$$

$$\theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad \text{es la saturación efectiva}$$

en función de la tensión  $\psi$

$K(\psi)$  es la conductividad relativa en función de  $\psi$ ;  $K(\theta)$  es la conductividad relativa en función de la saturación efectiva, y los parámetros  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  tienen el mismo significado que en la expresión (2). En el presente trabajo se consideró la  $K(\theta)$ , ya que cuando se predice la  $K_s$  a partir de los datos únicos de la curva principal de desorción, CR, sin tener en cuenta la histéresis, es más apropiado el uso de esta función, poco afectada por la histéresis (Mualem, 1986; Londra, 2010).

#### Determinación del punto de umbral de riego en base a $K_s$ :

A partir del momento en que la tensión  $\psi$  es mayor que la presión de entrada de aire en el sustrato, la conductividad hidráulica será a flujo no saturado. Se graficaron las funciones  $K_s(\theta)$  para M1 y M2. Los resultados obtenidos en los sucesivos valores de la función  $K_s(\theta)$  muestran que a bajas tensiones los pares  $K_s$ - $\theta$  mantienen una regresión lineal con un buen ajuste hasta un punto en que la curva  $K_s(\theta)$  se aparta de esta linealidad y se produce una brusca caída de la  $K_s$ . Se tomó como coeficiente de correlación  $R^2 = 0,97$  como el límite admitido para considerar un buen ajuste de la regresión y se de-

terminó que a partir de ese punto la  $K_s$  comienza a tomar valores no deseados por el comienzo de la brusca caída del flujo de agua hacia las raíces (Marfá & Orozco, 1995; Cáceres, 2002). Por lo tanto, se determinó este valor de  $K_s$  ( $\theta$ ) y su correspondiente par de  $\theta$ - $\psi$  como el momento donde es necesario regar para permitir que se restablezca el flujo de agua disponible en ese sustrato.

**Análisis estadístico:** La muestra de laboratorio de cada material fue sometida a los métodos de medición de variables con un tamaño muestral de 3 repeticiones independientes. Los resultados fueron sometidos a análisis de la varianza verificándose que se cumplan los supuestos de independencia de datos, distribución normalidad de las poblaciones y homocedasticidad de sus varianzas. Se realizaron prueba  $t$  en el caso de comparación de dos medias y test de LSD Fischer para comparaciones múltiples de medias con el software estadístico InfoStat 1.1. de la Cátedra de Estadística y Biometría y de Diseño de Experimentos de la Universidad Nacional de Córdoba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización física de los sustratos M1 y M2 y del análisis granulométrico se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 1 respectivamente. Ambos sustratos presentaron una PT alta y con valores similares, adecuada para contenedores de baja altura donde es recomendable un alto volumen de poros. Sin embargo, las dos formulaciones M1 y M2 presentaron valores distantes de las relaciones agua-aire, de acuerdo al criterio de su elección, resultantes de la alta CRA que posee la turba y la alta capacidad de aireación a 10 hPa de la perlita (Vence *et al.*, 2010). Los rangos de 0 a 10 hPa, 10 a 50 hPa y 50 a 100 hPa estudiados en la caracterización clásica a través de los parámetros CRA, AFD, AR dan una información básica para la toma de decisión del momento del riego, sin embargo se pierde información valiosa de los pares  $\theta$ - $\psi$  entre los rangos. Una información más detallada de las características de M1 y M2 se muestra en la Tabla 2 mediante los valores medios de los pares de la función  $\theta = f(\psi)$  medidos. En ese sentido, la medición a 5 hPa brinda información útil para la recomendación para el uso de sustratos en bandejas multiceldas de baja altura. Debido al alto valor de  $\theta$  en el sustrato M2, se recomienda su uso para bandejas de germinación con semillas que requieren un ambiente muy húmedo, mientras que M1 con bajo valor de  $\theta$ , podría adecuarse a bandejas de enraizamiento de esquejes que requieran alta aireación.

A partir del ajuste de los valores  $\theta$ - $\psi$  según VG, se han graficado las CR (Figs. 2 a y b). El valor de la tensión para

Tabla 2. Valores medios del contenido hídrico volumétrico ( $\theta$ ) de los sustratos M1 y M2 en función de la tensión aplicada ( $\psi_m$ ) según método EN13041. M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego. M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego, cv%: coeficiente de variación de tres repeticiones.  
 Table 2. Volumetric water content averages ( $\theta$ ) for substrates M1 and M2 as a function of the applied tension ( $\psi_m$ ) according to the EN13041 method; M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego, cv% coefficient of variation among three replicates.

$\psi_m$ hPa	M1		M2	
	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cv %	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cv %
0	0,96 a	0,01	0,97 a	0,10 *
5	0,45 b	6,37	0,88 b	3,35 *
10	0,35 c	3,64	0,73 c	4,55 *
15	0,32 d	2,70	0,63 d	6,16 *
20	0,29 e	2,82	0,55 e	5,23 *
25	0,27 e	2,41	0,50 f	4,74 *
30	0,25 f	1,99	0,45 g	6,46 *
40	0,22 g	2,00	0,40 h	4,22 *
50	0,20 h	2,88	0,37 hi	2,29 *
60	0,19 hi	3,38	0,36 ij	3,45 *
80	0,17 ij	7,16	0,32 jk	3,27 *
100	0,16 j	8,82	0,31 k	2,47 *

Medias por columnas con una letra común no son significativamente diferentes según prueba LSD Fischer ( $p \leq 0,05$ ).

Medias por filas: \* presentan diferencias significativas según prueba t ( $p \leq 0,05$ ).

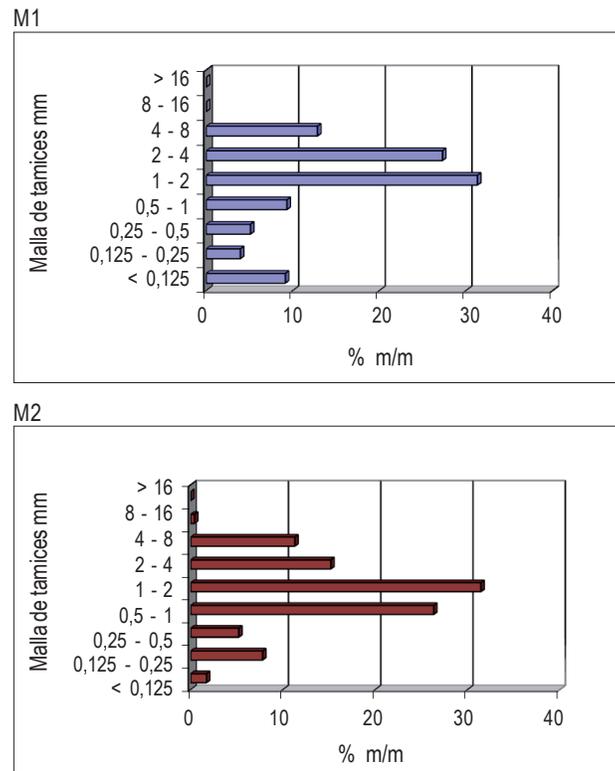


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula de M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.  
 Figure 1. Particle size distribution of M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego.

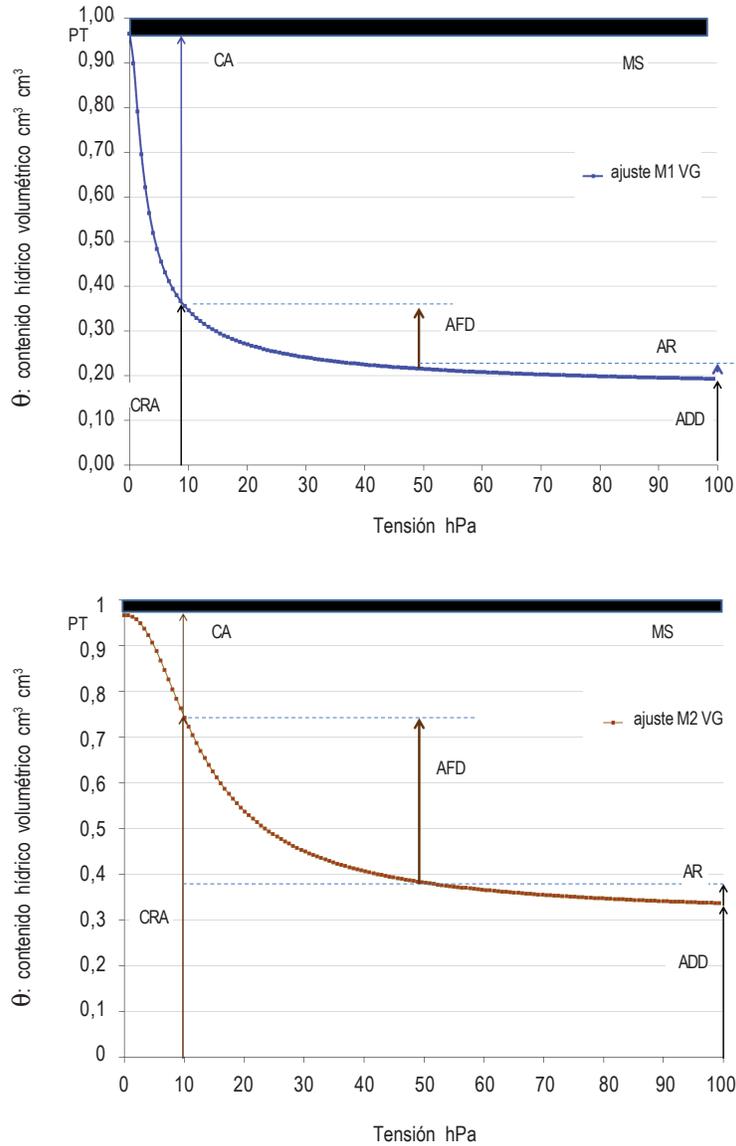


Figura 2. Curvas de retención de agua trazadas con los datos provenientes de los valores del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  en función de la tensión  $\psi$  medidos por método EN13041 y ajustados según van-Genuchten en a) M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y b) M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del fuego; PT: porosidad total; CRA: capacidad de retención de agua; CA: capacidad de aireación; AFD: agua fácilmente disponible, AR: agua de reserva; ADD: agua difícilmente disponible; MS: material sólido

Figure 2. Water retention curves drawn according to the volumetric water content  $\theta$  as a function of the water tension  $\psi$ , measured according to the EN13041 method and modelled according to van-Genuchten in: a) M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and b) M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego. PT: total porosity; CRA: water holding capacity; CA: air-filled porosity; AFD: available water; AR: water buffering capacity; ADD: non-available water; MS: solid material

el cual el  $\theta$  cae bruscamente se corresponde con la tensión de entrada de aire  $\psi_e$ , el sustrato comienza a drenar libremente, se produce la entrada de aire al mismo y el régimen pasa a ser de flujo no saturado. En M1 la  $\psi_e$  ocurre inmediatamente después de la saturación (PT, tensión cero),

mientras que M2 presenta una breve meseta indicando que el sustrato se mantiene cercano a la saturación en las primeras tensiones debido a la presencia de material fino. Esta información es útil si la asociamos a la altura del contenedor a partir de la cual el sustrato comenzará a dre-

nar. Esta diferencia entre M1 y M2 se ve acentuada por el efecto del procedimiento de doble saturación del material en el método EN-13041, que produce mejoras en la saturación de M2 que en M1 ya que disminuye la característica hidrofóbica de la turba resultando en una mayor retención de agua en los microporos y acercándose a lo que ocurre en el cultivo después de sucesivos ciclos con un buen manejo del riego. La forma de las CR obtenidas en el rango 0 a 10 hPa coinciden con las publicadas por Savvas (2009) en perlita y polvo de coco, donde la meseta mayor (mayor  $\psi_e$ ) se presenta en la fibra de coco con mayor  $\theta$ . Los parámetros experimentales  $\theta_s$  y  $\theta_r$ , y los calculados por VG:  $\alpha$  y  $n$ , se presentan en la Tabla 3. Se observa que los valores de los parámetros  $\alpha$  (la inversa de la  $\psi_e$ ), se mantienen mayores en M1 que en M2, correlacionándose de manera inversa con la aparición de las mesetas en los gráficos. Los parámetros  $n$  se presentan mayores en M2 que en M1 indicando una distribución de tamaño de poro con una curva más achatada en M2. Los  $R^2$  altos en todos los casos evidencian un ajuste elevado cuando se adopta el modelo matemático VG para el trazado de las CR en sustratos. La importancia de la información que brinda la  $\psi_e$ , tiene relación con la altura de la "tabla de agua" que se formará en la base del contenedor, con mayor efecto en contenedores de baja altura. A mayor  $\psi_e$ , menor  $\alpha$  y mayor altura de saturación en la base del contenedor (Noguera, 1999). Por lo tanto, para contenedores de igual altura el M2 formará mayor altura de "tabla de agua" que M1.

Se observa en la zona de muy bajas tensiones la diferencia en las pendientes de las CR de M1 y M2. En esta zona prevalece el efecto del  $\psi_g$  y se vacían los poros de mayor tamaño hasta que se iguala con el  $\psi_m$ . La mayor pendiente en M1 muestra que este sustrato tiene gran cantidad de macroporos, ya que libera un 41% de agua en el rango 0-5 hPa y un 51% en el rango 0-10hPa, poros que a su vez se llenan de aire, siendo la pendiente de M2 más suave,

liberando 9% de agua entre 0-5 hPa y 24% entre 0-10 hPa, reflejando mayor número de poros que retienen agua que se corresponden con mayor cantidad de meso y microporos.

Se observa que en el rango 0 a 30 hPa se obtuvieron mayores variaciones en la relación agua-aire que corresponde a la zona de drenaje libre y a la primera porción de AFD. El rango correspondiente a 10 a 50 hPa se considera de AFD para la planta y los valores intermedios son ampliamente usados como umbral de riego, dependiendo de los requerimientos de las especies y de sus estados fenológicos. En las Figuras 2, a y b se muestran los resultados de los parámetros de M1 y M2, respectivamente. Se observa una adecuada AFD para M2 y un valor bajo para M1, según valores de referencia (Valenzuela, 2009) lo que indica que el umbral de riego para M1 deberá ser más cercano a 10 hPa y por lo tanto con riegos más frecuentes que en M2 para obtener volúmenes de agua adecuados para evitar el estrés hídrico en la planta. El alto valor de ADD en M2 nos indica la existencia de un alto número de microporos.

Respecto de la elección de un sustrato de acuerdo al tamaño del contenedor, si bien, la relación entre las tensiones de la CR y las alturas de contenedor no son equivalentes debido a que la CC no sólo depende de la altura, sino también del volumen, el diámetro y la forma geométrica del contenedor, se puede inferir un comportamiento en la relación agua-aire estimada por la CR con contenedores de mayor tamaño. Debido al bajo valor del material sólido (MS) que presentan M1 y M2 estos sustratos no son recomendables para contenedores de gran tamaño para cultivo de leñosas ya que la baja densidad (Tabla 1) puede no proporcionar el anclaje adecuado a las raíces y tendrán tendencia al vuelco, sobre todo en producción en intemperie. Además en contenedores altos debido al gradiente de humedad vertical en el contenedor el sustrato M1 se recomendaría sólo en el caso de un sistema con riego automatizado donde el aporte de agua no sea limitante.

Tabla 3. Valores de los parámetros  $\theta_s$ : contenido hídrico volumétrico en saturación;  $\theta_r$ : contenido hídrico volumétrico residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros calculados por la función de ajuste;  $R^2$ : coeficiente de determinación; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.

Table 3. Value of the following parameters:  $\theta_s$ : volumetric water content at saturation;  $\theta_r$ : residual volumetric water content;  $\alpha$  y  $n$  parameters calculated by the adjusting function;  $R^2$ : coefficient of determination, M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego.

Sustrato	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$R^2$
M1	0,96	0,16	0,43	1,79	0,9926
M2	0,97	0,31	0,0052	2,31	0,9944

Los parámetros analizados son apropiados para un criterio de manejo del riego en función de los estados energéticos del agua en el sustrato. Sin embargo, en los sustratos muy macroporosos como M1, el limitante para la absorción de agua en las raíces puede ser la resistencia del sustrato al flujo de agua expresado por el parámetro  $K_{ns}$ . Otra de las ventajas que brinda el ajuste de los valores  $\theta - \psi$  es, que permite la estimación de la  $K_{ns}$ . Los valores medios de la  $K_s$  medidos fueron: Sustrato M1:  $K_s = 13,743 \text{ cm min}^{-1}$  con un coeficiente de variación % = 1,20 y para el Sustrato M2,  $K_s = 6,068 \text{ cm min}^{-1}$  con un coeficiente de variación % = 0,72. Estos resultados obtenidos fueron similares a los encontrados por otros autores: Wallach (1992a y b) en el rango de 0,52 a 7  $\text{cm min}^{-1}$  en diferentes sustratos; Orozco (1995), Orozco & Marfà (1995) 0,3 a 0,8  $\text{cm min}^{-1}$  en perlitas finas y Otten *et al.* (1999) 6  $\text{cm}$

$\text{min}^{-1}$  para sustrato a base de turba. Orozco & Marfà (1995) encontraron valores hasta 181  $\text{cm min}^{-1}$  en perlitas gruesas y Landini *et al.* (2005) 53  $\text{cm min}^{-1}$  en perlita.

Las curvas que representan la función  $K_{ns}(\theta)$  en M1 y M2 se muestran en la Figura 3 y los valores de los parámetros de ajuste en la Tabla 4. El umbral de riego en este caso está determinado por el punto de tensión donde se estima que se produce una brusca caída de la  $K_{ns}$  (Tabla 4). Se verifica que si bien ambos valores de  $\psi$  están dentro del rango 10 a 50 hPa, de AFD, el umbral de riego para M1 está mucho más próximo a la tensión de 10 hPa correspondiente a la CRA. Valores similares fueron publicados por Cáceres (2002) que obtuvo un umbral de riego con el par  $\theta = 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $\psi = 19 \text{ hPa}$  para perlita gruesa y un umbral con el par  $\theta = 0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $\psi = 45 \text{ hPa}$  para corteza de pino fina.

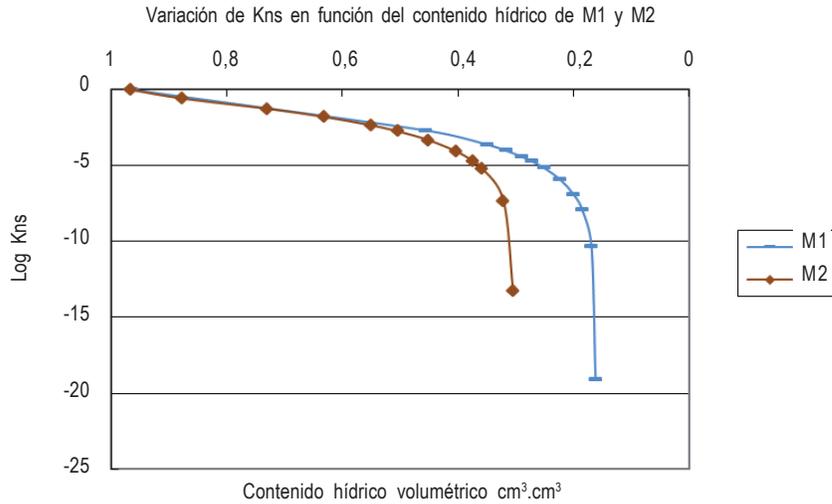


Figura 3. Curvas de la conductividad hidráulica no saturada  $K_{ns}$  ( $\text{cm min}^{-1}$ ) en función del contenido hídrico volumétrico  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), en M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego y en M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.

Figure 3. Unsaturated hydraulic conductivity curves  $K_{ns}$  ( $\text{cm min}^{-1}$ ) as a function of the volumetric water content  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) in M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego.

Tabla 4. Conductividad hidráulica no saturada ( $K_{ns}$ ) calculados según van Genuchten para M1 y M2 con datos  $\psi - \theta$  medidos por método EN13041;  $R^2$ : coeficiente de determinación adoptado para la regresión lineal entre  $\theta$  y el log  $K_{ns}$ ;  $\psi$ : tensión (umbral de riego);  $\theta$ : contenido hídrico volumétrico; M1: 80% perlita + 20% turba de Tierra del Fuego; M2: 20% perlita + 80% turba de Tierra del Fuego.

Table 4. Unsaturated hydraulic conductivity ( $K_{ns}$ ) according to van-Genuchten for M1 and M2 by means of  $\psi - \theta$  data measured by the EN13041 method;  $R^2$ : determination coefficient adopted for the linear regression between  $\theta$  and the log  $K_{ns}$ ;  $\psi$ : tension (irrigation threshold);  $\theta$ : volumetric water content; M1: 80% of perlite + 20% *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego and M2: 20% of perlite + 80% of *Sphagnum* peat moss from Tierra del Fuego.

Sustrato	$\psi$ hPa	$\theta$ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$K_{ns}(\theta)$ $\text{cm min}^{-1}$	Log $K_{ns}(\theta)$ $\text{cm min}^{-1}$	$R^2$
M1	13,42	0,31	5,36E-04	-4,41	0,97
M2	40,94	0,40	9,40E-04	-3,03	0,97

La curva de Kns ( $\theta$ ) estimada para M1, presenta un alto valor del parámetro  $\alpha$  de ajuste. Los resultados obtenidos coinciden con Abad *et al.* (2005) en fibras, polvo de coco y turba, materiales macro y microporosos respectivamente. En M2 los valores más altos de las  $\psi$  umbral de riego se debieron a la mayor capacidad de retener agua en este sustrato. Resultados en rangos similares de las Kns, fueron hallados por otros autores en materiales usados como sustratos (Raviv *et al.*, 1999; Wallach *et al.*, 1992a; b). Este criterio del manejo del riego teniendo en cuenta aspectos dinámicos del agua en los sustratos, podría ser interesante visando una mejora en la economía de agua, evitar lixiviados y contaminación sin comprometer la productividad vegetal. Los resultados obtenidos deberían ser calibrados para cada cultivo ya que distintos sistemas radicales podrían producir variaciones específicas en las respuestas.

## CONCLUSIONES

- 1) Toda la información conjunta obtenida de: los contenidos hídricos capacidad de retención de agua, agua fácilmente disponible y agua de reserva; la curva de retención de agua modelizada según van-Genuchten y las variables: conductividad hidráulica saturada y no saturada, aporta a una visión integral del comportamiento del agua en los sustratos con distintas proporciones de perlita y turba.
- 2) De acuerdo a la forma que adopta la función de la curva de retención se puede estimar la presión de entrada de aire en el sustrato relacionada con la altura de la tabla que se formará en la base del contenedor, información que permite elegir la altura del contenedor apropiada. Para los sustratos evaluados significa que en el de mayor proporción de perlita sería adecuado para contenedores de menor altura ya que el sustrato de mayor proporción de turba generan un ambiente muy húmedo donde las raíces pueden presentar problemas de anoxia.
- 3) La curva de retención de agua estima la distribución de tamaño de poros de los sustratos evaluados brindando información sobre proporción de macro y microporos relacionado con los criterios que definen el riego. En el sustrato con mayor cantidad de perlita se recomienda riegos más frecuentes para mantener el contenido hídrico cercano al valor de la capacidad de retención de agua.
- 4) La curva que estima la variación de la conductividad hidráulica no saturada en función del contenido hídrico permitió cuantificar el umbral de riego para ambos sustratos, resultados que deberán ser calibrados para cada cultivo.

## AGRADECIMIENTOS

AR Cáceres y O Marfà por su hospitalidad en el IRTA Cabrils y a las empresas Terrafertil SA y Multiquim SA por la donación de los materiales. Este trabajo fue financiado en parte con el proyecto UBACyT W024.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M; F Fornes; C Carrión; V Noguera; P Noguera; A Maquieira & R Puchades. 2005. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience* 40(7): 2138-2144.
- Burés, S & F Pokorny. 1991. Equation for estimating shrinkage in binary mixtures of container media. *HortScience* 26(8): 1087.
- EN-13041:2007. 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. (Comité Europeo de Normalización) EN N° 13041. 9pp
- EN-15428:2007. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de la granulometría. (Comité Europeo de Normalización) EN N° 15428.
- Cáceres, R. 2002. Medida del potencial matricial de sustratos mediante electro tensiómetros. VI Jornadas de sustratos SECH, Barcelona 13 pp
- Carmona, E; J Ordovás; MT Moreno; M Avilés; MT Aguado & MC Ortega. 2003. Hydrological properties of cork container media. *HortScience* 38(6): 1235-1241
- Cassel, DK & DR Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. In: Methods of soil analysis. part I Physical and mineralogical methods. Klute, A. (ed.) Madison, Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher. pp 901-926
- Danielson, RE & PI Sutherland. 1986. Porosity. In: Methods of soil analysis. part I Physical and mineralogical methods. Klute, A. (ed.) Madison, Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher. pp 443-461.
- de Boodt, M & N de Waele. 1968. Study on the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie* XVIII(3): 275-300.
- de Boodt, M & O Verdonck. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26: 37-44.
- de Boodt, M; O Verdonck. & J Cappaert. 1974. Determination and study of the water availability of substrates of ornamental plant growing. *Acta Hort.* 35: 89-94.
- da Silva, FF; R Wallach & Y Chen. 1993. Hydraulic properties of sphagnum peat moss and tuff and their potential effects on water availability. *Plant and Soil* 154:119-126.
- Drzal, MS; D Cassel & WC Fonteno. 1999. Pore fraction Analysis: a new tool for substrate testing. *Acta Hort.* 481: 43-54.

- Fonteno, WC; DK Cassel & RA Larson. 1981. Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106(6): 736-741.
- Fonteno, W. 1989. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. *Acta Hort.* 238: 67-74.
- Fonteno, W. 1993. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. *Acta Hort.* 342:197-204.
- van Genuchten, MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. Amer. Journal* 44: 892-898.
- van Genuchten, MT & DR Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae* 3(5): 615-28.
- Heiskanen, J. 1995. Water status of sphagnum peat and peat-perlite mixture in containers subjected to irrigations regimes. *HortScience* 30(2): 281-284.
- Heiskanen, J. 1997. Air filled porosity of eight growing media based on Sphagnum peat during drying from container capacity. *Acta Hort.* 450: 277-286.
- Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, CA, USA. 771pp.
- Karlovich, PT & WC Fonteno. 1986. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(2): 191-195.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. Pp. 597-618. *En: Methods of soil analysis. part I physical and mineralogical methods.* Klute, A. (ed.) Madison, Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher.
- Klute, A & C Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods, en *Methods of Soil Analysis. Part I Physical and mineralogical methods* Klute, A. (ed.), Madison, Wisconsin, USA, ASSA, Inc, Publisher
- Landini, A; L Bottini; L Mascarini; F Vilella & S Orden. 2005. Conductividad hidráulica saturada de perlita para distintos tiempos de uso en cultivo de rosas bajo cubierta. *Rev. Facultad de Agronomía UBA* 25(3): 227-232.
- Lemaire, F; A Dartiguès; LM Rivière & S Charpentier. 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA-PHM Revue Horticole, Paris-Limoges, 184 pp.
- Londra, P. 2010. Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. *HortScience* 45: 1106-1112.
- Martinez Farré, FX. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas I Jornadas de Sustratos, SECH:* 55-66.
- Marfà, O; R Savé; C Biel; M Cohen & R Lladó. 1998. Substrate hydraulic conductivity as a parameter for irrigation of carnation soilless culture. *Acta Hort.* 458: 65-74.
- Milks, R; W Fonteno & R Larson. 1989a. Hydrology of horticultural substrates: I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(1): 48-52.
- Milks, R; W Fonteno & R Larson. 1989b. Hydrology of horticultural substrates: II. Predicting physical properties of media in containers. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(1): 53-56.
- Milks, R; W Fonteno & R Larson. 1989c. Hydrology of horticultural substrates: III. Predicting air and water content of limited volume plug cells. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(1): 57-61.
- Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. p. 799-823. *En: Klute, A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1.* Madison, WI.
- Noguera, P. 1999. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustratos. Tesis doctoral en Química. Universidad Politécnica de Valencia. 228 pp.
- Orozco, R. 1995. Propiedades físicas e hidrológicas de perlitas utilizadas para cultivos sin suelo, su implicación con las relaciones sustrato-agua-planta y con el riego de cultivos hortícolas. Tesis doctoral. Universitat de Lleida, España.
- Orozco, R & O Marfà. 1995. Non saturated hydraulic conductivity of perlites: some effect on pepper. *Acta Hort.* 401: 235-242.
- Otten, W; P Raats; R Baas; H Challa & P Kabat. 1999. Spatial and temporal dynamics of water in the root environment of potted plants on a flooded bench fertigation system. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 47: 51-65.
- Raviv, M; R Wallach; A Silber; S Medina & A Krassnovsky. 1999. The effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124: 205-209.
- Raviv, M; JH Lieth; DW Burger & R Wallach. 2001. Optimization of Transpiration and Potential Growth Rates of 'Kardinal' Rose with Respect to Root-zone Physical Properties. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126: 638-643.
- Raviv, M; R Wallach; A Silber & A Bar-Tal. 2002. Substrates and their analysis (2) Pp. 25-101. *En: D Savvas (ed.) Hydroponic production of vegetables.* Atenas. 463 pp.
- Raviv, M. & Wallach, R. 2007. Water availability to rose roots grown in soilless media, as a determinant factor of productivity. *Acta Hort.* 751: 23-32.
- Rivière, LM; G Sintès & S Madiot. 1995. Pilotage tensiométrique de l'irrigation des cultures en conteneurs sur substrats organiques. *Etude et gestion des sols* 2.2: 135-144.
- Savvas, D. 2009. Modern development in the use of inorganic media in greenhouse vegetable and flower production. *Acta Hort.* 819: 73-86.
- Spomer, L. 1974. Two classroom exercises demonstrating the pattern of container soil water distribution. *Hort Science* 9(2): 152-153.
- Terés, V. 2002. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral UP de Madrid. 483p
- Valenzuela, OR. 2009. Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. 153p.

- Vence, LB; OR Valenzuela & HA Svartz. 2010. Caracterización física de sustratos con fines comerciales: densidad y capacidad de retención de agua medidas por diferentes métodos. En actas del "VENSUB, Encontro Nacional de Substratos para Plantas", Goiania, GO, Brasil
- Wallach, R; F da Silva; & Y Chen. 1992a. Unsaturated hydraulic characteristics of composted agricultural wastes, tuff and mixtures. *Soil Sci.* 153 (6): 434-441.
- Wallach, R; F da Silva; & Y Chen. 1992b. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(3): 415-421.
- Wallach, R. 2008. Physical characteristics of soilless media. (3)Pp 41-116. *In: Soilless culture: theory and practice.* Raviv, M. y Leith, JH (eds.) Elsevier. 587 pp
- White, JW & JW Mastalerz. 1966. Soil moisture as related to «container capacity». *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 89: 758-765.