

Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires

H. Salgado, C. Romay, S.M. Zabala y L. Génova

Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Av. San Martín 4453
C1417DSE, CABA
hasalga101@yahoo.com.ar

Resumen

El conocimiento de la humedad superficial del suelo es fundamental para el diagnóstico hídrico del cultivo y el manejo del agua de riego. Su medición ha sido un desafío tecnológico muy importante en las últimas décadas, dando origen a diversos métodos y técnicas. Principalmente se han desarrollado sensores, que permiten la medición espacial y temporal sin alterar significativamente las condiciones hidrodinámicas del suelo. Existen numerosos métodos, pero ninguno es aceptado universalmente para medir en todas las condiciones de suelo y para diferentes propósitos. El método más utilizado, y que sirve de referencia (patrón) para calibración de otros es el termo-gravimétrico, que también tiene sus limitaciones. En este trabajo se presenta la calibración del sensor Hydra Probe II (Stevens ©), que emplea la velocidad de propagación de un pulso electromagnético (en el rango de las microondas) para calcular la constante dieléctrica del medio en el cual se propaga, la cual, a su vez, es función del contenido de agua en el suelo. Factores como la temperatura, la textura del suelo, etc. pueden influir en dicha velocidad, por lo cual deben también registrarse. La experiencia se realizó en una zona serrana agrícola del centro de la Provincia de Buenos Aires (Latitud 37°00'S; Longitud 59°30'W), donde los suelos predominantes son Argiudoles, con textura franca arcillo-limosa, alto % de materia orgánica y buen drenaje. Se utilizó la sonda instalada a 10 cm de profundidad, y simultáneamente se realizaron mediciones gravimétricas mediante muestreo con barreno y de temperatura del aire en contacto con el suelo. La comparación de los registros del equipo HP II con los correspondientes medidos, bajo diferentes condiciones ambientales, arrojó un coeficiente de determinación $r^2 = 0,98$. Como conclusión, las mediciones ajustan muy bien con las medidas patrón, y el equipo HP II se presenta como una herramienta confiable para el monitoreo hídrico de campos bajo explotación agrícola.

Palabras clave: medición de la humedad del suelo; sonda Hydra Probe II

Introducción

El conocimiento del contenido volumétrico de agua en el suelo θ ($m^3.m^{-3}$) resulta clave para el balance energético e hidrológico, el transporte de agroquímicos a los cultivos y a las aguas subterráneas, para el manejo del riego y la agricultura de precisión. Existen múltiples medios para su medición, los cuales han sido objeto también de numerosos estudios y clasificaciones, manteniendo al método gravimétrico como Standard tradicional (Gardner, 1986; Gurovich, 1999).

Los métodos indirectos son aquellos, en los que se vale de alguna propiedad física del sistema agua-suelo, que varíe en función del contenido hídrico θ . Entre ellos se encuentran los que emplean señales de microondas y registran cambios en las propiedades dieléctricas del suelo ante diversos grados de humedad volumétrica del suelo (θ).

Por ejemplo, los métodos basados en la reflectometría en el dominio del tiempo (Time Domain Reflectometry TDR) permiten medir la cantidad volumétrica de agua libre en el

suelo (Topp *et al.*, 1980). Una sonda reflectométrica está constituida por un generador de señal, una guía de onda, un oscilador y un muestreador. La medida del θ pasa por la determinación de la constante dieléctrica del suelo (ϵ), la cual se calcula a partir del tiempo de tránsito de un pulso electromagnético a través del suelo a lo largo de la sonda. Este tiempo de propagación de las ondas en el suelo varía según la constante dieléctrica relativa del suelo. La constante dieléctrica medida del suelo es función de las constantes dieléctricas de sus constituyentes, es decir el aire ($\epsilon = 1$), las partículas minerales de suelo ($\epsilon = 3$ a 5) y el agua ($\epsilon = 80$). La del agua es ampliamente dominante, y determina la constante dieléctrica global del suelo. A partir de los parámetros de la curva y la ecuación de Topp *et al.* (1980) se puede relacionar la constante dieléctrica con el tenor en agua volumétrica, el cual es representativo de la humedad del horizonte superficial del suelo.

La atenuación de la señal de microondas varía en función al contenido hídrico. Orden *et al.* (1995) determinaron en laboratorio la humedad en suelos con diversa textura y contenido de materia orgánica, utilizando un equipo con frecuencia de 9450 MHz y $\lambda=3,2$ cm, obteniendo resultados alentadores para su empleo en sistemas de riego automatizados.

Fabregat-Santiago *et al.* (1999) estudiaron los métodos basados en la medida de la constante dieléctrica del conjunto suelo-aire-agua para frecuencias desde 10 kHz hasta 10 MHz, para diversos estados energéticos del agua en el suelo, detectando una importante influencia de la textura del mismo.

Evet & Parkin (2005) realizaron una detallada recopilación de métodos e instrumentos empleados para detección de la humedad del suelo en la zona no saturada (vadosa), principalmente aquellos novedosos basados en la respuesta electromagnética (EM) del suelo, incluyendo la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), la reflectometría en el dominio de la frecuencia o capacitancia (FDR frequency devices) y el radar penetrante terrestre (GPR).

En este trabajo se presentan los resultados preliminares con el sensor dieléctrico Hydra Probe II (Stevens ©), el cual exhibe características diferenciales, que condujeron a que sea ampliamente empleado en experimentos realizados por el Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA), y en redes de validación de datos de satélites de microondas, mencionados por Seyfried & Murdock (2004).

Material y métodos

La experiencia se llevó a cabo en una cuenca hídrica ubicada en una zona productiva agrícola del Partido de Azul, centro de la Provincia de Buenos Aires, donde se vienen realizando mediciones de humedad del suelo desde hace más de 10 años (Fig. 1). Los muestreos se realizan con barreno, y se determina la densidad aparente (δ_{ap}) para poder transformar las mediciones gravimétricas en volumétricas. En este sitio la δ_{ap} para el estrato superficial (10cm) resultó igual a 1,1 en promedio.

La zona presenta relieve ondulado, con capa de loess de hasta 2 m de espesor en los pedemontes, que se apoya sobre la tosca, con pendientes medianas a altas (más de 5%), red de drenaje dendrítica, suelos bien drenados (en su mayoría Argiudoles), alto % de materia orgánica y textura franca (“loam” en inglés).

El posicionamiento se realizó con un navegador GPS Garmin E-Trex Legend. Las coordenadas geográficas del sitio son Latitud 37°09'10,5"S; Longitud 59°41'38,6"W, en el sistema de referencia geodésico WGS84 (Fig.1)



Figura 1: Ubicación geográfica de la zona piloto y posicionamiento de la Sonda (S)

Se utilizó una Sonda Hydra Probe II (Fig.2), que a diferencia de los otros sensores dieléctricos, se basa en la Reflectometría Dieléctrica de Impedancia Coaxial, para lo cual su oscilador genera un pulso electromagnético a 50 MHz, que se propaga por la varilla central y penetra en el suelo. Parte de tal señal se retro-refleja hacia la unidad, y el sensor mide la amplitud de la señal reflejada y la correspondiente incidente en Volts. El cociente entre estos 2 voltajes se utiliza en la solución numérica de un sistema de ecuaciones de Maxwell para calcular la impedancia primeramente, y luego las constantes (permisividades) dieléctricas real e imaginaria, que son utilizadas para estimar θ con precisión.



Figura 2: Sonda Hydra Probe II

El equipo de medición completo (Fig. 3) consta de:

1. Sonda HP II
2. Cable e interfaces RS485 y RS232
3. Conector USB (para conectarse con computadora portátil "Notebook")
4. Computadora portátil, con software para captura y almacenamiento de datos
5. Batería de 12V (alimentación)

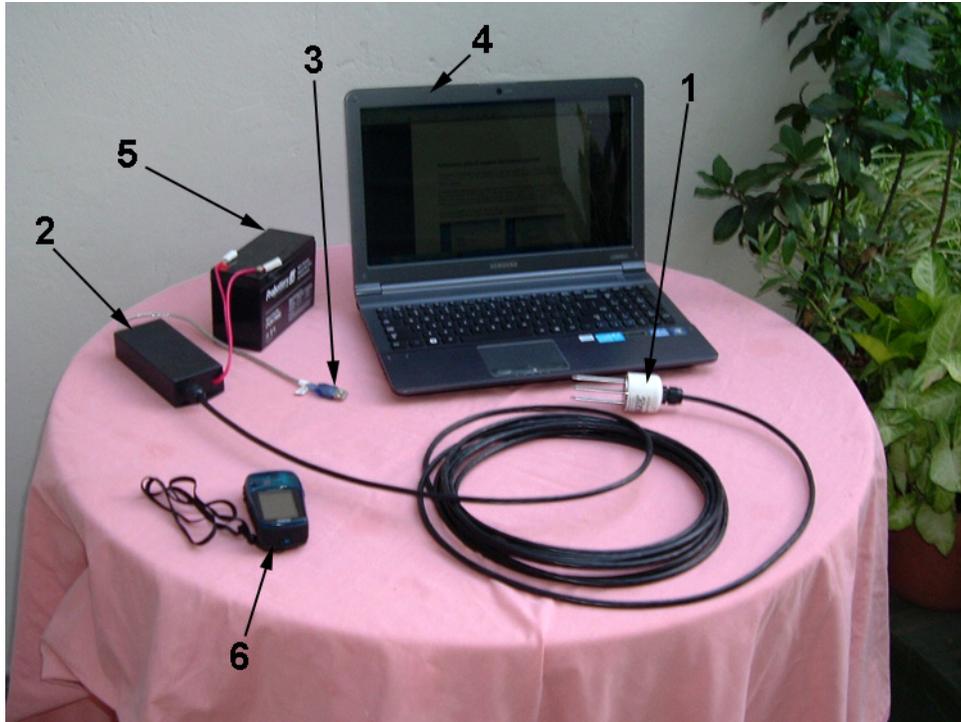


Figura 3: Componentes del equipo de campo: 1 Sonda Hydra Probe II; 2 Interfaces RS485-RS232; 3 Conexión USB; 4 Notebook; 5 Batería de 12V; 6 Posicionador GPS

La instalación del sensor requirió la elección de un lote representativo, la limpieza del sitio (Fig. 4), la realización del pozo, la instalación a la profundidad elegida (10 cm en este caso), el cierre del pozo respetando la capa de tierra removida, la protección del sitio con una alambrado y varillaje ad hoc, y la marcación de la posición precisa de la sonda a través del cruce de cuerdas tensadas desde estacas en cruz (Fig. 5)



Figura 4: Elección y limpieza del sitio de instalación de la sonda



Figura 5: Sitio de medición operativo. 1 Varillaje perimetral; 2 Estacas de posicionamiento (monografía) del punto de medición; 3 Notebook; 4 Abrigo para conectores y batería.

Dado que el comportamiento eléctrico de muchos suelos puede relacionarse con su textura (Birkeland, 1999), la clase textural ha sido seleccionada para una apropiada curva de calibración y para predecir la capacidad de almacenamiento de los suelos (ver Fig. 6).

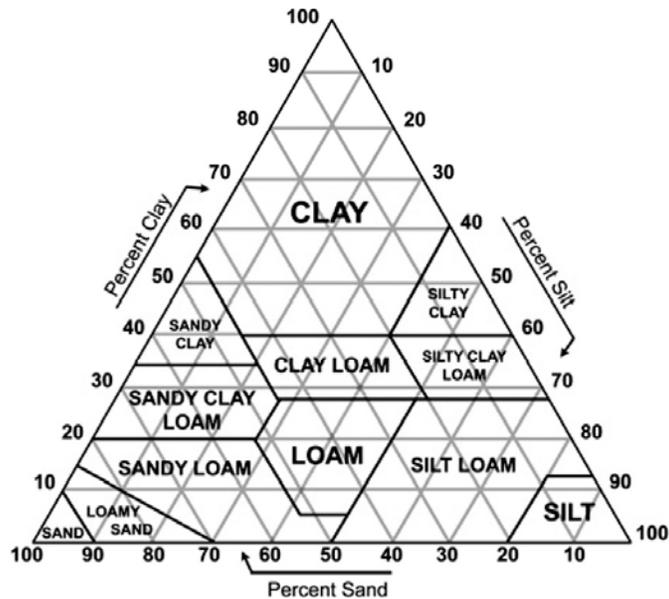


Figura 6: Triángulo textural (según USDA, 1993)

La relación entre θ y ϵ puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones (1) a (4). Las ecs. (1) y (3) utilizan la constante dieléctrica real, corregida por la temperatura, mientras que las Ecs. (2) y (4) usan la ϵ real no corregida por temperatura (Bellingham, 2007).

$$\theta = A + B\varepsilon_{R,TC} + C\varepsilon_{R,TC}^2 + D\varepsilon_{R,TC}^3 \quad (1)$$

$$\theta = A + B\varepsilon_R + C\varepsilon_R^2 + D\varepsilon_R^3 \quad (2)$$

$$\theta = A\sqrt{\varepsilon_{R,TC}} + B \quad (3)$$

$$\theta = A\sqrt{\varepsilon_R} + B \quad (4)$$

donde:

θ es la humedad del suelo volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

$\varepsilon_{R,TC}$ es la constante dieléctrica real corregida por temperatura

ε_R es la constante dieléctrica real sin corregir por temperatura

A, B, C y D son coeficientes, que se utilizan en la Tabla 1.

Tabla 1: Coeficientes de calibración, en función de clase textural y mineralogía (según Bellingham, 2007)

Soil Texture	Equa-tion	A	B	C	D	Pedology/Mineralogy
Sand (1)	1	-8.63	3.216	-9.54 E-2	1.579 E-3	Most Sands (Default)
Silt (1)	1	-13.04	3.819	-9.129 E-2	7.342E-4	(Default)
Clay (1)	2	-20.93	6.553	-0.2464	3.2414E-3	(Default)
Loam (1)	4	0.109	-0.179			Suitable for Most Soils (Default)
Silt Loam (1)	3	0.1226	-0.1903			A Horizon
Sandy Loam (1)	4	0.1017	-0.1786			A Horizon
Sandy Clay Loam (1)	4	0.1132	-0.1989			Bk Horizon
Loam (2)	4					Bk Horizon
Sandy Loam (2)	3	0.1251	-0.2065			Ap Horizon/Kaolinite
Clay (2)	4	0.1111	-0.1725			Bt Horizon/Kaolinite, Gibbsite
Sandy Loam (3)	4	0.1070	-0.1825			A Horizon
Loam (3)	3	0.1170	-0.1847			Ap Horizon/ Kaolinite, Vermiculite
Loam (4)	3	0.1161	-0.1909			E Horizon
Silty Loam (2)	3	0.1031	-0.1648			Ap Horizon/Montmorillonite
Silty Clay Loam (2)	4	0.0967	-0.1613			Bg Horizon
Silty Loam (3)	3	0.0958	-0.1610			Bw Horizon
Clay Loam	4	0.1033	-0.1768			A Horizon/Montmorillonite
Silty Clay	4	0.1088	-0.1738			Bg Horizon Montmorillonite
Silty Loam (4)	4	0.1004	-0.1588			
Loamy Sand	3	0.1204	-0.2025			Ap Horizon
Sandy Loam (4)	3	0.1105	-0.1725			Ap Horizon
Sandy Clay Loam (3)	3	0.1078	-0.1723			Bt Horizon
Silty Clay Loam (4)	4	0.1033	-0.1702			A Horizon

Los coeficientes A a D, de la Tabla 1, pueden usarse en las Ecs. (1) a (4) para obtener θ para los distintas clases texturales de suelos (Seyfried *et al.*, 2005).

Dado que, en general, la vibración molecular aumenta con la temperatura, la ϵ real disminuye, puede aplicarse una corrección para el agua a 50 MHz, según la Ec. (5):

$$\epsilon_{R,TC} = \epsilon_R * 1.011 / (1.045 - 0.00225 * T) \quad (5)$$

donde T es la temperatura en °Celsius.

Resultados y discusión

A los fines de comprobar la bondad de las estimaciones de θ , se realizaron campañas de medición con muestreo superficial (10 cm) simultáneamente con los registros de sonda.

En la operación de “bajada de datos”, además del contenido hídrico θ , se registra una serie de valores, entre los cuales interesan la temperatura (°Celsius), las conductividades eléctricas CE ($S.m^{-1}$) corregida (CE_T) y no corregida por temperatura (CE), y las constantes dieléctricas real e imaginaria, con y sin corrección por temperatura (sin unidades).

Como ejemplo, para la campaña del 3/3/12, algunos de los valores registrados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos registrados el 3/3/12

T (°C)	θ ($m^3.m^{-3}$)	CE_T ($S.m^{-1}$)	ϵ_R	$\epsilon_{R,TC}$	CE ($S.m^{-1}$)
21,1	0,298	0,028	19,176	19,448	0,027

Se observa que la sonda HP II provee directamente los valores crudos (voltajes y otros parámetros) y los calculados, con y sin correcciones por temperatura, aplicando la Ec.(4) para suelos francos (Loam). Es notorio que la corrección de ϵ_R por temperatura, aplicando la Ec. (5), solo influye en los decimales, para las condiciones ambientales dadas. La influencia de la temperatura en la CE modifica la tercera cifra decimal. También es observable que el cálculo del contenido hídrico θ , para la mayor parte de texturas de suelos, es suficientemente aproximado con Ec. (4).

Los resultados de las primeras campañas se presentan en Fig. 7.

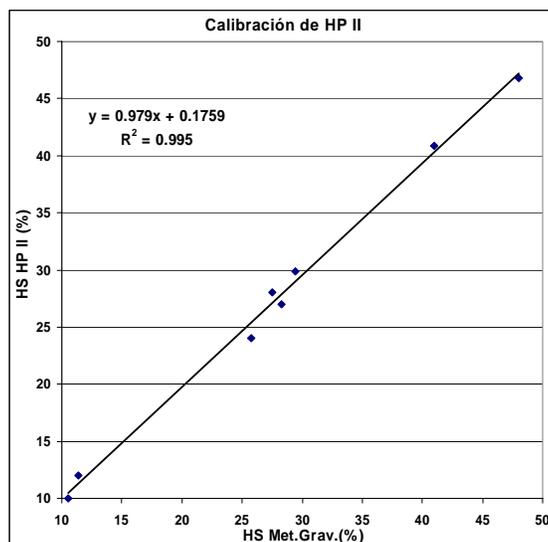


Figura 7: Correlación lineal entre la humedad del suelo (HS) medida por HP II y la correspondiente por método gravimétrico patrón

La recta de regresión simple presenta una pendiente (0,979) y ordenada al origen (0,176) muy cercanas al ajuste óptimo (pendiente 1; ordenada 0), con un ajuste excelente ($r^2 = 0,995$).

En síntesis, sólo se han realizado hasta el momento pocas campañas, y resta complementar con más datos y diversas condiciones ambientales. Pero, en vista de los resultados preliminares presentados, se vislumbra la confiabilidad de este equipo para estimar la humedad del suelo en la zona de alta variabilidad, cercana a la superficie (10cm).

Referencias bibliográficas

Bellingham, K., 2007. The Stevens Hydra Probe Inorganic Soil Calibrations. Stevens Water Monitoring Systems Inc., Portland, Oregon, USA, 5 pp.

Birkeland, P.W., 1999. Soils and Geomorphology. 3rd Ed. Oxford University Press, 1999.

Evelt S. R. y G. W. Parkin, 2005. Advances in Soil Water Content Sensing. The Continuing Maturation of Technology and Theory. Vadose Zone Journal 4:986-991 (2005)

Fabregat-Santiago, F., N.S. Ferriols, G. García-Belmonte, J. Bisquert y I. Morell, 1999. Estudio de los diferentes estados energéticos del agua del suelo en función de los fenómenos de relajación dieléctrica. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Eds. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascon. ICCIA, Tenerife, 1999.

Gardner, W.H., 1986. Water Content p.493-544. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 0. ASA and SSSA, Madison, WI.

Gurovich, L.A., 1999. Riego superficial tecnificado. Ed. Alfaomega, 610pp.

Orden S., M. Goldberg, N. Arrigo, A. LandinI, C. Sainato y L. Bottini, 1995. Medición del contenido hídrico del suelo por medio de una señal de microondas. Agronomía Costarricense, 19(1), 1-5 (1995).

Seyfried M.S, and M.D. Murdock, 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor. Soil Sci. Soc. Am. Journal 68:394-403 (2004).

Seyfried M.S, L.E. Grant, E. Du and K. Humes, 2005. Dielectric loss and calibration of Hydra Probe soil water sensor. Vadose Zone Journal 4:1070-1079 (2005).

Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission line. Water Resources 16:574-582.

US Soil Survey Staff, 1993. Soil Survey Manual. Soil Survey Division Staff, US. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N°18, USA, 437 pp,