



Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad

Iban Iturria¹, Maider López¹, Unai Gómez¹, Miguel A. Campo-Bescós², Rafael Giménez²,
Jesús Alvarez-Mozos², Camilo Robles²

¹ Investigador, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; iban.iturria@unavarra.es

² Profesor, Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería; miguel.campo@unavarra.es

Resumen: La agricultura de regadío es una de las actividades que más agua utiliza, de hecho, según indica la ONU, el 70% del agua dulce disponible es utilizada por este sector. Esto convierte al regadío en uno de los ámbitos donde mayor esfuerzo se debe de realizar para optimizar el uso de los recursos hídricos. Uno de los elementos que proporciona información valiosa para ayudar a ajustar la dosis y frecuencia de riego son los sensores para medir el contenido de agua en el suelo. Si bien existe una amplia variedad de productos/dispositivos en el mercado dedicados a esta labor, su coste supone una limitación para su uso extensivo. Por el contrario, debido a su sencillo funcionamiento y facilidad de implementación las sondas capacitivas se presentan como una adecuada alternativa. A días de hoy, existen sondas de bajo coste procedentes del mundo aficionado (maker), sin embargo, todavía no se dispone de una adecuada evaluación. En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de 24 sondas de humedad de suelo de reconocidas casas comerciales y prototipos de sondas de bajo coste, con un doble objetivo: por un lado, evaluar la calibración de cada una de las sondas en suelos de textura contrastante, y por otro lado determinar el volumen explorado por cada una de ellas. La calibración de cada sonda, se han realizado en tres suelos de clases texturales contrastantes y en un amplio rango de humedad. Mediciones directas de la humedad del suelo fueron tomadas como valores de referencia. Se ha evaluado asimismo el volumen efectivo de medición de cada sonda. Los primeros resultados indican, que existen diferencias significativas en el comportamiento de las sondas dependiendo de los tipos de suelo analizados, así como en el volumen de suelo explorado por cada una de ellas.

Palabras clave: Sensores, sondas de humedad, volumen explorado, riego.

1. Introducción

La agricultura de regadío es una de las actividades que más agua dulce utiliza 70% según la ONU [1]. Esto la convierte en la actividad principal en la que se pueden tomar medidas para minimizar el desperdicio de este recurso. Además, la creciente presión de los mercados ha hecho que la agricultura tenga que maximizar el rendimiento que se obtiene de cada cultivo, por lo que este ahorro de agua no es un tema exclusivamente medioambiental, sino que se está convirtiendo en una necesidad para la sostenibilidad económica de algunos regadíos. Por ello además de utilizar sistemas de riego más eficientes (como puede ser el goteo), se utilizan métodos de estimación de necesidades de riego de tal forma que se minimiza la utilización del agua al óptimo requerido por los cultivos.

El consumo o necesidades de agua que demanda un cultivo, se conocen por el concepto de evapotranspiración. Éste hace referencia al agua que utiliza un cultivo como suma de la

transpiración de la planta en su actividad y de la evaporación del propio suelo. Dado que ambos fenómenos ocurren simultáneamente es muy difícil determinarlos por separado y se aúnan en uno solo. La evapotranspiración está fuertemente ligada a fenómenos meteorológicos y es por eso que existen numerosas técnicas para su determinación, uno de los modelos más utilizados es el de Penman-Monteith [2]. Estos métodos permiten determinar las necesidades puntuales de agua respecto a una fecha, estimar la cantidad de agua teórica que se ha perdido en un periodo de tiempo (diario o semanal) y finalmente aportar esa cantidad de agua a posteriori.

La medición continua de la humedad del suelo es una variable importante debido a que permite conocer la disponibilidad del agua por cultivos [3] y permite realizar una gestión integral del riego [4], siendo una variable hidrológica y climática fundamental [5]. Hay multitud de productos/dispositivos que pueden ser utilizados con esta función. Se pueden clasificar por las diferentes tecnologías que utilizan. Así nos encontramos los métodos más tradicionales como el de tacto [6] o el método gravimétrico/volumétrico, hasta la aparición de sondas de neutrones [7], sondas que miden la constante dieléctrica del suelo como las Time Domain Reflectometry (TDR) [8], [9], sondas capacitivas/FDR [10],[11] o las que estiman la resistencia del medio al paso eléctrico como las sondas resistivas [12]. La tecnología ha ido evolucionando con la aparición de otras tecnologías como Dual-Probe Heat-Pulse (DPHP)[13], Time Domain Transmission (TDT) [14] o Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry. Además, los métodos pueden ser destructivos (e.g. el método gravimétrico) o no destructivos (e.g. el TDR).

De los métodos anteriormente citados, los más utilizados en la actualidad son los que utilizan dispositivos electrónicos para estimar la humedad del suelo, especialmente sondas TDR y sondas FDR. Esto es debido a que estas tecnologías permiten conocer en tiempo real el estado hídrico del suelo y actuar en consecuencia más rápidamente.

Existe una amplia gama de sondas en el mercado, pero su coste supone una limitación para su uso extensivo. Por este motivo, debido a su sencillo funcionamiento y facilidad de implementación las sondas capacitivas se presentan como una alternativa cada vez más común y asequible, muchas de ellas procedentes del mundo aficionado (maker). Pero estas últimas todavía no han recibido la adecuada evaluación, lo que genera incertidumbre en la calidad de los datos recogidos.

En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de 24 sondas de humedad de suelo de reconocidas casas comerciales y prototipos de sondas de bajo coste. El objetivo del mismo es, por un lado, evaluar la calibración de cada una de las sondas en suelos de textura contrastante, y por otro lado determinar el volumen explorado por cada una de ellas.

2. Materiales y métodos

2.1. Suelos

Los suelos utilizados para realizar el ensayo han sido 3. Las clases texturales son: Franco Arcillosa, Franca y Arenosa Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de arena, limo y arcilla para cada suelo utilizado.

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Arena Gruesa (USDA)	7,5	80,9	27,4
Arena Fina (USDA)	14,6	12,8	20,1
Limos Gruesos (USDA)	18,1	2,3	12,7
Limos Finos (USDA)	29,2	1,0	19,4
Arena	22,1	93,7	47,5
Limo	47,3	3,3	32,1
Arcillas	30,6	3,0	20,4
Clasificación textural	Franco Arcillosa	Arenosa	Franca

2.2. Sondas de humedad

En el estudio se han utilizado 24 sondas de humedad (Tabla 2), tratando de recoger prácticamente la totalidad de las sondas disponibles a día de hoy. Dada la amplia variedad de sensores ha sido necesario emplear tres modelos de registradores (dataloggers) para recoger los datos.

Los registros de las sondas de humedad de bajo coste (I2C Capacitive Soil Moisture, Temperature and EC sensor (TINOVÍ), WaterScout (Spectrum), DF robot (DFRobot), SoilWatch 10 (Pinotech), Vegetronix VH400 y Chirp.) han sido realizados utilizando una placa Arduino UNO.

Las sondas de Decagon han sido utilizadas a través del datalogger em50 que permite obtener las lecturas tanto crudas como transformadas a contenido volumétrico de agua (VWC). En este caso se ha utilizado el software ECH2O Utility para programar el datalogger.

El resto de sondas han sido conectadas a un datalogger CR10X de CampbellScientific mediante el protocolo de comunicación SDI-12. Para programar el datalogger CR10X se han utilizado los programas PC200W y ShortCut.

Debido a que muchas de las sondas disponen de varios sensores de humedad, en este trabajo tan solo se ha evaluado un sensor por sonda.

Tabla 2. Sondas de humedad evaluadas.

Nombre	Casa Comercial COMERCIAL	Datalogger	Tipo
Soil Watch 10	Pino-Tech	Arduino	Capacitiva
10HS	Decagon	Decagon	Capacitiva
5TE	Decagon	Decagon	Capacitiva
EC 5	Decagon	Decagon	Capacitiva
TEROS 12	Decagon	Decagon	Capacitiva
GS 1	Decagon	Decagon	Capacitiva
Vegetronix VH400	Vegetronix	Arduino	TDR
Chirp	Wemakethings	Arduino	Capacitiva
DF robot	DF robot	Arduino	Capacitiva
Hydra-Probe II	Stevens	CR10X	Coaxial Impedance Dielectric Reflectometry
Drill & Drop Probe, 60cm TriSCAN, SDI-12	Sentek	CR10X	FDR
Drill & Drop Probe, 60 cm Moisture, SDI-12	Sentek	CR10X	FDR
HydraSCOUT 700mm	HSTI	CR10X	FDR
Sub-Surface Probe	AQUACHECK	CR10X	FDR
Classic Probe	AQUACHECK	CR10X	FDR
I2C Capacitive Soil Moisture sensor	TINOVÍ	Arduino	Capacitiva
TEROS 10	Decagon	Decagon	Capacitiva
CS655	Campbell Scientific	CR10X	Capacitiva
HD3910.1	Delta ohm	CR10X	Capacitiva
HD3910.2	Delta ohm	CR10X	Capacitiva
GroPoint Profile	GroPoint	CR10X	TDT 5
GroPoint Lite	GroPoint	CR10X	TDT5
GroPoint Pro	GroPoint	CR10X	TDT5
WaterScout	Spectrum	Arduino	Capacitiva

2.3. Ecuaciones de calibración

La metodología empleada de referencia para evaluar los ensayos es el método gravimétrico, es decir, después de realizar la medición con una sonda de humedad, se extrae una muestra y se pesa antes y después de secarla en una estufa durante 24h a 105°C. De esta forma se cuantifica el agua perdida durante el proceso de secado y se determina la cantidad de humedad de la muestra inicial. Así se obtiene el contenido volumétrico de agua real frente al estimado por las diferentes sondas. Se han realizado 6-5 (por disponibilidad) mediciones en suelo arenoso, 7 mediciones en suelo arcilloso y 5 mediciones en suelo franco con diferentes contenidos de humedad con todas las sondas. En todos los casos el rango de humedades fue entre 0 y 30%.

Dado que la cantidad de sondas a utilizar es considerablemente grande, se ha establecido un procedimiento a seguir para realizar los ensayos.

Para tener suelo suficiente como para obtener una muestra por sonda, se obtiene un volumen de 10 litros del suelo seco de interés y se almacena en un recipiente. Esta muestra se humecta con la cantidad de agua pertinente para cada ensayo. Posteriormente, se retiran 5L del recipiente inicial al recipiente de ensayos (recipiente graduado), se compacta la muestra a la densidad deseada con ayuda de una balanza y después se realiza la medición con la sonda. Posteriormente, se extrae una muestra para determinar su humedad por gravimetría y finalmente, se vierte el suelo nuevamente al recipiente de 10 litros y se mezcla para homogeneizarlo.

Este proceso se ha repetido para cada una de las sondas utilizadas y ha sido realizado para cada una de las humedades correspondientes en los 3 suelos estudiados.

Con los datos de humedad y las lecturas de las sondas se ha obtenido una ecuación de calibración para cada sonda. Debido a que la cantidad de mediciones/muestras obtenidas en cada tipo de suelo es reducida, como primer paso se ha procedido a realizar un ajuste lineal.

$$y = ax + b$$

Donde:

y = contenido volumétrico real

x = Lectura de la sonda

a = pendiente

b = punto de intercepción en la ordenada o intercepto

El objetivo de la calibración es obtener los valores de pendiente e intercepto de la ecuación de tal forma que se obtenga una recta capaz de relacionar los valores de las lecturas con la humedad del suelo determinada.

Para evaluar la precisión de cada sonda se ha obtenido el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación de cada una de las ecuaciones de calibración.

2.4. Volumen explorado por cada sensor

El volumen explorado para cada sonda se ha caracterizado registrando lecturas mientras las sondas se aproximan de un medio con una constante dieléctrica contrastante [15], en este caso aire y agua, realizando las medidas en las dos direcciones (agua-aire, aire-agua). Se han realizado medidas de forma continua para determinar el punto en el que cambia esta medida y se ha anotado la distancia desde un punto identificable en la propia sonda (este punto varía de una sonda a otra, por la diferente morfología que tienen). Este proceso se ha realizado en todas las posiciones posibles con cada sonda, de tal forma que al final del proceso es posible aproximar el volumen explorado por cada una de ellas.

Para poder realizar una medición precisa se ha utilizado una plataforma con un soporte vertical calibrado (con marcas métricas) y un mecanismo para controlar el desplazamiento de forma precisa de cada una de las sondas evaluadas. En la base de la plataforma se ha colocado

un cubo con agua, de tal forma que se ha tomado como punto de referencia la altura determinada por la lámina de agua.

Algunas de las sondas de bajo coste, no contaban con el aislamiento necesario para ser sumergidas en agua, es por ello que ha sido necesario proporcionarles un aislamiento de forma manual. Para ello se ha utilizado silicona en cinta, cinta aislante y finalmente se ha recubierto de plástico termo retráctil. El correcto funcionamiento de las sondas ha sido verificado después de realizar el proceso de aislamiento, comparando las mediciones de antes y después de ser sumergidas en agua.

A la hora de realizar el cálculo de volumen explorado, se ha tenido en cuenta que la superficie generada por los ejes perpendiculares a la sonda forma una elipse (Figura 1), pudiendo estar desplazado el centro del eje central de la sonda. Obteniendo el producto de dicha superficie y la distancia vertical explorada por las sondas se ha obtenido el volumen explorado.

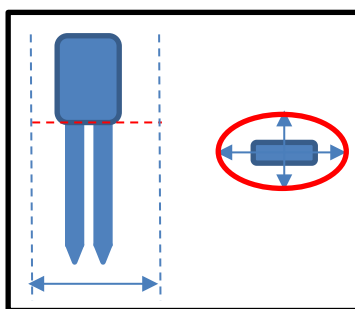


Figura 1. Esquema del cálculo del volumen explorado por las sondas.

3. Resultados y discusión

3.1. Ecuaciones de calibración

En la Figura 2 se presenta para cada sonda de humedad el RMSE de la ecuación de calibración por separado para cada tipo de suelo y de forma agrupada para todos los datos disponibles (general).

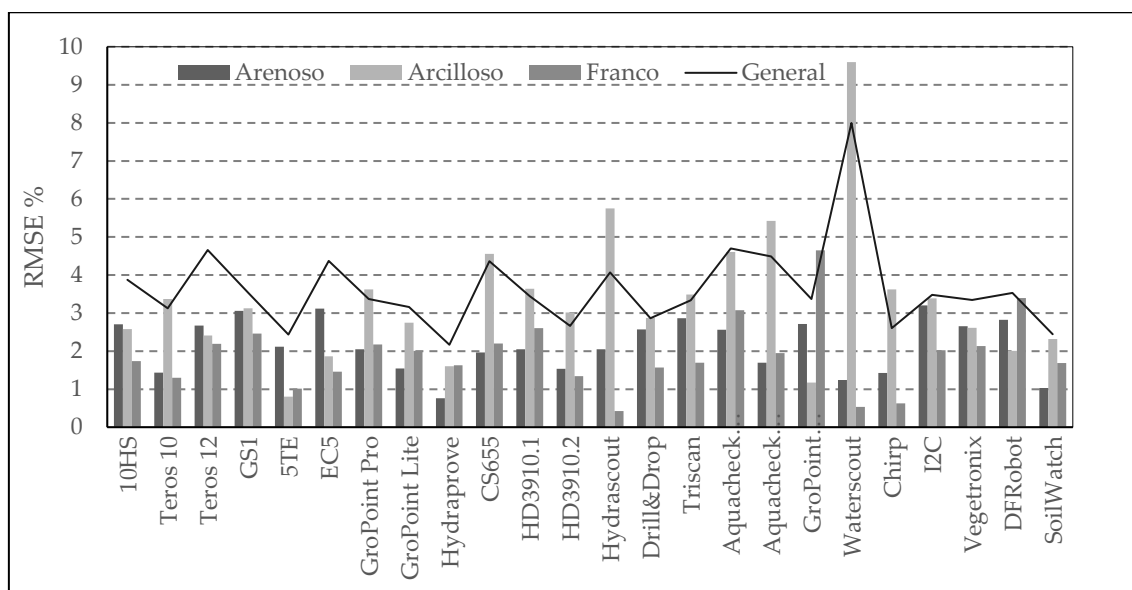


Figura 2. Comparación de errores para la calibración de cada suelo y sonda.

Como se puede apreciar en la Figura 2, en la columna correspondiente al suelo arenoso, la sonda cuya calibración obtiene mejores resultados es la Hydraprobe II con un RMSE inferior a 0,6% siendo seguido por las sondas SoilWatch y Waterscout con un error cuadrático medio entre 1-1.5%. Se puede apreciar que las calibraciones realizadas para las sondas low-cost tienen buena precisión en suelos arenosos exceptuando la sonda I2C.

En el suelo de textura arcillosa la precisión general de las calibraciones baja, siendo la 5TE la que mejores resultados obtiene, seguido de la GroPoint Profile. Además, se muestra gran variabilidad entre los errores cometidos por unas sondas y otras. Ocurre algo similar en el ensayo realizado por [16] apreciando un menor ajuste en suelos con mayor contenido en arcilla frente a suelos de otras clases texturales.

El ajuste de las sondas ha sido superior en el suelo de clase textural franca, se percibe que la precisión general de las calibraciones mejora, exceptuando GroPoint y DFRobot, el RMSE es inferior del 3%. Destacan principalmente la Hydrascout (0.43%) y la Chrip (0.69%).

En la calibración general de las sondas se puede observar que en general la ecuación que mejor se ajusta a cualquier tipo de suelo es la Hydraprobe II de Stevens con un RMSE de 2,17%.

3.2. Volumen explorado por sonda

En la Figura 3 se muestra el volumen explorado por cada uno de los sensores de las sondas evaluadas en el estudio. Los resultados muestran que hay diferencias superiores a 1000 cm³ de volumen explorado entre las sondas evaluadas. Según los ensayos realizados se puede apreciar que la sonda que más volumen explora es la Hydrascout (1309,65 cm³), seguido del resto de sondas de tipo cilíndrico que por su longitud permiten explorar un mayor volumen de suelo. Resulta interesante la observación de que las sondas de bajo coste tienden a explorar un menor volumen que las demás, siendo la Vegetronix la que menos volumen explora (0.09 cm³).

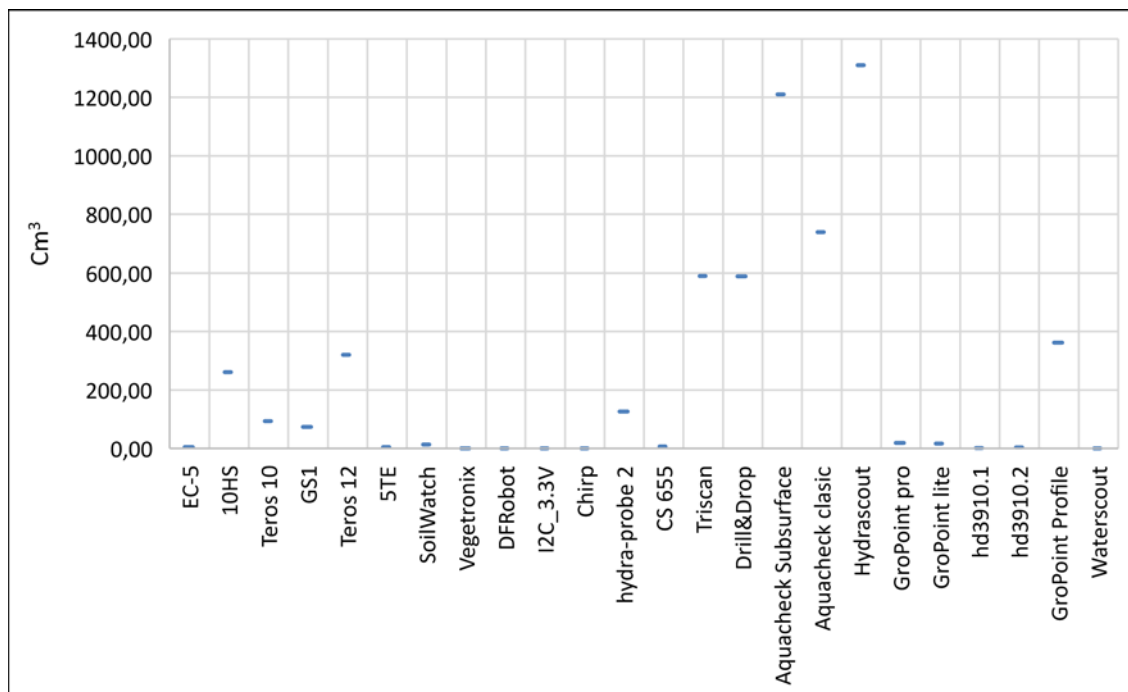


Figura 3. Volumen explorado por cada sonda en cm³.

4. Conclusiones

De forma preliminar, en el presente estudio se puede concluir que las sondas evaluadas en los 3 suelos contrastantes poseen calibraciones dispares lo que hace necesario una calibración específica para cada tipo de suelo si se desea obtener resultados fiables.

Las sondas evaluadas en condiciones de laboratorio poseen errores por tipo de suelo diferentes. Los resultados preliminares muestran que existen diferencias en la media de los errores cuadráticos medios de las sondas en función de la clase textural del suelo del ensayo. Así, el suelo franco es la textura que presenta menores errores, seguido del arenoso y finalmente el arcilloso del mismo modo que a [16]. Es por ello por lo que se considera el más favorable para determinar el contenido volumétrico de agua. En el caso de desear analizar otro tipo de textura puede ser interesante escoger un tipo de sonda dependiendo del modelo que mejor se adapte a la textura.

No se han detectado diferencias significativas en la precisión de las medidas entre sondas low cost y sondas de un precio más elevado. Los resultados obtenidos con las sondas low cost han presentado unos errores cuadráticos medios muy similares a las sondas de mayor coste, aunque bien es cierto, que estos resultados corresponden a ensayos realizados en laboratorio y es posible que el comportamiento de estas sondas se vea alterado en condiciones de campo donde variables como la temperatura y la presencia de sales puede afectar a la fiabilidad de la lectura [17].

Del estudio del volumen de suelo explorado se puede concluir que las sondas de bajo coste exploran un volumen más reducido que sus competidoras comerciales de amplia difusión. Esta es la principal limitación que se ha encontrado en este tipo de sondas a excepción de la SoilWatch de Pinotech.

Referencias

1. ONU, "Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible," 2019. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. [Accessed: 15-May-2019].
2. R. G. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos.," *Fao*, vol. 56, p. 297, 2006.
3. J. Mzezewa, E. T. Gwata, and L. D. van Rensburg, "Yield and seasonal water productivity of sunflower as affected by tillage and cropping systems under dryland conditions in the Limpopo Province of South Africa," *Agric. Water Manag.*, vol. 98, no. 10, pp. 1641–1648, 2011.
4. F. Kizito *et al.*, "Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor," *J. Hydrol.*, vol. 352, no. 3–4, pp. 367–378, May 2008.
5. H. Mittelbach, I. Lehner, and S. I. Seneviratne, "Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland," *J. Hydrol.*, vol. 430–431, pp. 39–49, Apr. 2012.
6. J. Singh *et al.*, "Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil," *Agric. Water Manag.*, vol. 196, pp. 87–98, Jan. 2018.
7. S. L. S.U., D. N. Singh, and M. Shojaei Baghini, "A critical review of soil moisture measurement," *Measurement*, vol. 54, pp. 92–105, Aug. 2014.
8. J. P. Walker, G. R. Willgoose, and J. D. Kalma, "In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques," *J. Hydrol.*, vol. 293, no. 1–4, pp. 85–99, Jun. 2004.
9. G. Clarke Topp and W. D. Reynolds, "Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil," *Soil Tillage Res.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 125–132, Jun. 1998.
10. Z. A. Bello, C. M. Tfwala, and L. D. van Rensburg, "Evaluation of newly developed capacitance probes for continuous soil water measurement," *Geoderma*, vol. 345, no. March, pp. 104–113, 2019.
11. H. R. Bogaen, J. A. Huisman, C. Oberdörster, and H. Vereecken, "Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications," *J. Hydrol.*, vol. 344, no. 1–2, pp. 32–42, Sep. 2007.
12. H. Kalita, V. S. Palaparthi, M. S. Baghini, and M. Aslam, "Graphene quantum dot soil moisture sensor," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 233, pp. 582–590, Oct. 2016.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

13. G. Ravazzani, "Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 133, pp. 9–14, Feb. 2017.
14. J. M. Blonquist, S. B. Jones, and D. A. Robinson, "A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics," *J. Hydrol.*, vol. 314, no. 1–4, pp. 235–245, Nov. 2005.
15. H. J. F. Benninga *et al.*, "The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 61–79, Jan. 2018.
16. J. L. Varble and J. L. Chávez, "Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado," *Agric. Water Manag.*, vol. 101, no. 1, pp. 93–106, Dec. 2011.
17. C. M. TFWALA, L. D. van RENSBURG, Z. A. BELLO, and P. C. ZIETSMAN, "Laboratory vs. Field Calibration of HydraSCOUT Probes for Soil Water Measurement," *Pedosphere*, vol. 29, no. 1, pp. 132–136, 2019.