

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA SONDA TDR PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Martínez Fernández, J. y A. Ceballos Barbancho

Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca. Cervantes, 3. 37002-Salamanca. jmf@gugu.usal.es

RESUMEN. En el presente trabajo se describe el diseño de una sonda (patente en tramitación) para medir la humedad del suelo mediante la técnica TDR (*Time Domain Reflectometry*). El modelo propuesto presenta una serie de ventajas sobre otros anteriores y se caracteriza, entre otras cosas, por su versatilidad, fácil montaje y conexión, robustez, estanqueidad, nitidez de la señal y bajo coste económico. Se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de validación, comparando series de mediciones de humedad medida con TDR y gravimétricamente en monolitos de suelos con diferentes características, obteniendo en todos los casos un resultado satisfactorio ($R^2 = 0.9$, $N = 171$).

ABSTRACT. This paper describes a probe design (patent in procedure) to measure the soil moisture using the TDR (Time Domain Reflectometry) technique. In contrast to former designs, the TDR-probe proposed has a serie of advantages and it is typified by its versatility, easy assembly and connection, toughness, watertight, sharpness in the graph of the pulse and low cost. An exhaustive analysis of validation was carried out comparing series of simultaneous measurements of volumetric water content using TDR-technique and gravimetric method in inaltered soil samples with different characteristics. In all cases, the obtained result was satisfactory ($R^2 = 0.9$, $N = 171$).

1.- Introducción

El conocimiento del contenido de agua en el suelo o humedad edáfica es fundamental para explicar una serie de procesos de índole diversa: balances de agua, tasas de infiltración, generación de escorrentía, riesgos hidrológicos, crecimiento y desarrollo de cultivos, estabilidad de formaciones forestales, modelización hidrológica, etc (Bergkamp, 1996; Fitzjohn et al. 1998; Kutilek y Nielsen, 1994; Gómez Plaza, 2000; Martínez Fernández y López Bermúdez, 1996; Pritchett, 1986; Ward y Robinson, 2000). Desde hace dos décadas, la técnica TDR (*Time Domain Reflectometry*) ha sido la que más difusión ha alcanzado para medir la humedad edáfica hasta superar los métodos considerados tradicionales (gravimetría, sonda de neutrones, resistencia eléctrica, etc).

En la técnica TDR confluyen diversas aplicaciones industriales en el campo de la electrónica, ideadas en su momento para detectar anomalías en las líneas de transmisión eléctrica, y la respuesta del campo eléctrico de los constituyentes del suelo. En las dos últimas décadas,

muchos investigadores han utilizado esta metodología para medir el volumen de agua edáfica a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo. Topp *et al.* (1980), Topp y Davis (1985), Dasberg y Dalton (1985), establecieron los principios que relacionaban la constante dieléctrica del suelo (K) con el volumen de agua (θ) contenido en sus poros. El principio se basa en el alto valor de la constante dieléctrica del agua (80), frente a la de otros elementos como el aire (1) y las fracciones mineral y orgánica (entre 3 y 7) presentes en el suelo.

La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad (Cassel et al. 1994). La constante dieléctrica del suelo es la propiedad que determina dicho tiempo de tránsito.

La velocidad de propagación, V_p , de la onda generada por el TDR o ecómetro viene dada por

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (1)$$

siendo L la distancia a la que viaja la onda a lo largo de la línea de transmisión y t el tiempo requerido. Como quiera que el ecómetro registra el viaje de ida y vuelta a lo largo de las líneas de transmisión, quedaría

$$V_p = \frac{2l}{t} \quad (2)$$

siendo l la longitud de las varillas de la sonda o líneas de transmisión.

La velocidad de propagación de una onda también puede escribirse como

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (3)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y K la constante dieléctrica relativa del medio. Igualando las ecuaciones (2) y (3), y despejando K , resulta:

$$K = \left(\frac{ct}{2l} \right)^2 \quad (4)$$

Topp *et al.* (1980), a partir de la experimentación con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad, obtuvieron la siguiente ecuación empírica que relaciona K y el contenido de humedad volumétrica del suelo, θ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$):

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (5)$$

La universalidad de esta ecuación ha permitido la

utilización del TDR en suelos muy diferentes y ambientes contrastados.

La técnica TDR ofrece una serie de ventajas entre las que destacan la rapidez de las mediciones, la posibilidad de realizarlas en un mismo punto de forma continuada, establecer el perfil de humedad de un suelo mediante sondas instaladas a diferentes profundidades, un alto grado de precisión de las mediciones y un mínimo impacto sobre el terreno. Esta técnica se emplea también para la medición de la conductividad eléctrica de los suelos (Dalton, 1992).

Para la utilización de la técnica TDR es necesario disponer del siguiente equipo. i) Un ecómetro (*cable tester*) capaz de generar un impulso y recibir la respuesta del mismo mediante un osciloscopio que permita visualizar la reflexión. ii) Una sonda que es introducida en el suelo para guiar la onda electromagnética dentro del medio poroso, reflejando los cambios de impedancia que se produzcan. La amplitud de esa señal será la base de la medida. iii) Un cable de conexión entre la sonda y el ecómetro. En la mayor parte de los diseños comerciales para la medición de la humedad del suelo (por ejemplo, TRIME, TRASE, ThetaProbe, etc.), los tres componentes forman una unidad inseparable de funcionamiento, lo que encarece notablemente su utilización cuando se requiere un número elevado de sondas.

Independientemente de los aparatos comerciales, muchos equipos de investigación, dedicados al estudio de la humedad del suelo, están experimentando con diseños propios de acuerdo con sus objetivos particulares. Tanto el ecómetro como el cable de conexión no suelen generar problemas: en el primer caso, existen varios modelos comerciales disponibles, siendo uno de los más utilizados el *Tektronix® 1502C*; en el segundo caso, un cable coaxial de 50 ohm evita cualquier pérdida de reflexión entre el aparato y la sonda. Por tanto, es la sonda el elemento fundamental para aplicar la técnica con éxito y sacarle el máximo partido a sus numerosas posibilidades.

El objetivo del presente trabajo es la descripción del diseño de una sonda (patente en tramitación) muy versátil, que ofrece una serie de ventajas sobre otros modelos (fácil montaje y conexión, robustez, estanqueidad, nitidez de la señal, bajo coste económico, etc). También se analiza la validación de la misma utilizando muestras de suelo con texturas contrastadas y comparando series de valores medidos con TDR y valores obtenidos por medio del método gravimétrico.

2.- Diseño de sondas tdr

2.1 Antecedentes

Desde los inicios del desarrollo de la metodología TDR, ha habido diferentes aportaciones en relación con el diseño de las sondas para la medición de la humedad del suelo. Las variaciones entre unas y otras se han centrado en aspectos tales como el tipo de cable y sus características de impedancia, la conexión con la sonda, el número de varillas y su disposición y dimensiones (longitud, L ; diámetro, d ;

separación, s). Este último aspecto, el de las dimensiones y separación de las varillas, va a variar en función del objetivo de la aplicación, pero siempre dentro de las restricciones que dicta la optimización del campo eléctrico en la zona de influencia de la sonda (Knight, 1992). Las primeras mediciones mediante TDR se hicieron con muestreadores coaxiales (Topp et al. 1980). Estos consistían en un cilindro metálico con una varilla en disposición coaxial. En principio, y como señala Dalton (1992), las líneas de transmisión (varillas) pueden construirse mediante cualquier material no magnético y con una conductividad eléctrica mucho mayor que la del medio en el que se van a insertar. Por este motivo ha habido una cierta diversidad en las propuestas realizadas.

Topp y Davis (1985) utilizan pares de varillas de diferentes longitudes (L 40-100 cm; s 5 cm; d 0.16 cm) conectadas directamente a un cable coaxial mediante soldadura y clavadas en el suelo con la ayuda de una guía. Stein y Kane (1983) usaron dos tipos de configuraciones: la primera consistía en dos varillas (L 17.7 cm; s 2.5 cm; d 0.3 cm) conectadas a un cable TV con una unidad de transformación de impedancia para pasar de los 300 ohm de dicho cable a los 50 ohm del cable coaxial, realizando la conexión a las varillas con sendos conectores. La segunda constaba únicamente de un cable coaxial de 50 ohm conectado a dos varillas (L 45.7 cm) paralelas. Dasberg y Dalton (1985) emplearon sondas de dos varillas (L 20-30 cm; s 5 cm; d 0.32 cm) conectadas mediante un cable TV y éste al ecómetro a través de un transformador de impedancias (*balun*). Zegelin et al. (1989, 1992) proponen diseños más sofisticados de tres y cuatro varillas, una de las cuales ocupa el centro de la sonda y las otras se sitúan alrededor, con el objeto de conseguir una morfología similar a la del cable coaxial, es decir, una línea de transmisión rodeada concéntricamente por otra. Con este diseño pretenden evitar el ruido y la pérdida de señal debida a la intermediación del transformador de impedancias. Heimovaara y Bouten (1990) utilizan un diseño similar.

Nadler et al. (1991) emplean dos tipos de sondas: una compuesta de dos varillas (L 20 cm; s 5 cm; d 0.3 cm) insertadas en un disco (3x9 cm \varnothing) de PVC y conectadas a un cable con transformador de impedancias; y la segunda, de tres varillas, de dimensiones similares, "cementadas" en una base (13x5.5x1 cm) de metacrilato, previamente licuado, y conectadas directamente al ecómetro mediante un cable, de acuerdo con Zegelin et al. (1989). Dalton (1992) emplea una solución parecida al primer tipo, con una base de PVC de diferente diseño según sea la aplicación en el campo o en laboratorio. Nadler et al. (1991) destacan el hecho de que los resultados de ambos tipos son idénticos, pero se decantan por la de tres varillas argumentando que la señal es más nítida.

Cassel et al. (1994) realizan la conexión entre la sonda y el ecómetro mediante un transformador de impedancias. Utilizan sondas de dos varillas, de diferentes dimensiones, conectadas a un cable TV de 186 ohm mediante dos conectores hembra de diámetro interior equivalente al exterior de las varillas. La inserción de las varillas en el

suelo es previa a la conexión, con la ayuda de una guía para asegurar su paralelismo.

Como se observa en los trabajos citados, las principales variantes, aparte de las dimensiones de las varillas que dependerán del objetivo de la aplicación, se centran en el tipo de cable, número de varillas, la conexión entre ambos y la presencia o no de un transformador de impedancias.

2.2 Descripción de la sonda

Previamente a la adopción del diseño que aquí se expone, se experimentó con otros dos prototipos que diferían, básicamente, en la base utilizada para albergar la conexión entre las varillas y el cable. En principio se empleó una base de metacrilato cúbica (7x7x3 cm) que dio muy buenos resultados, pero que dada su fragilidad no la hacía idónea para su utilización en suelos difíciles. En el segundo diseño se usó una base de resina *epoxy*, licuada y solidificada en un molde que contenía la conexión entre el cable y las varillas, solución parecida a la de Heimovaara y Bouten (1990) o Nadler *et al.* (1991). La dificultad de la manipulación, la imposibilidad de reparación y la toxicidad de la resina hicieron que se descartara su uso, a pesar de que el resultado fuera satisfactorio. Finalmente se optó por el diseño que se expone a continuación, cuya característica esencial es la incorporación de una caja de *poliamida PA.6*. Según se aprecia en la figura 1 y foto 1, la conexión entre el cable y las varillas se aloja en una caja circular hueca de poliamida (tapa más base) de 40 mm (20 + 20) de alto y 70 mm de diámetro. La caja de poliamida ofrece un espacio interior lo suficientemente amplio como para albergar la conexión del cable con las varillas y facilitar la manipulación de la misma. La base tiene dos orificios de 5 mm de diámetro, separados por una distancia de 50 mm, en donde se introducen las varillas. Éstas son de acero inoxidable con un diámetro de 5 mm y una longitud de 300 mm, con un extremo acabado en punta y el otro roscado. Cada varilla se introduce dentro de la caja hasta un límite de 35 mm, quedando el resto al aire.

Para conectar las varillas con el ecómetro se ha utilizado un cable coaxial de 50 ohm (referencia RG 58). En los extremos de dicho cable van soldados, por un lado, un conector BNC macho aéreo, mientras que en el otro lleva dos terminales redondos sin aislamiento de diámetro interior ligeramente superior al de las varillas. Cada varilla es introducida en uno de los terminales y éstos quedan sujetos por una tuerca, una arandela de presión y una contra-tuerca, garantizándose así la conexión cable-terminal-varilla.

La tapa que cubre la base tiene dos orificios internos de 5 mm de profundidad en los que se aloja el extremo roscado de cada varilla. Con ello se consigue un paralelismo perfecto de ambas mientras son introducidas en el suelo, algo sumamente importante en relación con la bondad de las mediciones.



Foto 1. Aspecto general de la sonda diseñada y detalle de la conexión.

El cable penetra lateralmente en la caja de poliamida (Foto 1) a través de un orificio de diámetro ligeramente inferior al suyo, situado en la intersección entre la tapa y la base. Esto hace que, una vez cerrada la caja, el cable quede fijado a presión, impidiéndose cualquier movimiento que pudiera alterar la conexión y garantizándose, al mismo tiempo, la estanqueidad por ese punto. Al incidir el cable lateralmente en la caja, se facilita la inserción de la sonda en el suelo, ya que es posible presionarla o golpearla por su cara superior.

El acoplamiento entre base y tapa se logra mediante dos tornillos de acero inoxidable y el sellado con silicona de la unión de ambas. De esta forma se consigue una estanqueidad total.

Este diseño ha sido también realizado con diferentes dimensiones para la caja de poliamida y las varillas, dando en todos los casos resultados similares. La elección del tamaño de esos componentes dependerá del tipo de aplicación.

2.3 Ventajas de la sonda diseñada

El modelo de sonda propuesto anteriormente ofrece una serie de ventajas frente a modelos anteriores. La sencillez del diseño facilita enormemente la construcción de la misma. La caja de poliamida garantiza la estanqueidad de la conexión y la posibilidad de desmontar una sonda dañada con el fin de reutilizar el resto del material. La estanqueidad del espacio en donde se ubica la conexión, es fundamental para impedir que la humedad interfiera en las conexiones y garantizar la máxima nitidez de la señal eléctrica.

La conexión directa de las varillas al ecómetro, sin la intermediación de un transformador de impedancias, ofrece una señal sencilla y nítida que agiliza el proceso de medición en el campo. Comparando las señales generadas (Fig. 2) con las producidas por otros diseños de sonda (i.e. Cassel *et al.* 1994), es de destacar la existencia de un solo pico correspondiente a la entrada de la onda electromagnética en el suelo, mientras que otras señales muestran al menos un doble pico, uno correspondiente al cambio de impedancia provocado por el paso de la señal a través del transformador y otro correspondiente a la entrada en el medio poroso.

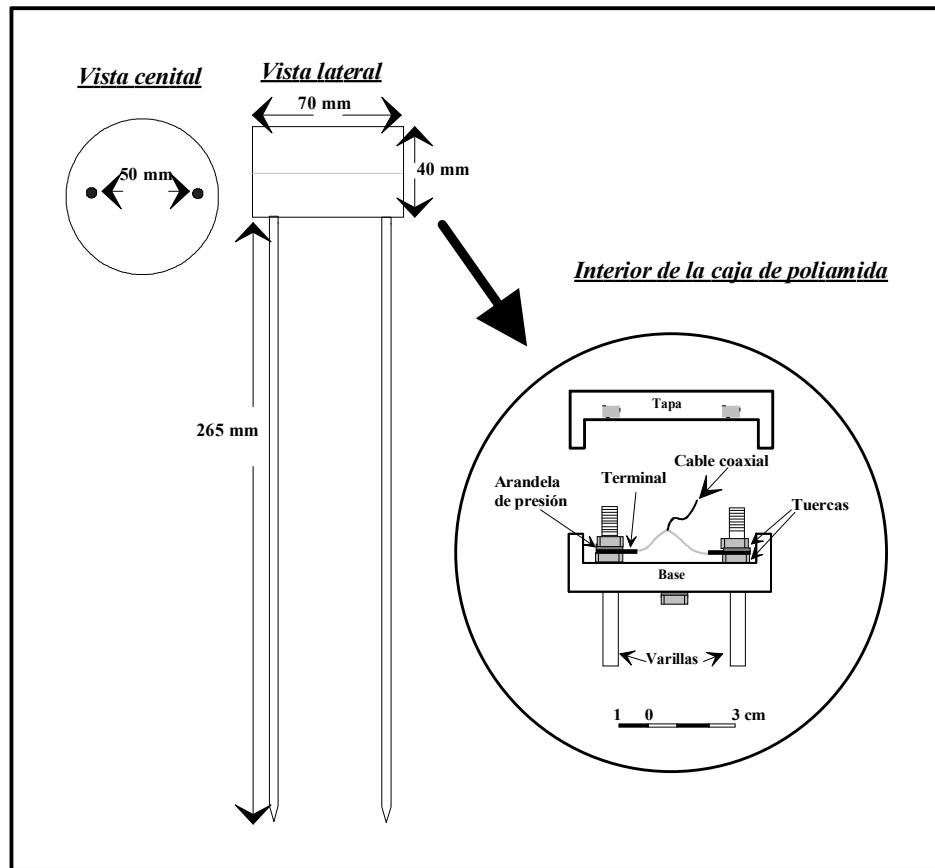


Fig. 1. Esquema general de la sonda diseñada y detalle de la conexión

La robustez de la sonda agiliza el protocolo de instalación para mediciones esporádicas en el campo, permitiendo su utilización en suelos difíciles (costras, arcillas, gravas, etc). Al poder ser golpeada directamente puede prescindirse del uso de una guía, tal y como se ha propuesto en otros casos (Cassel et al. 1994). La fijación de las varillas en la caja de poliamida garantiza el paralelismo de éstas al ser introducidas en el suelo, aspecto fundamental a la hora de valorar la fiabilidad de la medición. La sonda diseñada puede instalarse tanto en la superficie como en los horizontes más profundos del suelo, con el fin de estudiar perfiles de humedad.

Finalmente, el bajo coste económico de cada sonda posibilita la utilización de un gran número de ellas y abarata en su conjunto la aplicación de la técnica TDR, haciéndola de este modo, asequible a un conjunto más amplio de usuarios. Esta característica la hace especialmente adecuada para estudios intensivos de procesos hidrológicos, en campos como la agricultura, la ingeniería civil, etc., bien sea por la necesidad de contar con un gran número de puntos de observación o por cubrir extensas superficies. Otros diseños de TDR disponibles en el mercado tienen el inconveniente de incorporar componentes electrónicos en la propia sonda, encareciendo enormemente su utilización.

3.- Validación

3.1 Descripción

Con el objeto de verificar el buen funcionamiento y la versatilidad de la sonda, se llevó a cabo una validación de la misma en suelos de diferentes características (Tabla 1). Se recogieron en el campo seis monolitos, sin alteración de la estructura, de los primeros 30 cm del perfil en distintos suelos del SE de la provincia de Zamora. Se trata de suelos en los que actualmente se realiza un seguimiento del contenido de humedad mediante una red de estaciones. Para la extracción de los monolitos y el posterior control de la humedad en laboratorio, se utilizaron tubos de PVC de 30 cm de longitud por 11 cm de diámetro, a modo de minilímetros. Una vez recogidas las muestras de suelo, los tubos fueron tapados por su base para impedir la pérdida de masa. En cada uno de los monolitos se instaló desde la parte superior una sonda (L 26.5 cm, s 5 cm, d 0.5 cm) en posición vertical y centrada.

Los monolitos fueron sometidos a cuatro ciclos de saturación y desecado, durante los cuales se llevaron a cabo mediciones diarias de la humedad con un TDR (ecómetro modelo Tektronix® 1502C). La saturación se efectuó por infiltración desde la parte superior del cilindro con agua

destilada. La desecación se produjo de manera no forzada, simplemente dejando al aire la parte superior del cilindro.

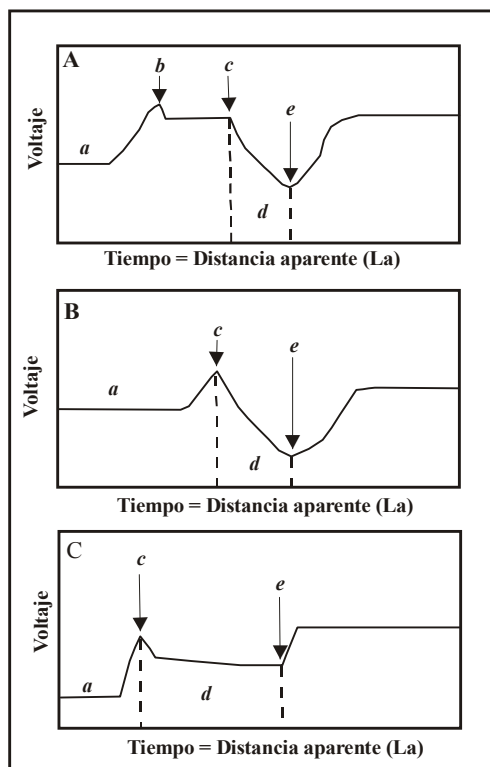


Fig. 2. Señales tipo obtenidas con la sonda diseñada por Cassel et al. (1994) (A) y con el diseño propuesto en suelo húmedo (B) y seco (C). *a*: señal del cable, *b*: paso de la onda a través del “balun”, *c*: entrada de la onda en el suelo (comienzo de las varillas), *d*: tiempo de tránsito y *e*: reflexión de la onda en el suelo.

La reiteración de los ciclos saturación-desechado se realizó con el objeto de contar con varias repeticiones de la validación en cada una de las muestras. De manera simultánea, se efectuó un control gravimétrico mediante la medición del peso de todo el dispositivo (tubo, monolito, sonda y cable) en el mismo momento que se realizaba la medición con el TDR. El cálculo de la humedad estimada mediante TDR se hizo empleando la ecuación (5). Una vez finalizado el experimento se procedió al tarado de los componentes del minilímetro, al secado de los monolitos, al cálculo de la humedad gravimétrica por diferencia de peso y referida al dato de masa seca, y a su transformación volumétrica a partir del cálculo de la densidad aparente.

Cuando finalizó la fase de control de la humedad, se analizaron en cada monolito de suelo la textura, pedregosidad, densidad aparente y contenido de materia orgánica (Tabla 1), características que tienen gran incidencia en la dinámica del agua en los suelos.

3.2 Resultados

La comparación entre la evolución de la humedad de los monolitos medida con TDR y medida gravimétricamente muestra un gran paralelismo (Fig. 3), independientemente del momento en el que se encuentre el ciclo saturación-desechado. Las principales desviaciones se dieron en los suelos con mayor contenido de arcilla y en los momentos finales de la curva de secado. A excepción de esta situación, en donde las variaciones son reducidas, en el resto, los datos presentan una enorme similitud e, incluso, superposición.

Tabla 1. Características de los suelos empleados en la validación

monolito	MO (%)	DA (g.cm ⁻³)	pedregosidad (%)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	textura
E10	0.78	1.53	19.4	59.3	20.4	20.3	areno-arcilloso franco
L7	2.45	1.37	29.2	46.2	19.7	34.1	arcilloso franco
H13	0.59	1.73	28.4	72.8	9.4	17.8	arenoso franco
I6	0.22	1.75	10.7	89.8	6.4	3.8	arena
J3	0.45	1.78	31.9	85.1	11.9	3.0	franco arenoso
K4	0.27	1.78	39.4	89.6	7.6	2.8	arena

MO: materia orgánica; DA: densidad aparente.

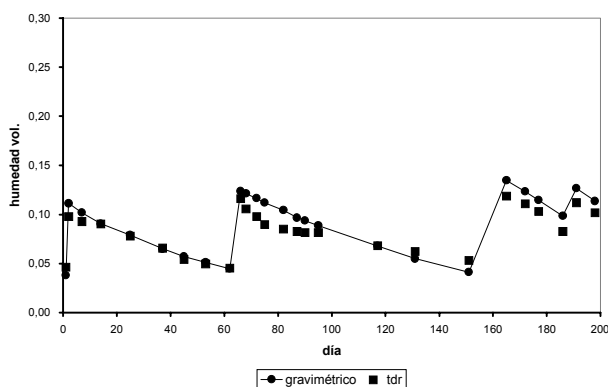


Fig. 3. Evolución de la humedad gravimétrica y con TDR durante la calibración. Monolito K4.

Se realizó un análisis estadístico para comprobar el nivel de correlación entre la humedad medida mediante ambos métodos y el grado de ajuste entre ambas series de datos (Tabla 2). Se utilizó como estimadores de la similitud de los datos el error medio (EM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM). EM sirve para identificar la posible presencia de sesgo, es decir, una sistemática sobreestimación o subestimación de los valores en relación con el método de referencia. RECM ofrece información sobre la dispersión entre valores medidos de uno u otro modo. De manera individualizada (como ejemplo el monolito K4, Fig. 4) se observa que el ajuste es muy bueno para cada tipo de suelo. R^2 está, en general, por encima de 0.9. Únicamente en el monolito I6 el ajuste no ha sido tan satisfactorio ($R^2 = 0.86$), pero aun en este caso la diferencia

media entre la humedad gravimétrica y la humedad medida con la sonda TDR, da valores muy bajos (EM 0.68%). Un hipotético sesgo indicado en el signo positivo o negativo de EM, carece de significación en este caso por lo exiguos valores obtenidos. En algún caso podría apreciarse una cierta subestimación, como se observa en la Fig. 5, con valores elevados de humedad por debajo de la recta de ajuste. Sin embargo, del análisis estadístico no puede inferirse nada en este sentido y, además, los dos monolitos que dan un EM negativo (L7 y J3) presentan caracteres edáficos opuestos, lo que descarta una correlación entre esa desviación y el tipo de suelo. La bondad del ajuste entre ambas series de datos queda reflejado en el hecho de que en ninguno de los monolitos RECM llegue siquiera al 4%.

Tabla 2. Resultados del análisis de regresión entre los valores de humedad medidos gravimétricamente y con TDR.

monolito	N	R ²	EM (%)	RECM (%)
E10	31	0.95	1.63	1.98
L7	31	0.92	-0.96	3.55
H13	27	0.92	3.78	3.84
I6	26	0.86	0.68	1.29
J3	30	0.96	-1.64	1.72
K4	26	0.96	0.75	1.17
global	171	0.90	1.03	2.26

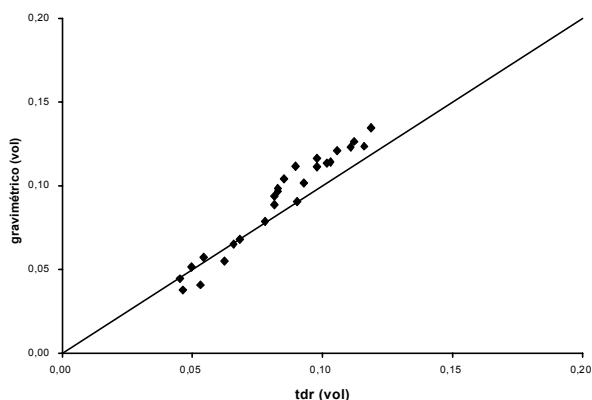


Fig. 4. Comparación entre la humedad del suelo medida gravimétricamente y con TDR en el monolito K4.

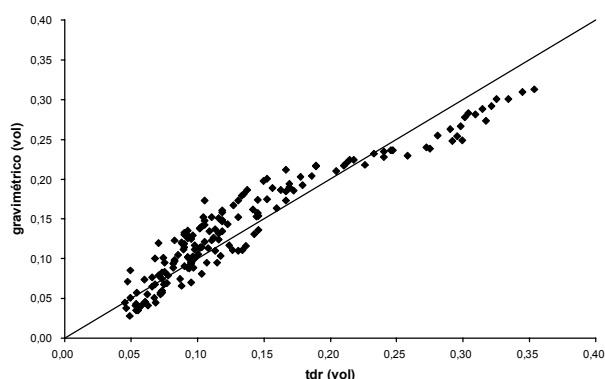


Fig. 5. Comparación entre los valores de humedad gravimétricos y con TDR.

El análisis de los datos de manera conjunta (Figura 5) revela la buena correspondencia entre los dos métodos utilizados. El análisis de regresión muestra un R² de 0.9, un error medio muy bajo (1.03%) y RECM es solo el 2.26%.

Trabajos previos de validación de diferentes tipos de sondas (Stein y Kane, 1983; Dasberg y Dalton, 1985; Topp y Davis, 1985; Zegelin et al. 1989; Nadler et al. 1991; Fitzjohn et al. 1998) obtienen valores de correlación similares a los que se han expuesto en este artículo.

4.- Conclusión

La medición del contenido de humedad del suelo es objeto de un creciente interés por sus implicaciones en múltiples procesos naturales. Esto ha propiciado el desarrollo de metodologías, como es el caso del TDR, con el objetivo de conseguir una mejor precisión, fiabilidad y reproducibilidad en las mediciones. La sonda descrita en este trabajo pretende ser una aportación en este sentido. Se trata de un diseño muy versátil, que ofrece ciertas ventajas en relación con otras propuestas: sencillez de montaje, robustez, estanqueidad de la conexión, nitidez de la señal, dimensionamiento según el tipo de aplicación y bajo coste económico. La validación llevada a cabo ha puesto de manifiesto la bondad y fiabilidad de las mediciones. En todos los casos analizados los resultados han sido enormemente satisfactorios.

Las características y fiabilidad de esta sonda TDR la hacen adecuada para cualquier uso, especialmente para estudios o controles intensivos de humedad edáfica en campos como la agricultura o la ingeniería civil.

Agradecimientos. Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto AMB98-0626) y a la Junta de Castilla y León (Proyecto SA55/00A) por la financiación que ha hecho posible este trabajo, y a Pilar Alonso y Carlos Yuste por su ayuda en los análisis de laboratorio.

Referencias

- Bergkamp, G. (1996): *Mediterranean ecosystems. Hierarchical organisation and degradation*. Cip-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag. 238 pp.
- Cassel, D.K., Kachanoski, R.G. y Topp, G.C. (1994): Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*. 7. pp. 113-126.
- Dalton, F.N. (1992): Development of Time-Domain-Reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. In *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. *Soil Sci. Soc. Am. Special Pub. No. 30*. pp. 143-167.
- Dasberg, S. y Dalton, F.N. (1985): Time Domain Reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49. pp. 293-297.
- Fitzjohn, C., Ternan, J.L. y Willians, A.G. (1998): Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena*. 32. pp. 55-70.
- Gómez Plaza, A. (2000): *Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica*. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Madrid. 185 pp.
- Heimovaara, T.J. y Bouten, W. (1990): A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. *Water Resources Research*. 26. pp. 2311-2316.
- Knight, J.H. (1992): Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resources Research*. 28. pp. 2345-2352.
- Kutilek, M. y Nielsen, D.R. (1994): *Soil Hydrology*. Ed. Catena Verlag. 370 pp.

- Martínez Fernández, J. y López Bermúdez, F. (1996): Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de suelos y formaciones superficiales. *Cuadernos Técnicos de la S.E.G. n° 9*. Geoforma Ediciones. 30 pp.
- Nadler, A., Dasberg, S. y Lapid, I. (1991): Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55. pp. 938-943.
- Prichett, W.L. (1986): *Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento*. Editorial Limusa, Méjico. 518 pp.
- Stein, J. y Kane, D.L. (1983): Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time domain reflectometry. *Water Resources Research.* 19. pp. 1573-1584.
- Topp, G.C. y Davis, J.L. (1985): Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49. pp. 19-24.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research.* 16. pp. 574-582.
- Ward, R.C. y Robinson, M. (2000): *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill Pub. Maidenhead. 450 pp.
- Zegelin, S.J., White, I. y Jenkins, D.R. (1989): Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using Time Domain Reflectometry. *Water Resources Research.* 25. pp. 2367-2376.
- Zegelin, S.J.; White, I. y Russel, G.F. (1992): A critique of the Time Domain Reflectometry technique for determining field soil-water content. In *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Sci. Soc. Am. Special Pub. No. 30.* pp. 187-208.