

NUEVO ANÁLISIS DE LA ONDA EN MICROSONDAS TDR PARA LA MEDIDA DE LA HUMEDAD DEL SUELO

David Moret-Fernández¹ y Francisco Lera²

1: Departamento de Suelo y Agua
Estación Experimental de Aula Dei
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
PO Box 202, 50080, Zaragoza, España
e-mail: david@eead.csic.es, <http://www.eead.csic.es>

2: Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) - Universidad de Zaragoza
C/ María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España
e-mail: lera@unizar.es

Palabras clave: TDR; Humedad volumétrica; Conductividad eléctrica; Modelado

RESUMEN. *Este trabajo presenta un modelo numérico de análisis de onda TDR que, aplicado a microsondas TDR, permite estimar por análisis inverso de la onda la humedad volumétrica (θ) y conductividad eléctrica aparente (σ_a) del suelo. El modelo fue testado en dos sondas TDR de diferente geometría (diámetro varilla: 1 mm; separación varillas externas: 10 mm; longitud sondas: 15 y 30 mm, respectivamente) en agua con diferentes grado de salinidad (entre 0 y 15 dS m⁻¹) y en arena humectada con agua destilada y una solución salada de 5 dS m⁻¹. La excelente correlación ente los valores de θ y σ_a obtenidos por análisis inverso de la onda TDR y los medidos por gravimetría y utilizando el método TDR estándar de medida de σ_a ($r^2 = 0.98$, ECM < 0.052) indica que el método propuesto aplicado a microsondas TDR es suficientemente consistente para efectuar medidas de humedad y conductividad eléctrica del suelo.*

ABSTRACT. *This work presents a numerical model, which applied to micro-TDR probes, allows estimating by inverse analysis of the TDR waveform the volumetric water content (θ) and the bulk electrical conductivity (σ_a) of the soil. The model was tested on two micro-TDR probes of different geometry (rod diameter: 1 mm; separation between external rods: 10 mm; total length: 15 and 30 mm, respectively, in water with different saline solutions (from 0 to 15 dS m⁻¹) and in sand wetted with distilled water and a water solution of 5 dS m⁻¹. The excellent correlation between the θ and σ_a obtained by inverse analysis of the TDR waveforms and the corresponding θ values calculated from the soil weight and the σ_a estimated using the standard TDR procedure ($r^2 = 0.9$, RMSE < 0.052) indicates that this method applied to micro-TDR probes is consistent enough to estimate the water content and the electrical conductivity of the soil.*

1. INTRODUCCIÓN

La técnica TDR (Time Domain Reflectometry) es un método ampliamente utilizado para la medida in situ e instantánea de la permitividad aparente (ϵ_a) y la conductividad eléctrica aparente (σ_a) del suelo (Topp y Ferré, 2002). El instrumento TDR emite un pulso electromagnético a lo largo de una línea de transmisión o sonda y recoge una de onda (onda TDR) en la que el voltaje (V) o coeficiente de reflexión (ρ) se expresa en función del

tiempo (t). El tiempo de transmisión de la onda electromagnética depende de la longitud de línea de transmisión (L) y de la permitividad aparente del medio, que a su vez es función de la humedad volumétrica de agua del suelo (θ) (Topp et al., 1980).

En general, las sondas TDR consisten en una varilla central y dos varillas exteriores conductoras y paralelas entre sí que se conectan respectivamente al conductor central y a la carcasa exterior de un cable coaxial que conecta la sonda con el instrumento TDR. La humedad del suelo se estima a partir de un análisis gráfico de la onda TDR, en el cual, θ es proporcional al tiempo que tarda la onda en recorrer dos veces la línea de transmisión (Topp y Ferré, 2002). La longitud mínima de sonda necesaria para efectuar medidas precisas de humedad del suelo oscila entre 5 y 10 cm (Zegelin et al., 1992). Longitudes inferiores de sonda impiden determinaciones precisas del tiempo de transmisión lo que se traduce en importantes errores en el análisis gráfico de la onda TDR para la medida de θ . Esta limitación ha sido, sin embargo, parcialmente resuelta con nuevos diseños de sondas en las que las varillas (enrolladas entre sí o en zig-zag) se disponen de forma diferente al tipo de sonda convencional (Bittelli et al., 2004; Moret-Fernández et al., 2008). Estas nuevas geometrías incrementan la longitud efectiva de la línea de transmisión y por lo tanto el tiempo de transmisión de la onda electromagnética a lo largo de la misma.

La estimación de σ_a medida por TDR se realiza, por lo general, utilizando el método de Giese y Tiemann (1975), procedimiento que posteriormente ha sido perfeccionado por Castiglione y Shouse (2003). Este método establece que σ_a es proporcional a la atenuación, a tiempo casi-infinito, del coeficiente de reflexión registrado por una sonda TDR no aislada. Este procedimiento ha sido posteriormente utilizado por Moret-Fernández et al. (2009) para medidas de σ_a con sondas TDR convencionales de 100 mm de longitud parcialmente aisladas con un material de alta permitividad dieléctrica, en las que la sección conductora no aislada oscilaba entre 5 y 50 mm de longitud.

La simulación de ondas TDR utilizando modelos matemáticos es una herramienta en expansión que permite extraer información adicional hasta la fecha no disponible con los métodos convencionales de análisis de onda. Por ejemplo, Oswald et al. (2003) y Greco (2006) desarrollaron dos métodos diferentes de análisis de onda TDR para obtener medidas de perfiles de humedad y conductividad eléctrica utilizando una sola sonda TDR verticalmente insertada en el suelo.

Este trabajo presenta un método numérico de síntesis e inversión de señales TDR que aplicado a microsondas TDR de 15 y 30 mm de longitud, permite determinar, por un proceso de inversión de onda TDR, la humedad volumétrica y la conductividad eléctrica aparente del medio. El modelo fue calibrado en agua con diferentes soluciones salinas (desde 0 a 15 dS m⁻¹) y validado sobre una muestra de arena humectada con agua destilada y una solución salina de NaCl de 5 dS m⁻¹.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Teoría

En el análisis clásico de la señal TDR, válido para sondas suficientemente largas y con medios débilmente conductores, el tiempo de propagación (t_L) de una onda electromagnética a lo largo de una línea de transmisión de longitud L se expresa como

$$t_L = \frac{2L\sqrt{\epsilon_a}}{c} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m s⁻¹) y ϵ_a es la permitividad relativa del medio que rodea a la línea de transmisión. El contenido de humedad volumétrica del suelo (θ) se calcula a partir de ϵ_a del suelo utilizando la ecuación (Topp et al., 1980)

$$\theta = -53(10)^{-2} + 292(10)^{-2} \epsilon_a - 5.5(10)^{-4} \epsilon_a^2 + 4.3(10)^{-6} \epsilon_a^3 \quad (2)$$

El coeficiente de reflexión, ρ , en función del tiempo, t , se define como

$$\rho(t) = \frac{V(t) - V_0}{V_0} \quad -1 \leq \rho \leq +1 \quad (3)$$

donde $V(t)$ es el voltaje a tiempo t , y V_0 es el voltaje del cable de transmisión que se conecta a la sonda TDR (impedancia estándar de 50Ω).

La estimación por TDR de la conductividad eléctrica del medio que rodea a una línea de transmisión, σ_a (dS m^{-1}) se realiza con el método de Castiglione y Shouse (2003) ($\sigma_{a\text{-CS}}$), en el que la conductividad eléctrica del medio que rodea a una sonda TDR no aislada es proporcional a la atenuación del coeficiente de reflexión a tiempo casi-infinito, y se calcula según

$$\sigma_{a\text{-CS}} = \frac{K_p}{Z_r} \left(\frac{\rho_{\text{aire}} - \rho_f}{\rho_f - \rho_{\text{cc}}} \right) \quad (4)$$

donde ρ_f , ρ_{aire} y ρ_{cc} son el coeficiente de reflexión a tiempo casi-infinito del medio, en aire y en cortocircuito, respectivamente. El parámetro Z_r es la impedancia externa del ecómetro TDR (habitualmente 50Ω) y K_p (m^{-1}) es la constante de celda que depende de la geometría de la sonda. El valor de K_p puede obtenerse por procedimientos teóricos o experimentalmente al sumergir la sonda TDR diferentes soluciones electrolíticas de conductividad eléctrica conocida (Wraith, 2002).

2.2. Modelo numérico

La señal TDR $\rho(t)$ es la respuesta temporal en régimen transitorio del conjunto cable-sonda-suelo al impulso producido por el ecómetro, $I(t)$. Para poder analizarla, debemos disponer de un método de cálculo de la señal esperada a partir de las características del ecómetro, del cable, de la sonda y del suelo en el que ésta se inserta (θ y σ_a). Este método se explica en los párrafos siguientes, y se ha implementado en Matlab. La estimación de θ y σ_a a partir de $\rho(t)$ se realiza mediante un proceso de inversión por optimización –mediante el paquete *optimization toolbox* de Matlab – en el que se buscan los valores que minimizan el error cuadrático medio entre las señales TDR calculadas y medidas, en el dominio del tiempo.

La sonda TDR y el cable se modelan como líneas de transmisión. Aun cuando $\rho(t)$ es una respuesta transitoria temporal, el comportamiento de las líneas se modela más fácilmente en el dominio de la frecuencia, mediante análisis de Fourier. Esta herramienta ya ha sido utilizada en el análisis de señales TDR (Heimovaara, 1994; Heimovaara, 2004; Jones y Or, 2004; Huebner y Kupfer, 2007). El método que proponemos consiste en calcular la función de transferencia $H(\omega)$ en el dominio de la frecuencia del conjunto cable-sonda-suelo. Las señales TDR medidas no son continuas, sino discretas, y las transformadas de Fourier deben sustituirse por las correspondientes versiones discretas, implementadas en Matlab. La señal de excitación en el dominio de la frecuencia $I(\omega)$ se obtiene mediante la transformada de Fourier (FT) del impulso producido por el ecómetro:

$$I(\omega) = \text{FT}[I(t)] \quad (5)$$

La respuesta en el dominio de la frecuencia es entonces:

$$\rho(\omega) = I(\omega) H(\omega) \quad (6)$$

Finalmente, obtenemos $\rho(t)$, mediante la Transformada de Fourier Inversa, IFT:

$$\rho(t) = \text{IFT}[\rho(\omega)] \quad (7)$$

Una introducción a la teoría de líneas de transmisión puede encontrarse en numerosos textos de electromagnetismo. Una referencia clásica es Ramo et al. (1984). En el dominio de la frecuencia, las líneas se caracterizan con cuatro parámetros distribuidos: capacidad C (F m^{-1}), autoinducción L (H m^{-1}), conductancia G (S m^{-1}) y resistencia, R ($\Omega \text{ m}^{-1}$). A partir de éstos se calculan la impedancia característica, Z_0 (Ω) y la constante de propagación γ (m^{-1})

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (8)$$

donde α es la constante de atenuación (Np m^{-1}) y β la de fase (rad m^{-1}). En líneas ideales, $R=0$ y $G=0$:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} = j\frac{\omega}{v} \quad (9)$$

donde v es la velocidad de propagación. Cuando una línea de transmisión de longitud L se conecta a una impedancia de carga Z_L , la impedancia de entrada Z_i en su extremo libre obedece a la siguiente expresión:

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma L}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma L} \quad (10)$$

La señal de excitación utilizada en este trabajo, $I(t)$, ha sido extraída de la medida de la señal TDR producida por el ecómetro con la salida cortocircuitada y en circuito abierto. $I(\omega)$ se obtiene numéricamente mediante (5).

Para conectar el ecógrafo con las sondas se ha usado cable coaxial tipo RG58, de impedancia característica 50Ω y velocidad $0.66 c$. Con estos datos, usando (9) estimamos $L_c = 250 \text{ nH m}^{-1}$ y $C_c = 100 \text{ pF m}^{-1}$. En los cables reales existe atenuación, representada por R_c , y dispersión, apareciendo una inductancia distribuida adicional, L_{c2} . Ambos efectos, dependientes de la frecuencia han sido incorporados siguiendo las recomendaciones de Nahman (1972) con valores ajustados a partir de medidas con el cable terminado en cortocircuito, circuito abierto y 50Ω .

$$R_c = 40 + 0.177 \sqrt{\omega} \text{ m}\Omega / \text{m} \quad L_{c2} = \frac{177}{\sqrt{\omega}} \mu\text{H} / \text{m} \quad (11)$$

Las características de las sondas trifilares (tres varillas idénticas de radio b , separación entre varillas externas $2s$ y longitud L_s) como líneas de transmisión en vacío se han obtenido a partir de los cálculos de Ball (2002), para el caso $n=2$, donde n es el número de varillas externas de la sonda TDR trifilar. La impedancia característica aproximada de la sonda en vacío, Z_{s0} , con $d = b s^{-1}$, resulta:

$$Z_{s0} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{1}{2d^3}\right) \quad (12)$$

A partir de (12) y (9) es inmediato obtener los valores de capacidad (C_{s0}) e inductancia (L_{s0}) de las sondas en vacío

$$C_{s0} = \frac{\epsilon_0}{\ln\left(\frac{1}{2d^3}\right)} \quad L_{s0} = \mu_0 \ln\left(\frac{1}{2d^3}\right) \quad (13)$$

Si la sonda se inserta en un medio de conductividad σ_a , la conductancia por unidad de longitud se obtiene sustituyendo ϵ_0 por σ_a en la fórmula de C_{s0} . El efecto de un medio dieléctrico con pérdidas, con permitividad compleja $\epsilon_c = \epsilon' - j \epsilon''$, se incorpora sustituyendo en C_{s0} , ϵ_0 por ϵ_c . La permitividad del agua $\epsilon_w(\omega)$ la calculamos con las fórmulas de Meissner y Wentz (2004) para $T=22^\circ\text{C}$. En suelos con un contenido de humedad, θ , estimamos ϵ_a mediante la fórmula inversa de (2) y entonces:

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_{a0}} \epsilon_w \quad (14)$$

donde $\epsilon_{a0} = \epsilon_a (\theta=0)$. El efecto de la conductividad finita de las varillas de la sonda se incorpora siguiendo a Norris (1972) de forma análoga a como se ha hecho para el cable coaxial.

La función de transferencia $H(\omega)$ representa el divisor de tensión formado por la impedancia de salida del ecógrafo (50Ω) y la impedancia de entrada a la que da lugar la sonda conectada con el cable coaxial.

$$H(\omega) = \frac{Z_i(\omega)}{50 + Z_i(\omega)} \quad (15)$$

El parámetro Z_i se calcula en dos pasos. En primer lugar, obtenemos la impedancia que supone la sonda insertada en el suelo, aplicando (10) a una línea de transmisión con los parámetros de la sonda trifilar, terminada en circuito abierto. En sondas cortas es preciso tener en cuenta el efecto de borde que se produce en el extremo abierto. La longitud aparente de la línea es mayor que la longitud real. Hemos incorporado este efecto en líneas trifilares duplicando las estimaciones de Green (1986) para líneas bifilares. En un segundo paso, obtenemos Z_i aplicando (10) con los parámetros del cable coaxial, siendo la impedancia de carga la obtenida en el paso anterior.

Finalmente, aplicando (6) y (7) se obtiene $\rho(t)$, que puede compararse directamente con las señales medidas y utilizarse para estimar θ y σ_a mediante optimización numérica.

2.3. Diseño experimental

El ecómetro utilizado para el registro de ondas TDR fue un instrumento Tektronix 1502C el cual se conectó a las sondas TDR a través de un cable coaxial de 50 Ω de 1 m de longitud. Los pulsos electromagnéticos se transfirieron a un ordenador para su almacenamiento y análisis utilizando el programa WinTDR'98 (Or et al., 1998). Se contrastaron 2 tipos diferentes de microsondas TDR de tres electrodos y siguientes características: varillas de 1 mm de diámetro, 10 mm de separación entre varillas externas y una longitud de 15 mm (S1) y 30 mm (S2), respectivamente (Fig. 1a). Las varillas externas e interna de las sondas TDR se soldaron respectivamente al electrodo central y a la carcasa externa de un conector BNC hembra, diseño que facilitaba la conexión al conector BNC macho fijado en el cable coaxial (Fig. 1a).

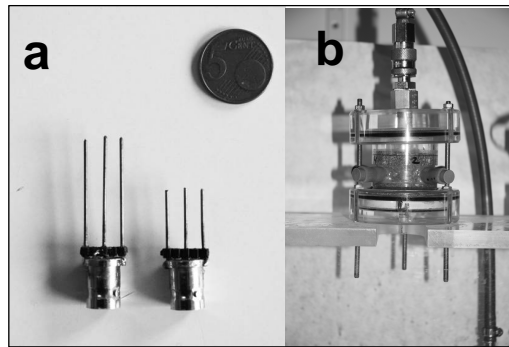


Figura 1. (a) Sondas TDR y (b) y minicámara de presión utilizada para calibrar el modelo numérico para la medida de la humedad del suelo utilizando microsondas TDR

Se realizó un primer experimento de laboratorio para calibrar el modelo numérico para la estimación de θ y σ_a a partir del análisis inverso de las ondas TDR. Para tal fin, las dos microsondas TDR fueron sumergidas en agua con diferentes soluciones salinas de NaCl (0, 1, 2, 5, 10 and 15 dS m^{-1}). Los valores de permitividad aparente y conductividad eléctrica, medida ésta última con un conductímetro (Crison Instruments, model conductimeter 522), fueron contrastados con los estimados a partir del análisis inverso de las ondas TDR. Este proceso de calibración exigió también el registro de ondas TDR con el cable coaxial en circuito abierto, corto circuito, y conectado a una resistencia calibrada de 50 Ω de impedancia.

La validación del modelo se efectuó en un segundo experimento de laboratorio sobre una muestra de arena humectada con agua destilada y una solución salina de 5 dS m^{-1} . Las dos microsondas fueron equidistantemente insertadas a una altura de 25 mm en un tubo de metacrilato de 60 mm de altura y 50 mm de diámetro interno, cerrado por la base con una malla de nylon de 20- μm de luz. Dicho tubo se corresponde con el cuerpo central de una minicámara de presión similar a la descrita por Moret-Fernández et al. (2008) (Fig. 1b). El tubo de metacrilato se llenó con arena seca (250-500 μm de tamaño de partícula) y se colocó sobre un disco cerámico (0.5 bar) de 7 mm de espesor y 50 mm de diámetro (Soil Moisture Inc. UK). El conjunto arena-disco cerámico se humectó por capilaridad con agua destilada hasta saturación. Una vez la arena saturada, se cerró la cámara de presión y se procedió a la extracción de agua a través del disco cerámico inyectando aire a presión por la parte superior de la cámara (Fig. 1b). Se realizaron un total de cuatro ciclos de drenaje a -1, -2, -3 and -5 kPa, de 24 h de duración cada uno. Al final de cada ciclo se realizaron registros de ondas TDR y del peso de la cámara de presión. Los valores del contenido de humedad volumétrica (θ_w) de la arena para cada uno de los ciclos de drenaje calculados a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo fueron contrastados con

los valores de humedad volumétrica calculados numéricamente (θ_{Mod}) a partir del análisis inverso de la ondas TDR.

Este experimento fue nuevamente repetido pero humectando la arena con una solución salina de NaCl de 5 dS m^{-1} . Los valores de conductividad eléctrica calculados numéricamente a partir del análisis inverso de la onda TDR (σ_{a-Mod}) fueron contrastados con los valores de σ_a calculados utilizando el modelo de Castiglione y Shouse (2003) (σ_{a-CS}) (Ec. 4). En este caso, los valores de K_p utilizados para calcular σ_{a-CS} fueron determinados previamente en laboratorio tras sumergir las sondas TDR en 6 soluciones salinas de NaCl (0, 1, 2, 5, 10 and 15 dS m^{-1}) medidas con un conductímetro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2, que compara las ondas TDR registradas por el ecómetro con el mejor ajuste de ondas simuladas utilizando el modelo numérico para una permitividad aparente de agua $\epsilon_a = 81$ y geometría de sondas descritas en el apartado 2.3, muestra que el modelo describe con gran precisión el comportamiento de las ondas TDR (Error cuadrático medio (ECM) = 0.0119). La excelente correlación (Tabla 1) entre la conductividad eléctrica nominal medida con la celda de conductividad sumergida agua con diferentes soluciones salinas y los correspondientes valores estimados a partir del análisis inverso de la onda TDR para S1 y S2 indica que el modelo numérico es también suficientemente consistente para la medida de conductividad eléctrica en agua.

El modelo muestra también un excelente comportamiento aplicado a las Sondas 1 y 2 insertadas en arena con diferente contenido de humedad y conductividad eléctrica (Fig. 3). En general, el buen ajuste observado entre las ondas registradas con el ecómetro y las obtenidas utilizando el modelo numérico (ECM = 0.0146) indica que dicho modelo reproduce con gran precisión la evolución temporal de las ondas electromagnéticas propagándose a través de las sondas S1 y S2 insertadas en arena. Tanto el modelo como los datos experimentales muestran como la pendiente de la onda TDR tras la segunda reflexión disminuye al incrementar θ y σ_a , factor determinante para estimar la humedad media que rodea a la sonda TDR. La excelente correlación (Fig. 4) entre los valores medidos y estimados de θ_w y σ_{a-CS} (Ec. 4) y los correspondientes valores de θ_{Mod} y σ_{a-Mod} obtenidos por el análisis inverso de las ondas TDR para las Sondas 1 y 2 indica que el modelo aplicado a microsondas TDR es suficientemente robusto para la medida de θ y σ_a en diferentes condiciones de humedad y salinidad de suelo (Fig. 4a y Fig. 4b). La relativa dispersión observada entre los valores medidos y simulados de θ y σ_a (Fig. 4) puede atribuirse a una desigual distribución de poros en la muestra de arena, circunstancia que hace que pequeños cambios de densidad aparente entorno a las sondas TDR tenga un importante efecto en la estimación de θ en comparación con la humedad media medida en el cilindro de arena.

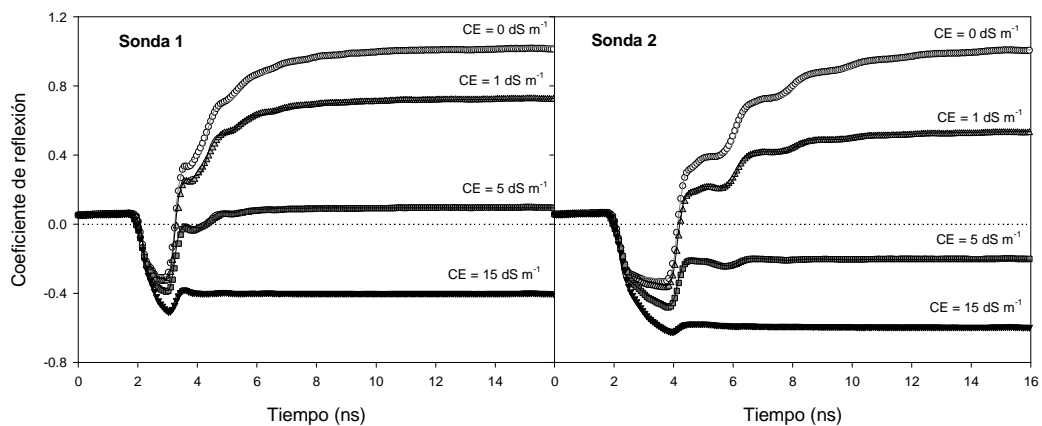


Figura 2. Ondas TDR medidas (símbolos) y mejor ajuste de ondas simuladas (líneas continuas) utilizando el modelo de numérico para la Sonda 1 y Sonda 2 inmersas en agua destilada y una solución salina de NaCl de conductividades eléctricas igual 1, 5 y 15 dS m^{-1} .

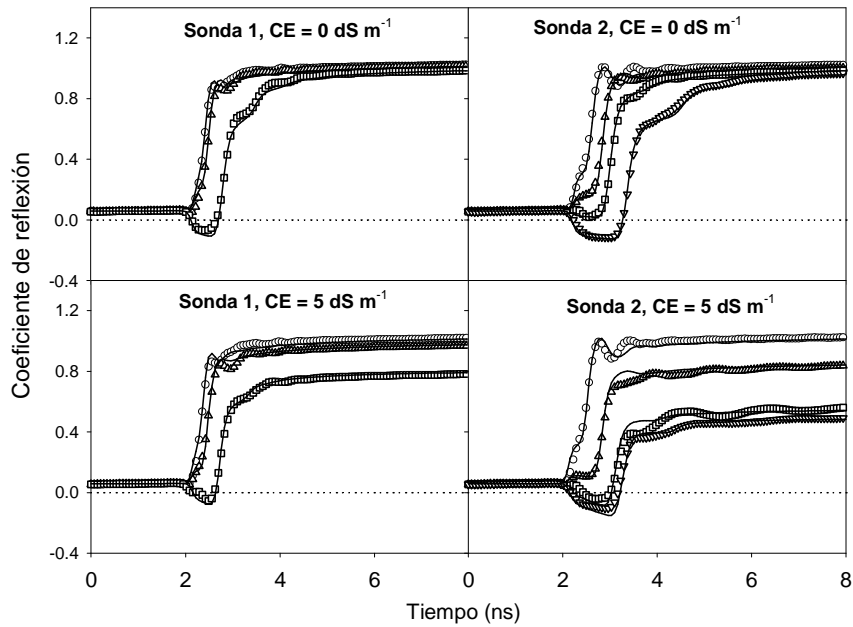


Figura 3. Ondas registradas por el ecómetro TDR (símbolos) y mejor ajuste de ondas simuladas utilizando el modelo de numérico (líneas continuas) para la Sonda 1 y Sonda 2 insertadas en arena con diferentes grados de humedad (desde 0.02 a 0.45 m³ m⁻³) tras ser humectada con agua destilada y una solución salina de NaCl (CE) de 5 dS m⁻¹.

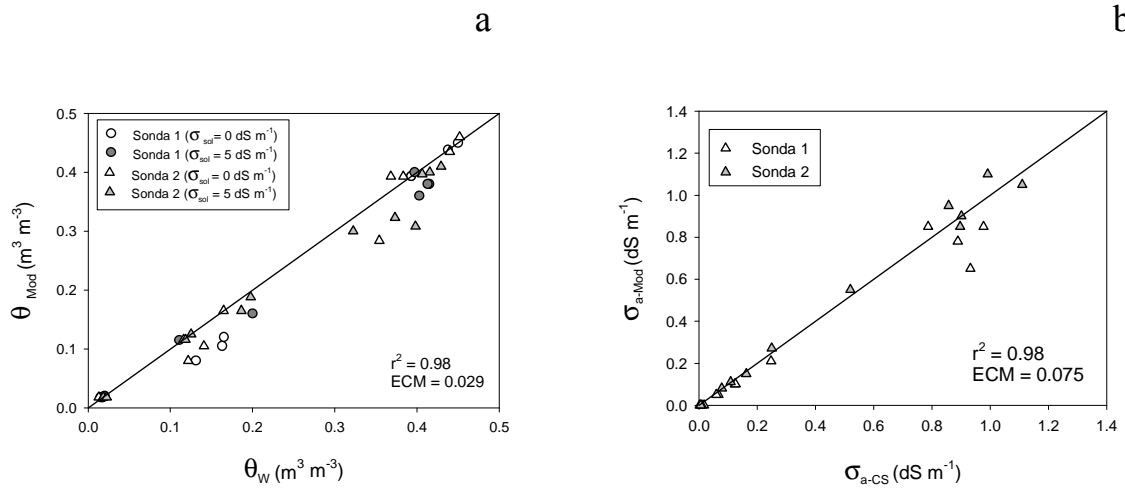


Figura 4. Correlaciones para la Sonda 1 y Sonda 2 insertadas en arena humectada con agua destilada y una solución salina de NaCl de 5 dS m⁻¹ entre (a) la humedad volumétrica medida utilizando el método gravimétrico (θ_w) y la calculada a partir del análisis inverso de la onda TDR (θ_{Mod}); y (b) la conductividad eléctrica aparente estimada utilizando el método de Castiglione et al. (2003) (Ec. 4) (σ_{a-CS}) y la obtenida a partir del análisis inverso de la onda TDR (σ_{a-Mod}).

Tabla 1. Coeficiente de determinación, r^2 , pendiente y punto de corte de la regresión y error cuadrático medio (ECM) para la relación entre la conductividad eléctrica medidas con una celda de conductividad sumergida en agua con diferentes soluciones salinas y las estimadas aplicando el modelo numérico a las correspondientes ondas TDR de las Sondas 1 y 2.

	Regresión	r^2	ECM
Sonda 1	$y = 0.978x - 0.073$	0.999	0.243
Sonda 2	$y = 0.999x - 0.059$	0.999	0.098

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un modelo que aplicado a microsondas TDR permite estimar, por inversión de la onda TDR, la humedad volumétrica y la conductividad eléctrica del suelo. La excelente correlación entre los valores de humedad y conductividad eléctrica calculados utilizando métodos estándar y los estimados por el modelo aplicado a dos microsondas TDR de diferentes geometrías sumergidas en agua y arena con diferente grado de salinidad, confirman la consistencia de dicho modelo. Sin embargo, son necesarios nuevos estudios con el fin de corroborar su aplicación en un espectro más amplio de geometrías de sondas y tipos de suelo.

Agradecimientos. El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyectos: AGL2007-66320-CO2-02/AGR; 2008401214).

REFERENCIAS

- Ball, J.A.R. 2002. Characteristic impedance of unbalanced TDR probes. *IEEE Trans. Instr. Meas.* 51, 532-536.
- Bittelli M., Flury, M., Campbell, G.S., Schulz, V. 2004. Characterization of a spiral-shaped time domain reflectometry probe. *Water Resour. Res.* 40, W09205, doi: 10.1029/2004WR003027.
- Castiglione, P., and P.J. Shouse. 2003. The effect of ohmic, cable losses on time-domain reflectometry measurements of electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 414-424.
- Giese, K., and R. Tiemann. 1975. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. *Adv. Mol. Relax. Processes* 7, 45-49.
- Greco, R. 2006. Soil water content inverse profiling from single TDR waveforms. *J. Hydrol.* 317, 325-339.
- Green, H. E. and Cashman, J.D. 1986. End effect in open-circuited two wire transmission lines. *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques* 34, 180-186.
- Heimovaara, T. J. 1994. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils, *Water Resour. Res.*, 30, 189-199.
- Heimovaara T.J., Huisman, J.A., Vrugt J.A, and Bouten, W. 2004. Obtaining the spatial distribution of water content along a TDR probe, Using the SCEM-UA bayesian inverse modelling scheme. *Vadose Zone J.* 3, 1128-1145.
- Huebner C. and Kupfer, K. 2007. Modelling of electromagnetic wave propagation along transmission lines in inhomogeneous media. *Meas. Sci. Technol.* 18, 1147-1154.
- Jones S.B. and Or, D., 2004. Frequency domain analysis for extending time domain reflectometry water content measurement in highly saline soils. *Vadose Zone J.* 3, 1128-1145.
- Meissner T. and Wentz F.J. 2004. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 42, 1836-1849.
- Moret-Fernández, D., J.L. Arrúe, V., Pérez, M.V., López. 2008. A TDR-pressure cell design for measuring the soil-water retention curve. *Soil Till. Res.* 100, 114-119.
- Moret-Fernández, D., F. Lera, J.L. Arrúe, M.V. López. 2009. Measurement of soil bulk electrical conductivity in saline soils and solutions using TDR probes partially coated with high-dielectric material. *Vadose Zone J.* (in press).
- Nahman, N.S. and Holt, D.R., 1972. Transient analysis of coaxial cables using the skin effect approximation $A + B\sqrt{s}$. *IEEE Trans. Circuit Theory* 19, 443-451.
- Or, D., S.B. Jones, J.R. VanShaar, S. Humphries, and L. Koberstein. 2004. WinTDR, Soil Analysis Software, -Users Guide- WinTDR Version 6.1. Dep. of Plants, Soil & Biometeorology, Utah State University, Logan, UT.
- Oswald, B, H.R., Benedickter, W., Bachtold, H., Fluhler H. 2003. Spatially resolved water content profiles from inverted time domain reflectometry signals. *Water Resour. Res.* 12, DOI: 10.1029/2002WR001890.
- Ramo, S., J.R. Whinnery, and T. Van Duzer. 1984. Fields and waves in communication electronics. John Wiley and Sons, New York.
- Topp, G.C., and T.P.A. Ferre, 2002. Water content, In, Methods of Soil Analysis. Part 4. (Ed. J.H. Dane and G.C. Topp), SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison WI.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574-582.
- Wraith, J.M. 2002. Time Domain Reflectometry. p. 1289-1297. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) Methods of Soil Analysis: Part IV Physical Methods. SSSAJ Madison, WI.
- Zegelin, S.J., I., White, G.F., Russell. 1992. A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. p. 187-208. In G.C. Topp et al. (ed.) Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI.