

A-04

FUENTES DE VARIABILIDAD QUE INTERVIENEN EN LA MEDICIÓN DE CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN PARCELAS DE MANZANO REGADAS POR GOTEO

Domínguez J.¹, Casadesús J.², Bogena H.R.³, Huisman J.A.⁴.

¹Investigador en formación, IRTA, Programa de Uso Eficiente del Agua en Agricultura, jesus.dominguez@irta.cat

²Investigador, IRTA, Programa de Uso Eficiente del Agua en Agricultura, jaume.casadesus@irta.cat

³Investigador, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Bio- and Geosciences, Agrosphere Institute (IBG-3), h.bogena@fz-juelich.de

⁴Investigador, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Bio- and Geosciences, Agrosphere Institute (IBG-3), s.huisman@fz-juelich.de

Resumen

El riego por goteo aplica el agua en el suelo de manera eficiente, reduciendo la superficie mojada y aportando el agua cerca de las raíces. Pero ello determina una distribución de la humedad del suelo heterogénea, que complica la monitorización con sensores. La finalidad de este trabajo es caracterizar la incertidumbre que aportan distintas fuentes de variabilidad implicadas en la medición con sensores de tipo capacitivo en un cultivo de manzanos regado por goteo. Para ello se ha analizado (1) cómo varía en condiciones reales de campo la extensión superficial de los bulbos húmedos y su centrado respecto a los goteros, (2) el ajuste en laboratorio, para el suelo objeto de estudio, entre la permitividad dieléctrica y el contenido relativo de agua, que es el principio en que se basan los sensores de tipo capacitivo, y (3) la respuesta individual de los sensores Decagon 10HS a medios de permitividad dieléctrica conocida. Los resultados muestran que, aun fijando la posición de los sensores en relación a los goteros, la mayor fuente de desviación entre mediciones del contenido relativo de agua en el suelo corresponde a la propia variabilidad de los bulbos húmedos (RMSE = $0.088 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), mientras que la respuesta de distintos sensores individuales a la permitividad es muy repetitiva (RMSE = $0.003 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Un uso adecuado de sensores en condiciones de riego localizado deberá contemplar la variabilidad entre bulbos húmedos, tanto en la instalación de los sensores como en su interpretación.

Palabras clave: humedad del suelo, variación, bulbo húmedo, densidad aparente, sensores, riego localizado

Abstract

Drip irrigation applies water to the soil in an efficient way, reducing the wet surface and supplying water close to the root zone. However, it determines a heterogeneous distribution of water in the soil that complicates its monitoring with sensors. The purpose of this work was to characterize the main sources of uncertainty involved in the measurement with capacitive-type sensors in a drip-irrigated apple orchard. To that end, we analyzed (1) the variability in real field conditions of the extension and centering of wet bulbs, (2) the relationship in laboratory conditions, for the soil of interest, between dielectric permittivity and water content, which is the principle on which capacitive-type sensors are based; and (3) the response of individual sensors Decagon 10HS to different media of known electrical permittivity. The results show that, even at fixed positions relative to drippers, the largest uncertainties in the assessment of relative soil water content comes from the variability of the wet bulbs (RMSE = $0.088 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), while the response of individual sensors to permittivity was very repetitive

(RMSE = $0.003 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) An adequate use of sensors under localized irrigation should consider the variability between wet bulbs, both in the installation of the sensors and in their interpretation.

Keywords: soil water content, variability, wet bulb, bulk density, soil moisture sensors, localized irrigation.

1- Introducción

La gestión eficiente del riego es fundamental en la optimización del consumo de agua. La manera habitual de determinar las necesidades de riego se basa en el balance hídrico (Doorenbos and Prit, 1977, Allen et al., 1998). El balance hídrico se puede complementar con la monitorización en tiempo real del contenido de agua del suelo mediante el empleo de sensores de humedad, los cuales permiten optimizar la cantidad y la duración de riego aplicado. Dado el bajo coste y poco esfuerzo de mantenimiento, los sensores de capacitancia son los más empleados para determinar el estado hídrico del suelo a escala puntual (Bogena et al, 2007; Kizito et al, 2008).

Un problema que presenta el uso de sensores en la monitorización del riego localizado es la gran variabilidad entre datos obtenidos por sensores instalados en ubicaciones supuestamente equivalentes dentro de una misma parcela. Estos sensores son muy sensibles a variaciones locales de textura, estructura, macro poros, compactación del suelo, disposición de las raíces, presencia de materia orgánica y salinidad (Hignett and Evett, 2008). Además, en el riego localizado, se generan bulbos húmedos alrededor de los goteros, los cuales tienen una influencia variable en el entorno. Por ello es necesario conocer las fuentes de variabilidad implicada en la monitorización mediante este tipo de sensores en contexto de riego localizado, con la finalidad de plantearse dónde instalar los sensores y cómo interpretar las mediciones obtenidas.

2- Objetivo

Caracterizar y comparar en una misma escala de medición las incertidumbres atribuibles a distintas fuentes de variabilidad implicadas en la monitorización, mediante sensores capacitivos, del contenido de agua del suelo en una parcela de manzanos regada por goteo. En concreto, interesa distinguir entre la variabilidad propia de los bulbos húmedos, el efecto de las características locales del suelo en las mediciones y la repetibilidad entre los sensores.

El objetivo final es optimizar el uso de sensores de humedad de suelo en condiciones de riego localizado, contribuyendo a definir su ubicación óptima (profundidad y posición) y mejorar los métodos de interpretación de los sensores para la programación automatizada del riego.

Para comparar las distintas fuentes de variabilidad las hemos expresado todas en términos de error cuadrático medio (RMSE, de sus siglas en inglés), en unidades de contenido relativo de agua, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$.

3- Materiales y métodos

3.1. Localización.

El estudio se realizó en el año 2018 en una parcela de manzanos (*Malus domestica*, variedad Golden Reinders) localizada en la Estación Experimental IRTA en el municipio de Mollerussa (Lleida). Los manzanos fueron plantados en el año 2011, con un marco de plantación de 3,63 m x 1,2 m y orientación de norte a sur, en un suelo de tipo franco, cuyas características se describen en la Tabla 1. Esta plantación empleó un sistema de riego por

goteo que consistió en un tubo de riego con un caudal de 3.5 L h^{-1} , con goteros separados cada 60 cm.

Tabla 1. Características del suelo de la parcela de manzanos

Profundidad (m)	0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.8
Limo ($0.002 < d < 0.05 \text{ mm}$) %	40.7	40.6	40.6
Arcilla ($d < 0.002 \text{ mm}$) %	23.5	23.9	24.6
Arena ($0.05 < d < 2\text{mm}$) %	35.8	35.5	34.8
Clasificación USDA	Franco	Franco	Franco
Densidad aparente (Kg m^{-3})	1480	1500	1540

La parcela se monitorizó con sensores de humedad 10HS de la casa METER Group, los cuales tomaron datos de contenido de agua en continuo y los almacenaron en un datalogger CR1000 de Campbell Scientific, el cual era volcado periódicamente a través de un ordenador. Estos sensores estaban dispuestos en diversas profundidades (15cm, 30cm y 60cm) y posiciones relativas (centro del bulbo [A], entre goteros [B], periferia del bulbo [C] y fuera de la influencia del gotero [D]) (Figura 1)

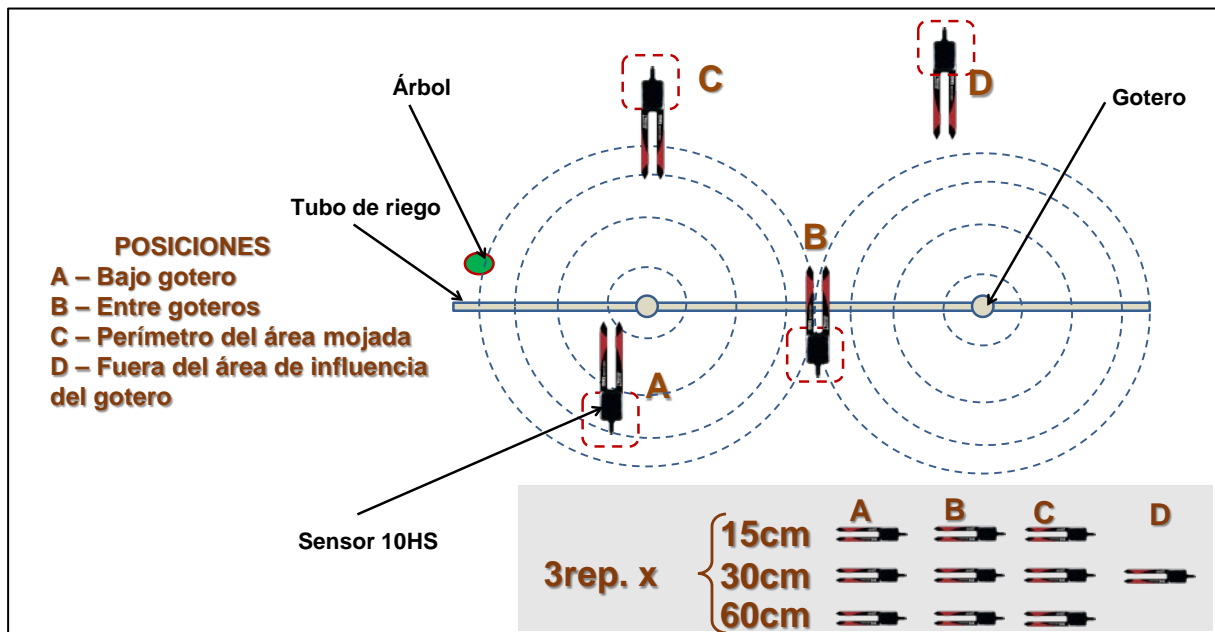


Figura 1. Profundidades y posiciones relativas de los sensores 10HS en la parcela de manzano

3.2. Mediciones experimentales.

- Caracterización de bulbos húmedos con el TDR Fieldscout 300.

Mediante el empleo del Fieldscout TDR 300 de Spectrum Technologies, Inc, se llevó a cabo la medición de bulbos de humedad con varillas de 12cm de longitud. Se realizaron mediciones de bulbo húmedo paralelas y perpendiculares al tubo de riego cada 10 cm. La finalidad fue determinar la extensión superficial y el centrado de los bulbos húmedos.

- Caracterización de muestras de suelo no alteradas.

Se tomaron muestras de suelo no alteradas con cilindros de volumen conocido de Eijkelkamp.

Por un lado, se tomaron muestras con cilindros de $\sim 100 \text{ cm}^3$ de volumen en todas las profundidades y posiciones, a ambos lados de la localización de cada sensor de humedad, para determinar la densidad aparente y ver si existían diferencias atribuidas a posición, profundidad u hoyo.

Por otro lado, se tomaron 8 muestras con cilindros de ~137 cm³ de volumen en las posiciones bajo gotero [A] y entre goteros [B] a 15-30cm de profundidad que se emplearon para relacionar y comparar la permitividad dieléctrica del suelo con su humedad. Estas muestras, se llevaron a laboratorio, se saturaron y se fueron secando a temperatura ambiente, midiendo periódicamente el contenido de agua del suelo y la permitividad dieléctrica. El contenido de agua fue obtenido a partir del peso y volumen de la muestra y el peso seco de la misma, obtenido al final del experimento por secado en estufa (65°C, 48h). La permitividad dieléctrica aparente de cada muestra se determinó con un sensor TDR CS 640-L conectado a un TDR 100 de Campbell Scientific. Finalmente se estableció una relación entre las mediciones del contenido de agua obtenido por pesada con la permitividad dieléctrica convertida a contenido de agua a partir del modelo de Topp et al. (1980) (Ecuación 1), empleado en numerosos trabajos de investigación y el modelo Complex Refractive Index Model (CRIM) (Ecuación 2) propuesto por Birchak et al. (1974) y calibrado en laboratorio de acuerdo a los datos de muestras de suelo obtenidos.

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot K_a - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot K_a^3 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$\theta = 100 \cdot \frac{K_a^\beta - (1-\eta) \cdot K_s^\beta - \eta K_{air}^\beta}{K_w(T)^\beta - K_{air}^\beta} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde K_a fue la permitividad dieléctrica aparente medida por el sensor, K_{air} fue la permitividad dieléctrica del aire con un valor de 1, la permitividad dieléctrica aparente del agua, K_w a 25°C fue 78.54 (Weast et al., 1986) y β fue un factor de forma que se asumió que tenía un valor de 0.5 (Pepin et al., 1995). La permitividad dieléctrica de la fase sólida, K_s y la porosidad, η fueron estimadas dependiendo de la muestra.

- Calibraciones de sensores 10HS en diferentes medios de permitividad conocida.

Para calibrar los sensores se empleó el montaje diseñado por Bogena et al. (2017) añadiendo un medio adicional. En total se emplearon 6 medios de calibración estándar (aire, glass beads y 4 mezclas de 2 isopropanol (ISO)), cuyas características se describen en la tabla 2. Los medios de referencia permitieron un contacto perfecto con los sensores y abarcaron rangos de permitividad dieléctrica comprendidos entre 1 y 34.8 cubriendo la mayoría de valores de permitividad que se encuentran en los suelos naturales.

Tabla 2. Propiedades del medio de calibración

Calibración estándar	Medio	Fracción de volumen de ISO	Fracción de volumen de agua	Permitividad de referencia
M1	Aire	-	-	1
M2	Glass beads	-	-	3.34
M3	ISO	1	0	12.70
M4	ISO/agua	0.92	0.08	18.14
M5	ISO/agua	0.80	0.20	26.26
M6	ISO/agua	0.68	0.32	34.82

Los sensores 10HS se introdujeron completamente en el medio de referencia y su respuesta se relacionó con la permitividad dieléctrica aparente empleando un modelo empírico adecuado (ecuación 3). Donde v es la respuesta del sensor (mV) y α , β y γ son parámetros de ajuste.

$$\sqrt{K_a} = \alpha \cdot v^\beta + \gamma \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Posteriormente mediante la ecuación de Topp (ecuación 1), se convirtieron los datos de permitividad dieléctrica aparente a contenido de agua y se comparó:

- ✓ Contenido de agua medido por los sensores con contenido de agua teórico del medio de referencia.
- ✓ Contenido de agua medido por cada uno de los sensores dentro del mismo medio de referencia.

4- Resultados y discusión

- Caracterización de bulbos húmedos con el TDR Fieldscout 300.

Mediante las mediciones del bulbo húmedo en torno al gotero realizadas con el TDR Fieldscout 300 se observó que la extensión más frecuente de los mismos en el eje paralelo al tubo de riego fue en torno a 55-70 cm y de aproximadamente 75-90 cm en referencia al eje perpendicular al tubo de riego. Asimismo, de acuerdo al punto de mayor contenido de agua medido, se determinó que la mayoría de bulbos estaban centrados y desplazados 5 cm del gotero, respecto al eje paralelo al tubo de riego, mientras que en el eje perpendicular se desplazaron entre 5-15 cm respecto al emisor (Figura 2).

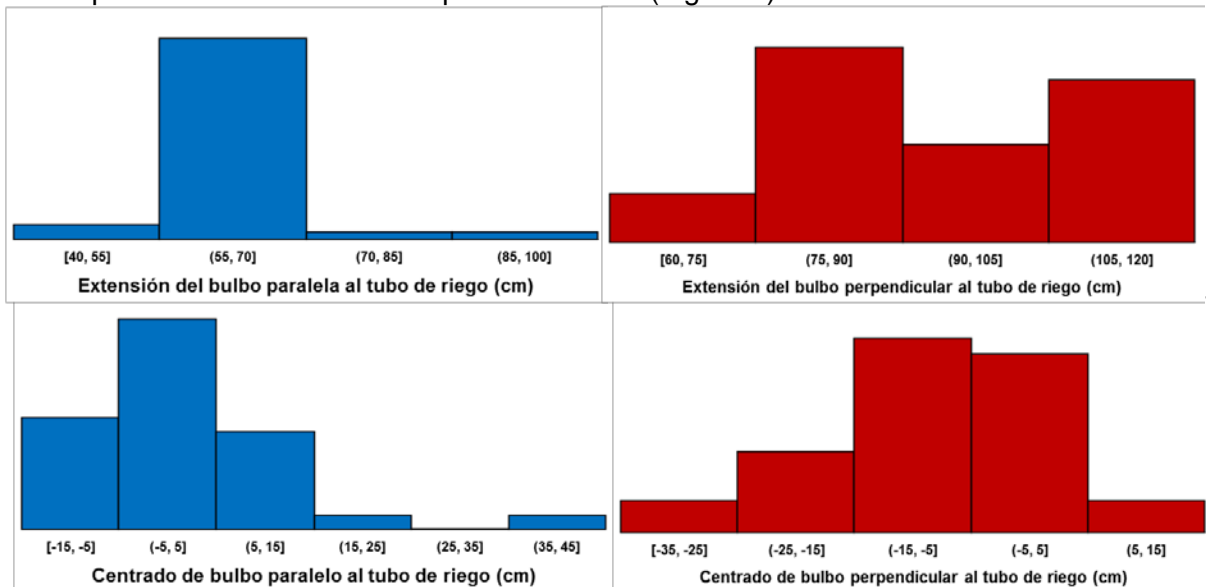


Figura 2. Medidas de extensión y centrado del bulbo húmedo.

Para determinar la incertidumbre atribuible a la variabilidad de los bulbos, se definió como “bulbo ideal” el patrón observado con mayor frecuencia en las mediciones y se comparó ese “bulbo ideal” con cada uno de los bulbos medidos. Los resultados mostraron que la mayor desviación en contenido relativo de agua respecto al bulbo ideal ($RMSE = 0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) fue en las mediciones perpendiculares al tubo de riego, ya que los bulbos no encontraron la barrera física de bulbos vecinos pudiéndose extender más, y por lo tanto tuvieron mayor número de configuraciones posibles en cuanto a tamaño y centrado. Mientras que, las mediciones paralelas al tubo de riego tuvieron una menor desviación ($RMSE = 0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), ya que los bulbos adyacentes supusieron una barrera que restringió la anchura y centrado de los mismos. En general, la mayor desviación respecto al bulbo ideal fue en extensión ($RMSE = 0.07\text{-}0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), más que en centrado de bulbo ($RMSE = 0.03\text{-}0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

- Caracterización de muestras de suelo no alteradas.

Por un lado, a partir de las muestras de suelo inalteradas tomadas con los cilindros de 100 cm^3 , en cada una de las posiciones, profundidades y hoyos, se calculó la densidad aparente y se vio que no existieron diferencias significativas entre posiciones y hoyos, mientras que en profundidad sí. Las principales diferencias fueron en profundidad entre los 15-30 cm y los

60 cm, con valores de densidad comprendidos entre $1.49 \pm 0.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y valores entre $1.53 \pm 0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ respectivamente.

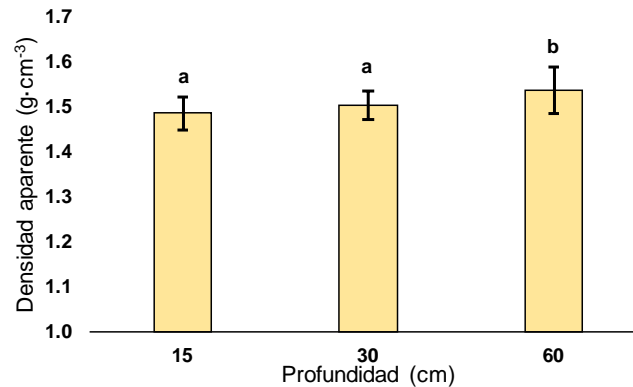


Figura 3. Densidad aparente media y desviación estándar por profundidad.

Por otro lado, para cada muestra de suelo inalterada tomada con los cilindros de 137cm^3 se relacionó la permitividad dieléctrica con su contenido de agua y se estableció un ajuste con el modelo de Topp et al (1980), el cual solo tuvo en cuenta la permitividad aparente medida, y por otro lado un ajuste con el modelo de CRIM calibrado en laboratorio y que tuvo en cuenta características específicas de cada tipo de suelo, como son la densidad aparente, la porosidad y la permitividad de la fase sólida (Tabla 3).

Tabla 3. Densidad aparente, porosidad y K_s de las muestras de suelo tomadas en las posiciones bajo gotero [A] y entre goteros [B] a 15 y 30 cm de profundidad

Muestra	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad (%)	Permitividad fase sólida, K_s (-)
Muestra 1-A15	1.56	0.41	5.3
Muestra 2-A15	1.41	0.47	7.4
Muestra 1-A30	1.57	0.41	5.8
Muestra 2-A30	1.47	0.44	6.1
Muestra 1-B15	1.41	0.47	6.5
Muestra 2-B15	1.50	0.43	5.7
Muestra 1-B30	1.46	0.45	5.9
Muestra 2-B30	1.50	0.43	6.2

En la Figura 4 se muestran los modelos empleados en el trabajo, los cuales relacionan la permitividad dieléctrica aparente con el contenido de agua. Se observa que el modelo de Topp, independientemente de la muestra de suelo que tengamos, siempre obtiene la misma curva, mientras que el modelo de CRIM al tener en cuenta características específicas del suelo, tiene una curva para cada densidad aparente, mejorando así su ajuste.

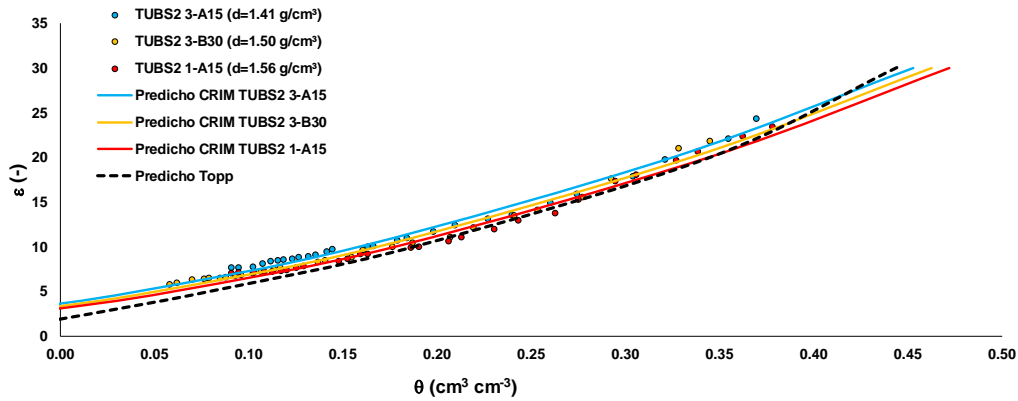


Figura 4. Relación entre la permitividad dieléctrica aparente y el contenido de agua mediante diferentes modelos.

Como se observa en la figura 5, cuando los valores de permitividad dieléctrica se convirtieron a contenido de agua mediante la ecuación de Topp y la ecuación de CRIM calibrada en laboratorio para cada una de las muestras, mejoró el ajuste entre contenido de agua medido por pesada y el predicho por el modelo a partir de la permitividad dieléctrica aparente, pasando de valores de $RMSE = 0.021 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ según el modelo de Topp a valores de $RMSE = \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ para el modelo de CRIM. Esto fue debido principalmente a que la ecuación de Topp utilizada por el fabricante, emplea un calibrado genérico para todos los suelos minerales, mientras que la ecuación de CRIM calibrada en laboratorio emplea un calibrado más específico, ya que tiene en cuenta parámetros como son la permitividad del suelo, aire, agua y porosidad del medio.

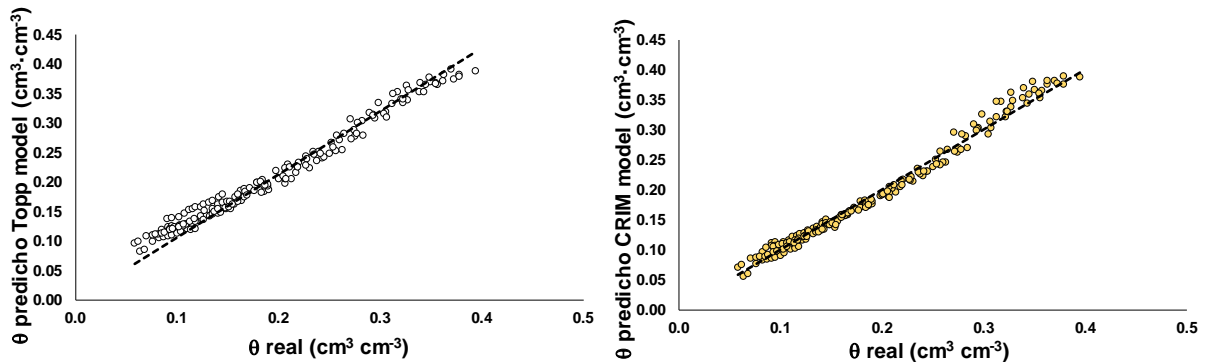


Figura 5. Contenido de agua determinado con la ecuación de Topp et al. y la obtenida por CRIM calibrada en laboratorio

- Calibraciones de sensores 10HS en diferentes medios de permitividad conocida.

Cuando se comparó cada uno de los sensores con los medios de referencia, se vio que a medida que aumentaba la permitividad del medio de referencia y por lo tanto el contenido de agua, los sensores obtenían valores cada vez más cercanos al del medio (Tabla 4) obteniéndose una $RMSE = 0.013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 6).

Tabla 4. Comparación entre contenido de agua de medio de referencia y medido por sensor de humedad

Medio de referencia	θ Medio de referencia (cm³·cm⁻³)	θ promedio medido (cm³ · cm⁻³)
Aire	-0.02	-0.01
Glass Beads	0.04	0.02
ISO 1	0.24	0.26
ISO 0.92	0.32	0.31

ISO 0.8	0.41	0.41
ISO 0.68	0.48	0.48

La variación en los niveles más bajos, pudo ser debida a cambios en los medios de calibración, los cuales tras varias calibraciones sufren alteraciones en sus propiedades. Entre las variaciones en las propiedades están las modificaciones en la densidad como es el caso del medio Glass Beads, así como variaciones en el medio de referencia ISO 1, el cual es un medio muy higroscópico y puede absorber humedad del ambiente alterando el contenido de agua medido, y variaciones si se sumergía en el medio de referencia el sensor entero o solo las puntas...

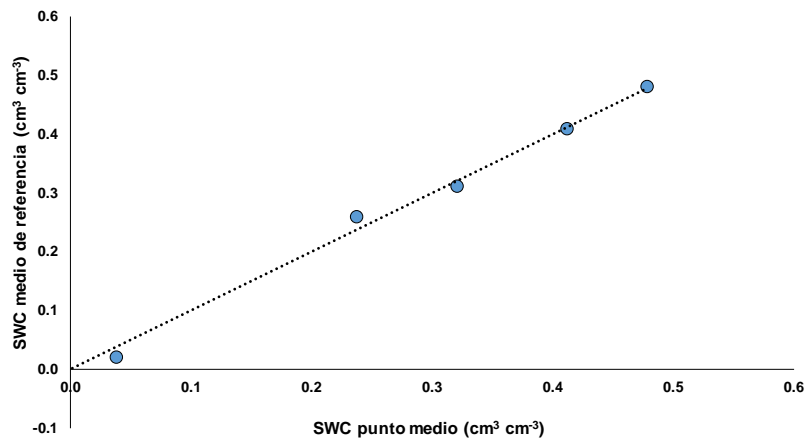


Figura 6. Comparación del contenido de agua medido por los sensores con el contenido de agua del medio de referencia

Cuando se compararon entre ellas las mediciones de cada uno de los sensores (Figura 7), se vio que la desviación de un sensor a otro en términos de contenido relativo de agua fue mínima, con valores de $RMSE = 0.003 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que podría ser atribuible a la variabilidad en los componentes electrónicos de los sensores.

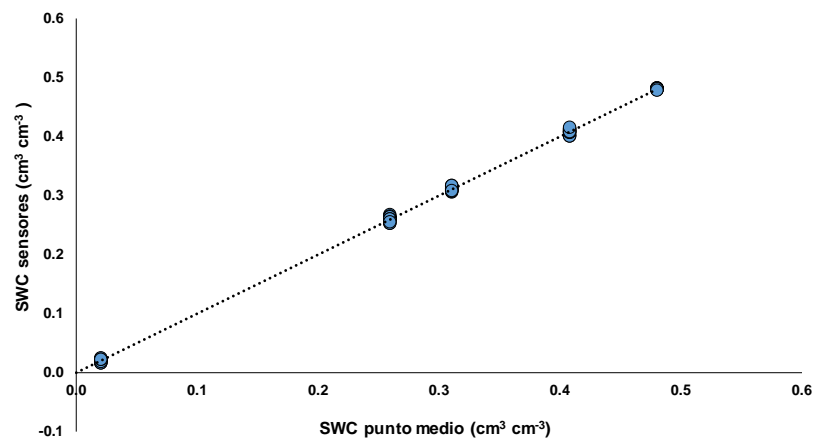


Figura 7. Repetibilidad entre sensores en los distintos medios de referencia

5- Conclusiones

La desviación de los bulbos reales respecto a un bulbo idealizado, el efecto de las propiedades locales del suelo y la respuesta de los sensores permiten explicar la variabilidad observada en los datos registrados por los sensores instalados en las diferentes posiciones y profundidades en el campo.

La incertidumbre de la medición vendrá determinada por la acumulación de cada una de las fuentes de variación estudiadas (Figura 8)

En la práctica se observa que las principales desviaciones en la medición del contenido de agua de suelo son las debidas a la variabilidad en anchura y centrado de los bulbos húmedos.

En relación a la densidad aparente se vio que no existían diferencias significativas en posición respecto al gotero ni entre bulbos, mientras que en profundidad sí se observaron diferencias entre 15-30 cm y 60 cm.

Mediante el modelo de CRIM calibrado en laboratorio para cada muestra de suelo, se mejoró ligeramente el modelo de Topp empleado en numerosos trabajos de investigación.

La variación en la medición de la humedad de suelo atribuidas a los sensores individuales 10HS es mínima e irrelevante con respecto a otras fuentes de variabilidad.

Para comprender la dinámica del agua en el suelo, es interesante muestrear la densidad aparente del suelo y realizar simulaciones de la dinámica de los bulbos húmedos en las posiciones que más información aportan. Dada la variabilidad del sistema, es conveniente disponer de sensores en posiciones repetidas para que la interpretación sea más robusta.

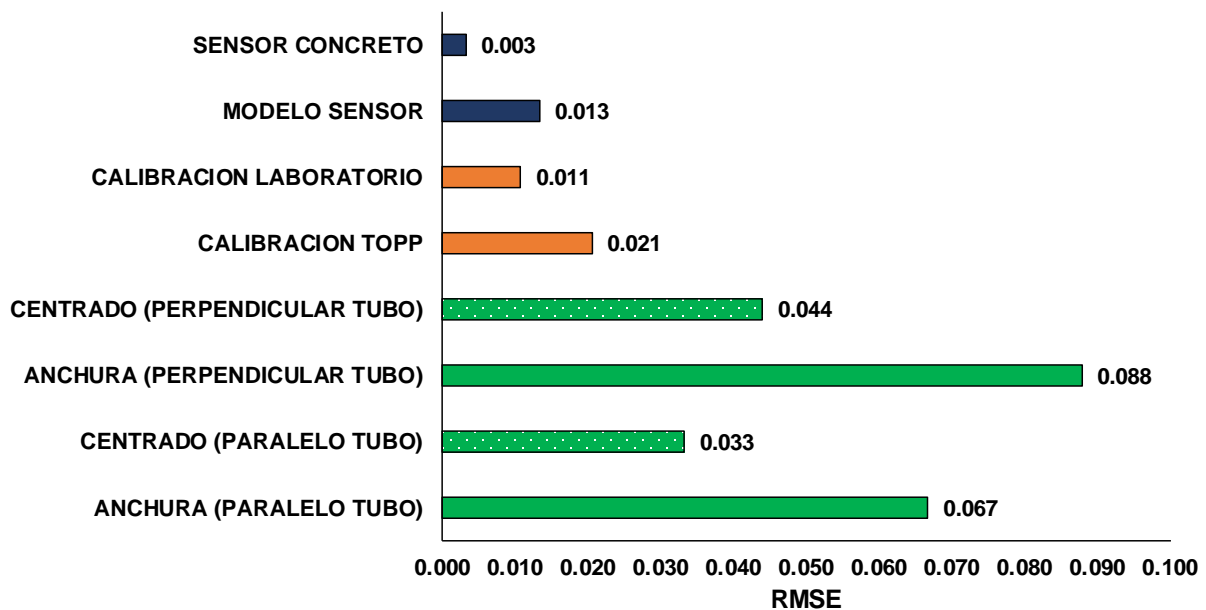


Figura 8. Desviaciones en la medición del contenido relativo de agua en el suelo, $m^3 m^{-3}$, atribuibles a distintas fuentes de variabilidad que intervienen en la medición mediante sensores de tipo capacitivo bajo riego localizado.

6- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) (Proyecto RTA2013- 00045-C04-01 y FPI INIA), por el Fondo Social Europeo y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

7- Bibliografía

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Irrigation and Drainage, (January 1998), 1–15.

Birchak, J. R., Gardner C. G., Hipp J. E., and Victor J. M. (1974). High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture, Proc. IEEE, 62(1), 93–98.

Bogena, H. R., Huisman, J. A., Schilling, B., Weuthen, A., & Vereecken, H. (2017). Effective calibration of low-cost soil water content sensors. Sensors (Switzerland), 17(1).

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.

Hignett, C., and S. Evett. 2008. Direct and surrogate measures of soil water content. In: IAEA, Eds. Field Estimation of Soil Water Content. A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. TRAINING COURSE SERIES No. 30, pp. 1-22. IAEA, Vienna.

Kizito, F., C. S. Campbell, G. S. Campbell, D. R. Cobos, B. L. Teare, B. Carter, and J. W. Hopmans. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. Journal of Hydrology 352, 367-378.

Pepin, S., Livingston, N. J., and Hook, W. R. (1995). Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determination of soil water, Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 38–43.

Weast, R. C. (Ed.) (1986), Handbook of Physics and Chemistry, 67th ed., CRC, Boca Raton, FL.