

## **Caracterización hidrológica y curvas de calibración específica del sensor de humedad EC-5 en sustratos de lana de roca y fibra de coco**

C.D. Mora, A. Ritter<sup>1,\*</sup>, N. Machín<sup>1</sup>, C.M. Regalado<sup>1</sup>, M.C. Cid<sup>2</sup>

Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)

<sup>1</sup>Departamento de Suelos y Riegos

<sup>2</sup>Departamento de Ornamentales y Horticultura

### **Resumen**

La hidroponía en Canarias se ha introducido desde hace algunos años y prioritariamente en el cultivo del tomate. Como este sistema implica la utilización de sustratos distintos al suelo, se ha empleado desde hace algunos años el picón o lapilli (material de origen volcánico). Las restricciones medio ambientales han motivado la introducción de otros sustratos como la lana de roca o la fibra de coco. El correcto manejo de estos sustratos depende del conocimiento de sus propiedades hidrológicas. Sin embargo ésta información no suele ser conocida y muchos fabricantes no la proporcionan. En este trabajo se estudia la capacidad de retención de agua y la porosidad de lana de roca o la fibra de coco. Se realiza también la calibración específica del sensor de capacitancia EC-5 en estos sustratos que permita el seguimiento del contenido de humedad ( $\theta$ ) de los mismos. A partir de los datos obtenidos, se ajustaron las curvas de retención al modelo de van Genuchten (Coeficiente de eficiencia,  $C_{\text{eff}} > 0,99$ ;  $\text{RMSE} < 1,5\%$ ). Se comprueba que la lana de roca es un sustrato con una alta porosidad, pero constituida fundamentalmente por macroporos, de manera que presenta una capacidad de retención de agua muy baja. La fibra de coco, presenta también alta porosidad, pero mejor capacidad de retención de agua. En consecuencia se recomiendan dosis y frecuencia de riego diferentes en función de cada sustrato. El uso del sensor EC-5 para el seguimiento del contenido de humedad en lana de roca o fibra de coco es posible si se utiliza la ecuación de calibración específica para cada sustrato ( $C_{\text{eff}} > 0,93$ ;  $\text{RMSE} < 6\%$ ). El uso de la ecuación general proporcionada por el fabricante estaría asociado a errores importantes en la determinación del contenido de humedad a partir de la señal del sensor.

**Palabras clave:** curva característica, modelo de van Genuchten, sustrato hidropónico, retención de humedad, sensor.

### **INTRODUCCIÓN**

En Canarias, la hidroponía se ha extendido principalmente en el cultivo del tomate siendo éste, después del plátano, el cultivo de mayor importancia económica para el Archipiélago, con una superficie cultivada de 2.478 ha y una producción de 196.899 t (ISTAC, 2006). En las Islas, el sustrato utilizado tradicionalmente y con

mayor frecuencia en cultivo hidropónico es el picón o lapilli. Se trata de material de origen volcánico, cuya disponibilidad es cada vez más escasa como consecuencia de las restricciones medioambientales impuestas a su extracción en canteras. El uso del picón está asociado a la degradación del mismo para su uso en hidroponía. En este sentido, la importancia de sustratos alternativos como la lana de roca y fibra de coco es creciente.

El correcto manejo del riego en hidroponía depende de las propiedades hidrológicas de los sustratos, tales como la curva de retención de humedad, la porosidad y conductividad hidráulica. Sin embargo, estos parámetros no suelen ser suministrados por los proveedores.

Actualmente, con los avances en instrumentación, existen sensores que miden el contenido de humedad de medios porosos y por tanto tienen una utilidad potencial para el seguimiento y control del contenido de humedad en sustratos hidropónicos. Los sensores dieléctricos de capacitancia, son dispositivos de bajo coste que proporcionan medidas instantáneas del contenido de humedad. Sin embargo, la exactitud de este tipo de sensores depende de si se dispone de una calibración específica para el medio poroso donde se pretende utilizar, ya que las lecturas son susceptibles a variaciones en densidad aparente, contenido orgánico, textura, etc. Generalmente, el fabricante de estos sensores proporciona curvas de calibración, pero éstas no suelen ser válidas para determinados sustratos.

Por otro lado, el criterio para decidir el momento de regar un sustrato viene indicado por el potencial hídrico del mismo, que indica la energía que tiene que invertir la planta para extraer el agua retenida en los poros, de tal manera que el agua en el sustrato se desplace dentro del rango denominado como agua disponible. Los sensores de capacitancia proporcionan lecturas sobre el contenido de humedad, aunque si se dispone de la curva característica del sustrato es posible determinar cuál es el contenido de humedad correspondiente al valor de potencial hídrico crítico que indica el momento del riego.

En este trabajo se pretende caracterizar hidrológicamente sustratos alternativos al picón como son la lana de roca y la fibra de coco, mediante su curva de retención de humedad y su porosidad. Igualmente, se evalúa la respuesta de un sensor dieléctrico comercial para medir el contenido de humedad en estos dos sustratos. En este sentido se determinan las curvas de calibración específicas para la lana de roca y fibra de coco y se comparan con las que proporciona el fabricante.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Curvas de retención de humedad**

Se determinaron las curvas de retención de humedad para la lana de roca Grodan Classic (Can o Mat, Las Palmas de Gran Canaria, España) y la fibra de coco Pelemix (Pelemix España, Murcia, España) mediante el sistema de ollas de Richards (Soilmoisture equipment. Coro, Santa Bárbara, CA, EEUU). Para ello se empaquetaron tres muestras de cada sustrato en cilindros de 7,5 cm de alto por 7,2 cm de diámetro.

Las muestras de lana de roca y de fibra de coco se empaquetaron a una densidad aparente de  $0,09 \text{ g/cm}^3$ . En el caso de la lana de roca, la muestra se introdujo en el anillo presionando con éste sobre la tabla de lana de roca que proporciona el proveedor. Con la fibra de coco, el cilindro se fue llenando manualmente hasta la densidad indicada. Cada muestra se saturó con agua por capilaridad para asegurar la eliminación del aire en los poros. Posteriormente se introdujeron en las ollas de Richards sobre una placa de porcelana porosa (con presión de burbujeo 300 kPa) saturada y se sometieron a varias presiones con las que se va extrayendo parte del agua retenida en el sustrato. Para cada valor de presión (y por tanto de succión,  $\psi$ ) se determinó el peso del sustrato con una balanza de laboratorio Mettler Toledo (Mettler Toledo S.A.E, Barcelona, España) Distribuidor, ciudad, País). Finalmente se obtuvo el peso seco de la muestra de sustrato mediante secado en estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . La diferencia de pesos proporciona la cantidad de agua retenida en el sustrato. El contenido de humedad ( $\theta$ ) se calcula como el volumen de agua en el volumen total de la muestra (expresado en porcentaje).

Una vez obtenidos los pares de datos de  $\psi$  y  $\theta$ , se representan gráficamente y se les ajusta un modelo de curva de retención de humedad como el de van Genuchten (van Genuchten, 1980) con el programa VGpest3 (Muñoz-Carpena, 1996)

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

Donde,  $\theta_r$  y  $\theta_s$  son los contenidos volumétricos de agua residual y a saturación, respectivamente;  $\psi$  es la succión (cm);  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  son parámetros adimensionales de ajuste, donde se asume  $m = 1 - 1/n$ . El valor de  $\theta$  que resulta de la Ec. (1) se multiplica por 100 para expresar el contenido de humedad en porcentaje de agua por volumen de sustrato.

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo de van Genuchten para cada sustrato se determinó el error cuadrático medio (RMSE), así como el coeficiente de eficiencia,  $C_{eff}$  (Nash y Sutcliffe, 1971). Este coeficiente cuantifica el error que se obtiene con el modelo propuesto, con respecto al modelo más sencillo para representar una serie de datos (el valor promedio). Varía entre  $0 \leq C_{eff} \leq 1$ , tal que cuanto más cercano a uno, mejor es el modelo para predecir los datos. Las ecuaciones para el cálculo de  $C_{eff}$  y RMSE son:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [\theta_{obs} - \theta_{pred}]^2}{n}} \quad \text{y} \quad C_{eff} = 1 - \frac{\sum [\theta_{obs} - \theta_{pred}]^2}{\sum [\theta_{obs} - \bar{\theta}_{obs}]^2} \quad (2)$$

Donde  $\theta_{obs}$  y  $\theta_{pred}$  son los contenidos volumétricos de humedad medidos y los calculados con el modelo de van Genuchten, respectivamente;  $n$  es el número de datos medidos.

### Determinación de la porosidad

La porosidad de un sustrato es la fracción del volumen de un sustrato que no es ocupada por la parte sólida y por lo tanto puede estar ocupada por aire, o por agua (Tarjuelo, 1999). Para la determinación de la porosidad se calculó el volumen de agua en una muestra de sustrato saturada de dimensiones conocidas. La diferencia de peso de la muestra saturada y una vez secada en estufa a  $105^\circ\text{C}$ , permite calcular la porosidad con la siguiente ecuación, asumiendo una densidad del agua de  $1 \text{ g/cm}^3$ ,

$$\eta = 100 \frac{P_s - P_{105}}{V_T} \quad (3)$$

Donde  $P_s$  y  $P_{105}$  son pesos obtenidos con la balanza de laboratorio para la muestra saturada y seca, respectivamente;  $V_T$  es el volumen de la muestra. La determinación de la porosidad de la lana de roca y de la fibra de coco se realizó en muestras de 7,5 cm de alto por 7,2 cm de diámetro, empaquetadas en anillos metálicos a una densidad aparente de 0,09 g/cm<sup>3</sup>.

### Calibración de sensor de contenido de humedad en los sustratos

En este trabajo se utilizó un sensor dieléctrico EC-5 (Decagon Devices Inc, Pullman, EEUU). Éste mide la constante dieléctrica del sustrato (que varía en función del contenido de humedad del mismo,  $\theta$ ) y proporciona una señal en voltaje en el intervalo de 200 – 1.000 mV. Para determinar el valor  $\theta$  a partir de esta señal es necesario disponer de la ecuación de calibración.

Se obtuvieron las curvas de calibración específicas para ambos sustratos tomando muestras de 7,5 x 7,2 cm, empaquetadas a 0,09 g/cm<sup>3</sup> en las que se inserta el sensor EC-5. Partiendo de saturación, las muestras se van secando progresivamente al aire y se van tomando medidas simultáneas con el sensor y del peso de la muestra con la balanza de laboratorio. Finalmente se determina el peso seco tras secado en estufa a 105°C. A partir del los pesos obtenidos y con el peso seco se calcula  $\theta$  como cociente entre la diferencia de pesadas entre ambos pesos y el volumen de muestra de sustrato.

La ecuación de calibrado específica para cada sustrato estudiado se obtiene por ajuste de los valores de la señal (mV) y los datos de  $\theta$  (expresados en %) a una ecuación polinómica. Estas ecuaciones se comparan con las que proporciona el fabricante. Según el fabricante (Decagon Devices, Inc., 2006), la señal de salida del sensor EC-5 depende del voltaje de alimentación del mismo ( $U_o$ ):

$$\begin{aligned} \theta &= 100(2,63 \cdot 10^{-6} S^2 + 5,07 \cdot 10^{-4} S - 0,0394) \text{ para } U_o = 2,5V \\ \theta &= 100[6,28 \cdot 10^{-7} (1,365S)^2 + 1,37 \cdot 10^{-4} (1,365S) - 0,183] \text{ para } U_o = 3V \end{aligned} \quad (4)$$

Donde  $S$  es la señal (mV) que proporciona el sensor EC-5. En consecuencia se realizó el calibrado del sensor EC-5 para ambos sustratos y para un voltaje de alimentación de 2,5V y de 3V. La bondad de ajuste de la ecuación de cada ecuación de calibración obtenida se evaluó en función del RMSE,  $C_{\text{eff}}$  y de la representación gráfica de los resultados

## RESULTADOS

### 1. Porosidad y curvas de retención de humedad

Ambos sustratos presentan valores de porosidad muy altos, siendo la lana de roca la que mayor fracción de poros presenta (88% vs. 81%) (Tabla 1). Los parámetros del ajuste de la ecuación van Genuchten a los datos de  $\psi$  y  $\theta$  se incluyen igualmente en la Tabla 1. La bondad de ajuste es buena, con valores de  $C_{\text{eff}} > 0,99$  en ambos casos y errores de RMSE < 1,5%. El valor de humedad residual  $\theta_r$  sugiere una mayor capacidad

de retención de humedad en la fibra de coco que en la lana de roca (0% vs. 21%). Las curvas características de estos sustratos (Fig. 1) muestran diferencias importantes entre sí. En comparación con muchos suelos, estos sustratos pierden a succiones bajas gran cantidad del agua retenida. Así, por ejemplo para 30 cm, tanto la lana de roca como la fibra de coco, presentan un  $\theta$  en torno al 35%. A medida que se incrementa la succión, la lana de roca pierde humedad con mayor rapidez (mayor pendiente de la curva; valor de  $n$  3,71 vs. 1,59 en Tabla 1). Así, para succiones menores a 5 cm la lana de roca se mantiene en condiciones de saturación, sin embargo con un aumento de succión hasta 50 cm, el contenido de humedad cae bruscamente hasta valores del 4%. Con una succión de 5 cm, la fibra de coco, presente un  $\theta$  del 58% y a 50 cm del 31%. Para valores de succión de 100 cm, mientras que la lana de roca ha perdido todo el agua ( $\theta=0,58\%$ ), la fibra de coco retiene aún un 27,9%. Teniendo en cuenta que la lana de roca posee una porosidad mayor que la fibra de coco y que pierde el de contenido de humedad de forma más brusca, se deduce que ésta tiene una mayor cantidad de macroporos.

## 2. Curvas de calibración del la sonda EC-5

Con las dos muestras de fibra de coco y la sonda EC-5 alimentada a 2,5 V se obtiene un ajuste polinómico de tercer grado (Tabla 2). La bondad del ajuste es buena ( $C_{\text{eff}} = 0,936$ ) y sobre todo para valores del contenido de humedad inferiores al 20% o valores de señal inferiores a 450 mV. Con el uso de esta ecuación se asume un error de RMSE = 5,9% de contenido de humedad. Sin embargo, si se usara la ecuación proporcionada por el fabricante (Ec. 4), el error sería del 14,5%, y el ajuste entre los valores observados y predichos es peor ( $C_{\text{eff}} = 0,619$ ). Esto se ilustra gráficamente con la Fig. 2, que indica el ajuste de los datos sobre la recta 1:1 (cuanto mejor es el ajuste, menos se desvían los puntos de la recta).

La lana de roca es un material más homogéneo, lo que resulta en un ajuste muy bueno con las dos muestras (RMSE = 2,41% y  $C_{\text{eff}} = 0,994$ ). Si en vez de utilizar la ecuación de calibración obtenida se utilizara aquella proporcionada por el fabricante (Ec. 4), el error sería de RMSE = 22,71%, ya que esta ecuación no predice bien los valores medidos ( $C_{\text{eff}} = 0,40$ ). Gráficamente, la Fig. 2 ilustra como los valores predichos con la ecuación obtenida caen sobre la recta 1:1, mientras que aquellos que resultan con la ecuación del fabricante se desvían claramente de esta recta.

Con respecto al calibrado del sensor EC-5 en ambos sustratos, pero con voltaje de alimentación de 3V, se deriva un análisis similar, aunque en este caso, sólo se ha utilizado una muestra de cada sustrato. El ajuste obtenido con la fibra de coco es muy bueno (Fig. 3), con un  $C_{\text{eff}} = 0,995$  y un RMSE = 1,31%. Igualmente, con la lana de roca la ecuación de calibración obtenida predice muy bien los datos ( $C_{\text{eff}} = 0,984$  y RMSE = 3,17%). El uso de la ecuación proporcionada por el fabricante (Ec. 4), no sería recomendable en ninguno de los dos sustratos ( $C_{\text{eff}} = 0,524$  y un RMSE = 12,57% para fibra de coco y  $C_{\text{eff}} = 0,671$  y RMSE = 14,35% para lana de roca). Esto se ilustra también en la Fig. 3, donde, a diferencia de lo que se obtiene con la ecuación del fabricante, los valores que predice la ecuación de obtenida caen sobre la claramente sobre la recta 1:1.

La Fig. 4 ilustra, para cada sustrato, el efecto de utilizar la ecuación de calibración de 2,5 V, para los valores de señal obtenidos alimentando el sensor con 3 V.

Así, con la lana de roca, para valores de  $\theta$  inferiores al 60% el uso de la ecuación de calibración para 2,5 V ó 3 V es indiferente (Fig. 4a). No obstante, para valores de  $\theta$  mayores, la diferencia no es tal que incurramos en un gran error, por lo que se considera que la variación del voltaje de alimentación no influye en la predicción del contenido de humedad del sustrato. En el caso de la fibra de coco (Fig. 4b), para valores de  $\theta$  inferiores al 40%, el alimentar el sensor a 2,5 ó 3 V es indiferente, pero para valores superiores, el alimentar la sonda con 2,5 V predice el contenido de humedad del sustrato de forma menos exacta que si alimentamos la sonda con 3 V. Si bien no existen prácticamente diferencias significativas entre alimentar la sonda a 2,5 y 3 V, se debe tener en cuenta que si existen diferencia en el intervalo de utilización de la sonda y el rango de humedad que el sensor es capaz de medir (Tabla 2).

La utilización combinada de las curvas de calibración del sensor y de las curvas de retención de humedad permite relacionar, la señal que proporciona el sensor, con la succión y el contenido de humedad (Fig. 5). En este caso se han usado los valores de alimentación de la sonda a 2,5 V. Considerando que la succión en el sustrato indica la energía necesaria que las raíces deben emplear para extraer el agua retenida en los poros, es posible determinar, para distintos valores de succión, cuál sería la señal correspondiente que daría el sensor en cada sustrato. Así, en la lana de roca, con succiones de 10 kPa ( $\theta= 0,6\%$ ), 5 kPa ( $\theta= 38\%$ ) y 2 kPa ( $\theta= 36\%$ ) el sensor EC-5 daría lecturas de 245, 327 y 556 mV, respectivamente. Sin embargo, como la fibra de coco tiene mayor capacidad de retención de agua, y como el sensor tiene una respuesta diferente (calibración distinta), los valores de succión de 10 kPa ( $\theta= 28\%$ ), 5 kPa ( $\theta= 31\%$ ) y 2 kPa ( $\theta= 38\%$ ) se corresponden con señales del sensor EC-5 de 483, 500 y 534 mV, respectivamente.

## DISCUSIÓN

La caracterización hidrológica de sustratos hidropónicos distintos como son la lana de roca y la fibra de coco indica que el manejo del riego debe ser diferente en función del sustrato utilizado. Aunque la lana de roca presenta una alta porosidad, es un sustrato con una baja capacidad de retención de agua. En este sentido es conveniente reducir la dosis de riego y aplicarla con mayor frecuencia. Además, como este sustrato tiene fundamentalmente macroporos, pierde prácticamente toda el agua a succiones bajas (5 kPa). Por el contrario, la fibra de coco es un sustrato de alta porosidad que presenta mejor capacidad de retención de agua. Por lo tanto, las dosis de riego serían mayores y con menor frecuencia.

El uso del sensor EC-5 para el seguimiento del contenido de humedad en ambos sustratos es posible si se utiliza la ecuación de calibración específica para cada sustrato. El uso de la ecuación general proporcionada por el fabricante estaría asociado a errores importantes en la determinación del contenido de humedad a partir de la señal del sensor. Con la lana de roca, el usar una ecuación de calibración específica en función del voltaje de alimentación del sensor a 2,5V o 3V es indiferente. Sin embargo, en el caso de la fibra de coco, sí es recomendable emplear la calibración específica obtenida con cada alimentación. Esto es consecuencia de que el diseño del sensor EC-5, hace que su señal sea proporcional al voltaje de alimentación.

Con este trabajo se ilustra la importancia que tiene el conocer el comportamiento hidrológico de los sustratos. Las curvas características o de retención de humedad

indican que para una misma succión, el agua disponible para la planta es muy variable si se emplea lana de roca o fibra de coco. La succión es la magnitud que indica la mayor o menor facilidad con la que las raíces pueden extraer el agua del sustrato y las curvas de retención proporcionan el contenido de humedad correspondiente a cada succión. A través de las curvas de calibración, estos contenidos de humedad se relacionan con la señal que proporciona el sensor EC-5.

Según Hartz et al. (2006) el tomate, que tiene bastante importancia en Canarias como cultivo hidropónico, debe regarse cuando el contenido de humedad esté aproximadamente entre  $\theta = 20-30\%$  para que no se produzca un estrés hídrico y una pérdida notable de la producción. No obstante, a partir de las curvas de retención obtenidas se deriva que estos valores se corresponden con intervalos de succión muy diferentes: 2,2 a 2,6 kPa si se trata de lana de roca; 6,4 a  $>100$  kPa si el sustrato es fibra de coco. Por el contrario asumiendo por ejemplo un valor de succión crítico de 2,5 kPa, las curvas de retención indican que los sustratos presentan  $\theta=22,4\%$  (lana de roca) y  $\theta=36,5\%$  (fibra de coco). Esta información es además útil para calcular la dosis de riego teniendo en cuenta la porosidad de cada sustrato (Tabla 1). Así suponiendo un espesor de lana de roca de 10 cm, para llegar a saturación, aplicaremos 65,6 mm (65,6% de humedad en un espesor de 10 cm). Igualmente, con 10 cm de espesor de fibra de coco, habría que aplicar 44,5 mm (44,5% de humedad en un espesor de 10 cm).

### Referencias

- Decagon Devices, Inc. 2006. ECH2O Probe User's Manual. Disponible en <http://www.decagon.com/literature/manuals/echomanual.pdf>
- Hartz, T.K. 2006. Vegetable production best management practices to minimize nutrient loss. HortTechnology 16: 395-402.
- ISTAC-Instituto Canario de Estadística. 2006. Superficie de los principales cultivos de Canarias. Disponible en <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas.html>
- Muñoz-Carpena, R. y J. Álvarez-Benedi. 1996. Program VGPest3. Disponible en <http://carpena.ifas.ufl.edu/software/vgpest.html>.
- Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of Principles. J. Hydrol. 10: 282-290.
- Tarjuelo, J.M. 1999. El riego por aspersión y su tecnología. Mundi-Prensa S.A. Madrid, España.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.

**Tablas**

Tabla 1. Parámetros de van Genuchten y valores de porosidad.

Sustrato	$\eta$ (%)	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	RMSE(%)	$C_{eff}$
Lana de roca	88	90,3	0	0,064	3,715	1,3	0,997
Fibra de coco	81	89,5	21,1	0,502	1,588	1,0	0,996

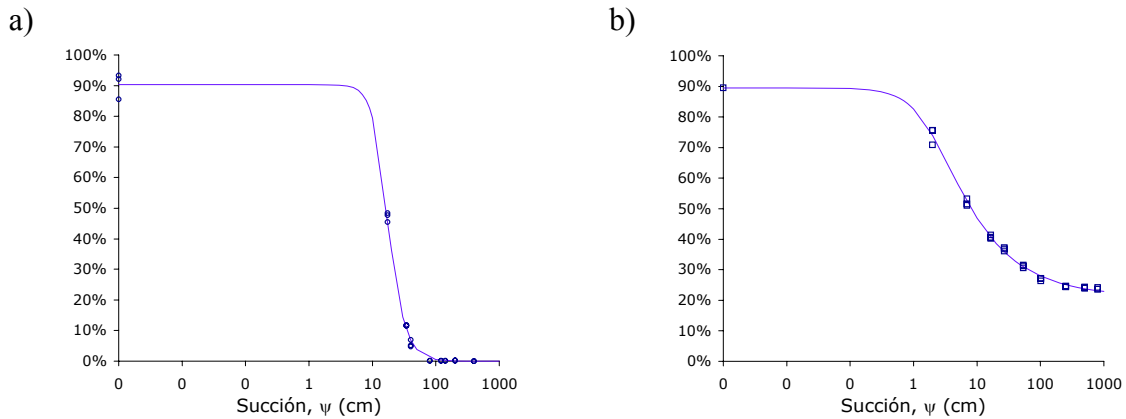
$\eta$ : Porosidad (%);  $\theta_s$  y  $\theta_r$ : contenido de humedad a saturación y residual (%);  $\alpha$  y  $n$ : parámetros de forma; RMSE: raíz del error cuadrático medio (%);  $C_{eff}$ : Coeficiente de eficiencia.

Tabla 2. Calibración específica de cada sustrato. Coeficientes de la ecuación polinómica, rango e intervalos.

Sustrato	Voltaje alimentación (V)	Grado	a	b	c	d	Rango (%)	Intervalo señal (mV)
Lana de roca	2,5	3	3,90E-07	1,11E-04	6,29E-03	-	100-0	740-200
Fibra de coco	2,5	3	5,20E-08	2,25E-04	6,23E-02	-	100-10	680-250
Lana de roca	3,0	3	3,86E-10	9,70E-07	3,30E-04	-	78-0	900-400
Fibra de coco	3,0	2	-	2,00E-06	1,00E-04	-	84-3	700-350

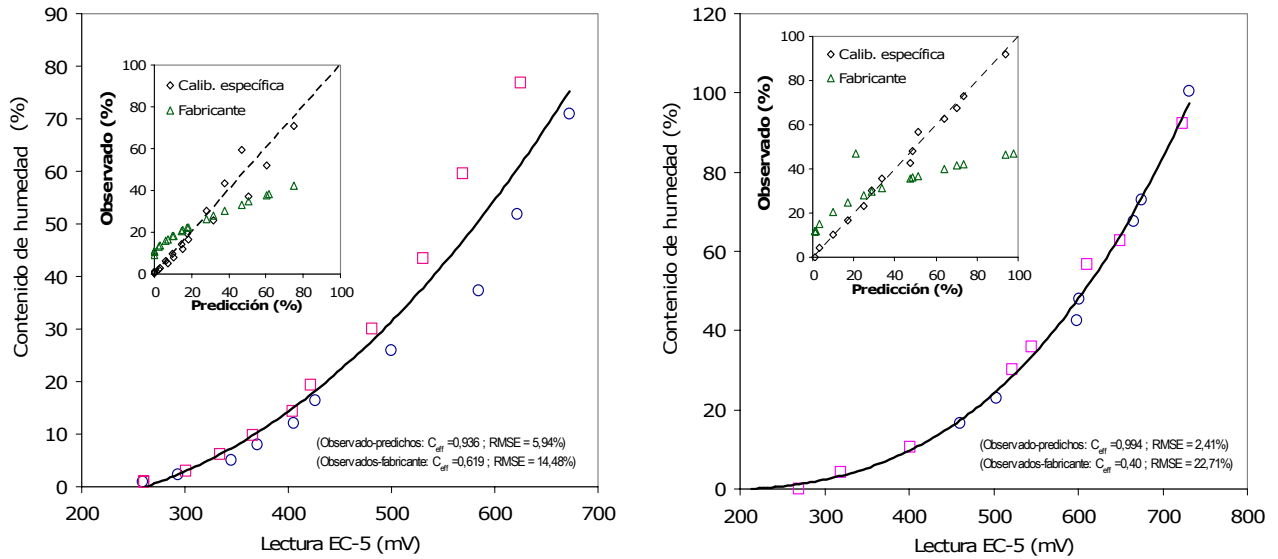
Ecuación polinómica del tipo  $\theta = aS^3 + bS^2 + cS + d$ , donde  $\theta$  está en %, y  $S$  está en mV.

**Figuras**

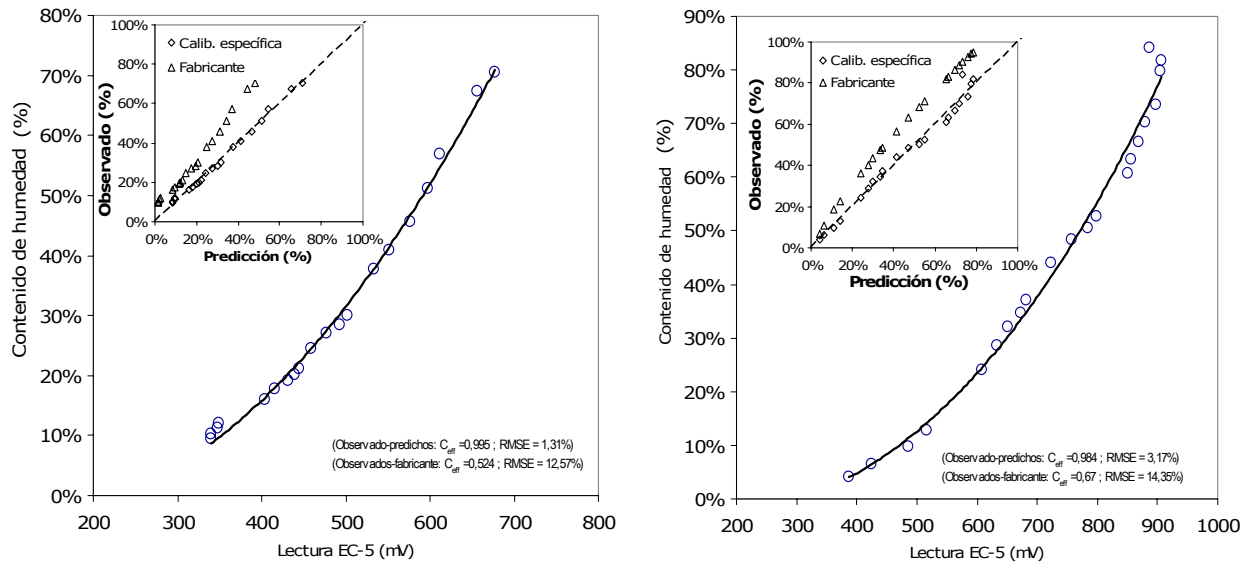


**Fig 1.** Curvas de retención de humedad: a) lana de roca; b) fibra de coco.

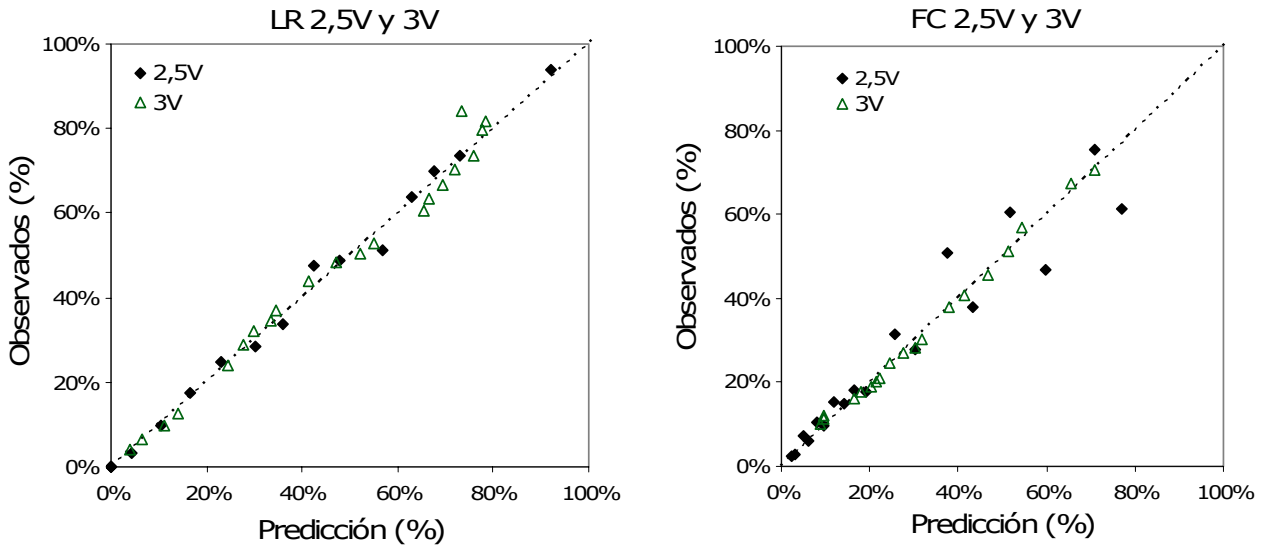




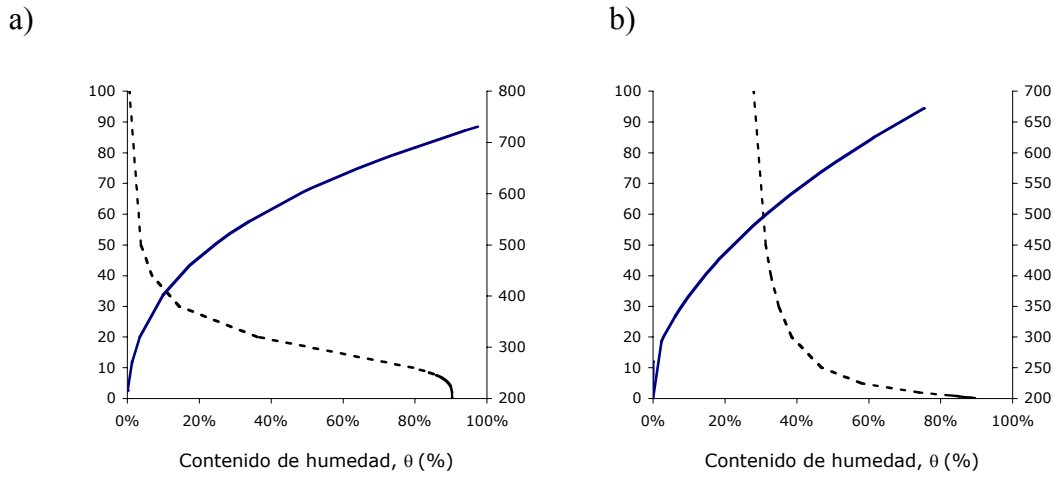
**Fig. 2.** Curvas de calibración para fibra de coco y lana de roca, con la sonda EC-5 alimentada a 2,5V. Comparación de los valores observados, predichos y según el fabricante.



**Fig. 3.** Curvas de calibración para fibra de coco y lana de roca, con la sonda EC-5 alimentada a 3 V. Comparación de los valores observados, predichos y según el fabricante.



**Fig. 4.** Comparación sobre la recta 1:1 de los valores observados y predichos para lana de roca (LR) y fibra de coco (FC) obtenidos con el sensor alimentado a 2,5 y 3V, respectivamente.



**Fig. 5.** Representación de la curva de calibración específica del sensor y curva de retención de humedad para la a) lana de roca y b) fibra de coco, respectivamente.