

## NUEVA SONDA TDR PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO

D. Moret-Fernández<sup>1\*</sup>, R. Aragüés<sup>2</sup>, C. Peña<sup>1</sup> y M.V. López<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Unidad de Suelos y Riegos, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA)–Diputación General de Aragón (DGA), Avenida Montañana 930, 50059 Zaragoza, España.

**RESUMEN.** Esta comunicación presenta una sonda TDR (WEC<sub>P</sub>) para la medida de la conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $\sigma_w$ ), que consiste en una sonda TDR trifilar (10 cm longitud) insertadas en 14 discos cerámicos. La  $\sigma_w$  se estima a partir de la humedad y la conductividad eléctrica del conjunto de discos cerámicos. La WEC<sub>P</sub> fue calibrada y testada en laboratorio con suelo franco y en condiciones de campo con diferentes soluciones de KCl. La  $\sigma_w$  estimada con WEC<sub>P</sub> en laboratorio fue comparada con las obtenidas a partir de la solución de drenaje. El experimento de campo comparó  $\sigma_w$  estimados con WEC<sub>P</sub> con los medidos con lisímetros de tensión. En ambos experimentos se observó una buena y significativa correlación ( $R^2 \geq 0,97$ ;  $P < 0,001$ ; Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe  $> 0,96$ ) entre los valores de  $\sigma_w$  estimados con WEC<sub>P</sub> y los obtenidos en laboratorio y campo a partir de la solución de drenaje.

**ABSTRACT.** This communication presents a TDR probe (WEC<sub>P</sub>) to measure the electrical conductivity of the soil solution ( $\sigma_w$ ), which consists of 3 stainless steel wires (10 cm length) inserted in 14 ceramic plates. The  $\sigma_w$  is estimated from the water content and the bulk electrical conductivity of the ceramic plates. The WEC<sub>P</sub> was calibrated and tested in laboratory with loam soil columns wetted with different KCl solutions, and in field conditions. The  $\sigma_w$  estimated with WEC<sub>P</sub> in laboratory was compared to those values measured from the soil drained solutions. The field experiment compared  $\sigma_w$  estimated with WEC<sub>P</sub> to the corresponding values measured with tension lysimeters. A good correlation ( $R^2 \geq 0.97$ ;  $P < 0.001$ ; Efficiency Coefficient Nash-Sutcliffe  $> 0.96$ ) was found between  $\sigma_w$  estimated with WEC<sub>P</sub> and the corresponding values measured from the laboratory soil columns and the field lysimeters.

tiempo de propagación del pulso TDR a lo largo de una línea de transmisión de longitud  $L$ , y el valor de  $\sigma_a$  está relacionado con la atenuación de la onda TDR a tiempos largos.

La salinidad del suelo, definida como la concentración total de sales disueltas en la solución del suelo, tiene una influencia muy importante sobre el desarrollo y crecimiento de los cultivos y las propiedades físicas y químicas del suelo (Leone et al., 2007). La salinidad del suelo se mide principalmente a partir de la conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo ( $\sigma_w$ ). De entre los diferentes métodos disponibles para estimar  $\sigma_w$  cabe destacar los métodos indirectos que, utilizando modelos empíricos, obtienen  $\sigma_w$  a partir de  $\theta$  y  $\sigma_a$  (Hendrickx et al., 2002), la cual puede medirse por resistividad eléctrica, (TDR o técnica de inducción electromagnética. El valor de  $\sigma_a$  depende de  $\theta$ ,  $\sigma_w$  y la geometría de la porosidad de la matriz del suelo (Rhoades et al., 1976; Mualem y Friedman, 1991). Hasta la fecha, se han desarrollado numerosos modelos que relacionan estas tres variables (Mualem y Friedman, 1991; Vogeler et al., 1996; Persson, 1997; Hilhorst, 2000; Muñoz-Carpena et al., 2005), sin embargo, las diferentes respuestas del tipo de suelo al factor geometría de porosidad de la matriz, obliga a utilizar calibraciones específicas de  $\sigma_w$ - $\sigma_a$ - $\theta$  para cada tipo de suelo (Mortl et al., 2011).

Esta comunicación presenta un nuevo diseño de sonda TDR para medidas precisas y no destructivas de la conductividad eléctrica de la solución del suelo. La sonda, que consiste en 14 discos cerámicos dispuestos a lo largo de una sonda TDR de tres electrodos, estima  $\sigma_w$  a partir de la  $\sigma_a$  y la  $\theta$  medidas por TDR en el conjunto de discos cerámicos. Este método se basa en la hipótesis que la solución del suelo está en equilibrio con la de la matriz de los discos cerámicos. Debido a que la geometría de la porosidad de las discos cerámicos es constante, una única calibración de  $\sigma_w$ - $\sigma_a$ - $\theta$  es requerida.

### 1.- Introducción

La técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (Time Domain Reflectometry; TDR) es un método no destructivo que permite estimaciones simultáneas y a tiempo real de la permitividad aparente de suelo ( $\epsilon_a$ ), que guarda relación con la humedad ( $\theta$ ), y conductividad eléctrica aparente del suelo ( $\sigma_a$ ) (Topp y Ferré, 2002). El valor de  $\epsilon_a$  es proporcional al

### 2.- Teoría

#### 2.1.- TDR

El sistema TDR lanza un pulso electromagnético (EM) a lo largo de una línea de transmisión y registra una onda TDR que se expresa como voltaje o coeficiente de reflexión en función del tiempo ( $t$ ). El tiempo de

propagación ( $t_i$ ) del pulso EM a lo largo de una línea de transmisión de longitud  $L$  se expresa como (Topp y Ferré, 2002)

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

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ). Teniendo en cuenta que el valor de  $\theta$  estimado por TDR se ve afectado por  $\sigma_a$  (Robinson et al., 2003; Evett et al., 2006), y asumiendo despreciables los efectos dieléctricos de relajación,  $\theta$  puede estimarse según (Evett et al., 2005)

$$\theta = -A + B \left( \frac{t_s}{t_{air}} \right) - 0,004933 \left[ \frac{\sigma_a}{2\pi f_{vi} \epsilon_0} \right] \quad (2)$$

donde  $A$  y  $B$  son factores empíricos de la sonda TDR calculados con experimentos de calibración,  $t_s$  y  $t_{air}$  son el tiempo de tránsito del pulso electromagnético a lo largo de la línea de transmisión inmersa en suelo y aire, respectivamente,  $f_{vi}$  es la frecuencia efectiva del equipo TDR y  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío ( $8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ).

La conductividad eléctrica aparente, estimada a partir del análisis del coeficiente de reflexión de la onda TDR a tiempo largo, se calcula según (Giese y Tiemann, 1975)

$$\sigma_a = \frac{K_p}{Z_r} \left( \frac{1 - \rho_{\infty,Scale}}{1 + \rho_{\infty,Scale}} \right) \quad (3)$$

donde  $Z_r$  es la impedancia de salida de ecómetro TDR ( $50 \Omega$ ),  $K_p$  ( $\text{m}^{-1}$ ) la constante de celda de la sonda TDR que depende de la geometría de la sonda, y  $\rho_{\infty,Scale}$  es el coeficiente de reflexión escalado en fase estacionaria en condiciones ideales en los que no existe pérdidas por resistividad. Según Lin et al. (2008),  $\rho_{\infty,Scale}$  se calcula

$$\rho_{\infty,Scale} = 2 \frac{(\rho_{air} - \rho_{SC}) - (\rho - \rho_{air})}{(1 + \rho_{SC})(\rho - \rho_{air}) + (\rho_{air} - \rho_{SC})(1 + \rho_{air})} + 1 \quad (4)$$

$\rho$ ,  $\rho_{air}$  y  $\rho_{SC}$  son los coeficientes de reflexión a tiempo largo medidos con la sonda en el medio de estudio, en aire y en cortocircuito, respectivamente.

## 2.2.- Conductividad eléctrica de la solución del suelo

Siguiendo la hipótesis de Mualem y Friedman (1991), que asumen que el factor de tortuosidad que afecta a  $\sigma_a$  es idéntico al definido para predecir la conductividad hidráulica del suelo,  $\sigma_a(\theta)$  puede expresarse como

$$\sigma_a = \sigma_{a-sat} \left( \frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^\beta + \sigma_{a-s} \quad (5)$$

donde  $\sigma_{a-sat}$  y  $\theta_{sat}$  son respectivamente la conductividad eléctrica aparente y la humedad volumétrica a saturación,  $\sigma_{a-s}$  es la conductividad eléctrica aparente de la fase sólida del suelo, y  $\beta$  es un factor que, dependiendo de la porosidad transmisora de agua, define la tasa de decrecimiento entre  $\sigma_a$  y  $\theta$ . Según Mualem y Friedman (1991),  $\sigma_{a-sat}$  queda definido como

$$\sigma_{a-sat} = \sigma_w \theta_{sat}^\tau \quad (6)$$

donde  $\tau$  es el coeficiente de transmisión a saturación que describe la tortuosidad que reduce la movilidad de los iones en las proximidades de las interfaces sólido-líquido y líquido-gas. Asumiendo que  $\sigma_w$  depende únicamente de las sales disueltas (Rhoades et al., 1976), su valor puede teóricamente estimarse combinando las ecuaciones (5) y (6) según

$$\sigma_w = \frac{\sigma_a}{\theta_{sat}^\tau \left( \frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^\beta} - \sigma_{a-s} \quad (7)$$

El valor de  $\sigma_w$ , que es dependiente de la temperatura,  $T_{cC}$ , puede ser corregido a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\sigma_{w/25}$ ) según (Rhoades et al., 1999)

$$\sigma_{w/25} = \sigma_w f \quad (8)$$

donde  $f$  es un factor empírico expresado como (US Salinity Laboratory Staff, 1954)

$$f = 1 - 0,20346(T) + 0,03822(T^2) - 0,00555(T^3) \quad (9)$$

y  $T = (T_{cC} - 25)/10$

## 3.- Material y métodos

### 3.1.- Diseño de sonda TDR

El ecómetro utilizado para el registro de ondas TDR fue un TDR100 (Campbell Sci.), el cual se conectó a la sonda TDR a través de un cable coaxial de  $50 \Omega$  de 1 m de longitud. Los pulsos electromagnéticos se transfirieron a un ordenador para su almacenamiento y análisis utilizando el programa TDR-Lab V.1.0. (Moret-Fernández et al., 2010), que automáticamente calcula  $\sigma_a$  y  $\theta$ .

La sonda TDR de medida de la conductividad eléctrica de la matriz del suelo (WEC<sub>p</sub>) consiste en 14 discos cerámicos (7 mm espesor y 40 mm de diámetro) de -0,5 bar de presión de cavitación (Soil Moisture Inc., UK). Los

discos fueron dispuestos uno encima de otro a lo largo de una sonda TDR trifilar (longitud, diámetro y separación de electrodos más externos: 101,4, 2,7 y 20,0 mm, respectivamente). Se fabricó una segunda sonda TDR trifilar ( $SWC_P$ ) sin discos cerámicos (longitud, diámetro y separación de electrodos más externos: 100,4, 2,4 y 20,5 mm, respectivamente) para la medida de la  $\sigma_a$  y  $\theta$  del suelo. El cabezal de las sondas TDR estaba fabricado de resina epoxi.

### 3.2.- Experimentos de laboratorio de calibración y validación de la sonda $WEC_P$

Se realizó un primer experimento de laboratorio para calcular los valores  $K_p$  de las diferentes sondas TDR. Éste consistió en sumergir las sondas  $WEC_P$  (sin discos cerámicos) y  $SWC_P$  en diferentes soluciones salinas de NaCl (0,5, 1, 2, 5, 10 y 15  $dS\ m^{-1}$ ).

Seguidamente se realizó otra serie de experimentos de laboratorio encaminados a calcular los factores de  $\tau$  y  $\beta$  (Mualem y Friedman, 1991) de la Ec. (7). El valor de  $\tau$  se estimó a partir de los valores de  $\sigma_{a-sat}$  y  $\theta_{sat}$  obtenidos con la sonda  $WEC_P$  (mas discos cerámicos) sumergida en seis soluciones salinas de NaCl (0,5, 1, 2, 5, 10 y 15  $dS\ m^{-1}$ ). Cada medida se realizó con la sonda  $WEC_P$  previamente desalinizada tras dejar dicha sonda 24 h sumergida en la correspondiente solución salina. El valor de  $\tau$  fue numéricamente calculado minimizando la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre el valor de  $\sigma_a$  medido por TDR (Ec. 3) y los  $\sigma_{a-sat}$  calculados según Ec. (6).

El factor  $\beta$  se calculó con un experimento de cámara de presión en cuyo interior se situó la sonda  $WEC_P$ . Se efectuó una primera medida de  $\sigma$  y  $\theta$  con discos cerámicos secos, y a continuación se saturó la cámara de presión con una solución salina de NaCl de 5  $dS\ m^{-1}$ . Se consideró que los discos cerámicos saturados con la correspondiente solución salina estaban en equilibrio cuando la conductividad eléctrica de la solución de salida de la cámara igualó la de entrada (aproximadamente 24 h de duración). Seguidamente se procedió a desaturar los discos cerámicos a diferentes presiones (3, 5, 10, 50 y 100 kPa) inyectando aire por la parte superior de la cámara. El agua extraída fue recogida y la CE medida. El proceso de estabilización de la cámara a las diferentes presiones duró unas 24 h. Este experimento fue nuevamente repetido para una solución salida de 10  $dS\ m^{-1}$ . Finalmente, asumiendo una  $\sigma_{a-s}$  despreciable, el factor  $\beta$  se calculó numéricamente minimizando el RMSE para los pares de valores de  $\sigma_w$  medidos y estimados a partir de la Ec. (5).

La sonda  $WEC_P$  fue seguidamente validada en condiciones de laboratorio, utilizando para tal fin una cámara de presión (Fig. 1). Las sondas  $WEC_P$  y  $SWC_P$  fueron colocadas en el interior de la cámara de presión, la cual fue rellena con suelo franco tamizado a 2 mm hasta que el nivel de suelo cubrió los cabezales de las sondas. En el interior de la cámara se instaló un termopar para registrar, a tiempo real, la temperatura del suelo. A continuación, se saturó la cámara de presión con una solución salina de KCl de 2  $dS\ m^{-1}$ , hasta que la CE de la

solución de salida igualó la de entrada (24 h). El volumen de agua añadida fue aproximadamente cuatro veces la porosidad total del suelo. Una vez la columna estuvo saturada y la concentración de la solución del suelo estabilizada, se procedió a drenar el suelo inyectando secuencialmente aire a presión de 0,5, 3, 5, 10, 50 y 100 kPa. El agua de drenaje fue recogida y la CE medida. Se registraron los valores de  $\sigma_a$  y  $\theta$  estimados con las sondas  $WEC_P$  y  $SWC_P$  en suelo seco, saturado y 24 h después de cada presión. Los valores de  $\sigma_w$  fueron calculados, según Ec. (7), a partir de los valores de  $\sigma_a$  y  $\theta$  y los factores  $\tau$  y  $\beta$  estimados en los experimentos de calibración. Los valores de  $\sigma_w$  fueron finalmente corregidos a 25 °C. Este mismo experimento fue repetido para concentraciones salidas de 5 y 10  $dS\ m^{-1}$ . Finalmente, los valores de  $\sigma_w$  estimados con la sonda  $WEC_P$  fueron contrastados con los valores de CE de las soluciones salinas de entrada.

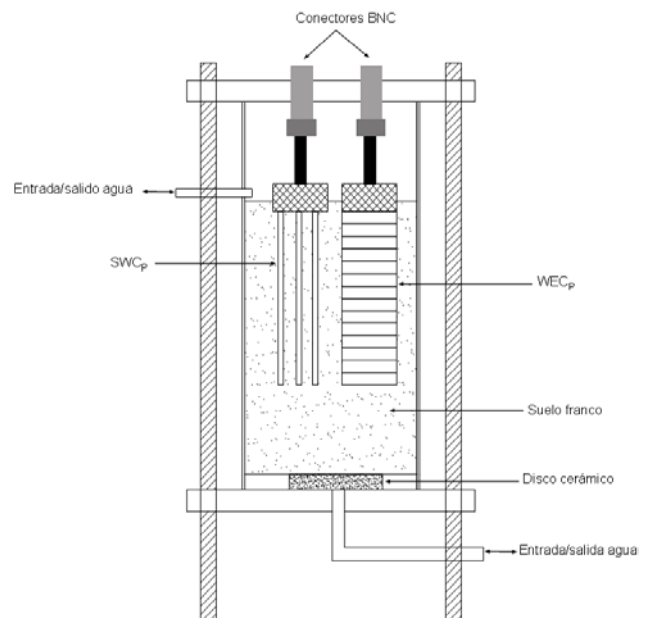


Fig. 1. Esquema de la cámara de presión utilizada para validar la sonda de medida de conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $WEC_P$ ).  $SWC_P$  indica la sonda TDR estándar de medida de humedad del suelo

### 3.3.- Validación de campo

Se realizó un último experimento de campo para validar la fiabilidad de la sonda  $WEC_P$  en condiciones inalteradas de suelo. Dicho experimento consistió en comparar las medias de  $\sigma_w$  estimadas con  $WEC_P$  con las obtenidas con un lisímetro de tensión (LT). El experimento se realizó en un suelo de una campo de manzanos localizado en la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza). La densidad aparente del suelo fue 1,33  $g\ cm^{-3}$ . Se insertaron en el suelo tres LT (modelo SPS 200 – SDEC) en los vértices de un triángulo equilátero de 15 cm de lado, en cuyo centro se

instaló la sonda WEC<sub>p</sub>, y la sonda SWE<sub>p</sub> a 9 cm de ésta primera. Todas las sondas fueron instaladas a igual profundidad, hasta que el cabezal de las sondas TDR estuvieron cubiertas por 1 cm de suelo. La microparcela experimental fue confinada por un cilindro de metacrilato de 40 cm de diámetro y 50 cm altura insertado 1 cm en el suelo. Se efectuaron diferentes ciclos de humectación-drenaje del suelo con agua destilada y diferentes soluciones de KCl (Tabla 1). Se realizaron medidas periódicas de  $\sigma_a$  y  $\theta$ , así como extracciones de soluciones salidas del suelo para la medida directa de  $\sigma_w$ . Se procedió también a la medida de la temperatura del suelo, utilizando para tal fin un sensor de termopar instalado a 7 cm de profundidad. Finalmente, las medidas de  $\sigma_w$  corregidas a 25 °C obtenidas con los LT fueron contrastadas con los correspondientes valores obtenidos con la sonda WEC<sub>p</sub>.

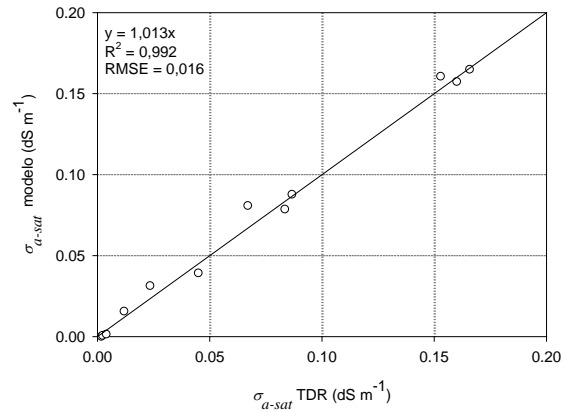
**Tabla 1.** Ciclos de humectación del suelo con agua destilada y diferentes soluciones salinas de KCl aplicadas al experimento de campo

Fecha	Observación	Día	Infiltración (mm)	CE (dS m <sup>-1</sup> )
21-11-11	Riego	1	64	0,86
23-11-11	Lluvia	3	1,4	-
29-11-11	Riego	9	80	5,25
13-12-11	Riego	22	96	4,78
19-12-11	Riego	29	80	5,02
27-12-11	Riego	37	80	5,57
17-01-12	Riego	58	80	0,001
24-01-12	Riego	65	80	0,001

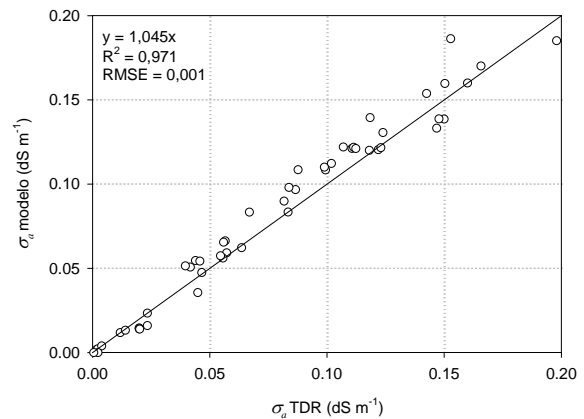
#### 4.- Resultados y discusión

Los valores de  $K_p$  obtenidos para las dos sondas WEC<sub>p</sub> y SWC<sub>p</sub> fueron 3,36 y 3,44 m<sup>-1</sup>. Los valores  $A$  y  $B$  utilizados para estimar  $\theta$  a partir de  $\varepsilon_a$  fueron 0,176 y 0,115 (Ec. 2) (Topp y Reynolds, 1998).

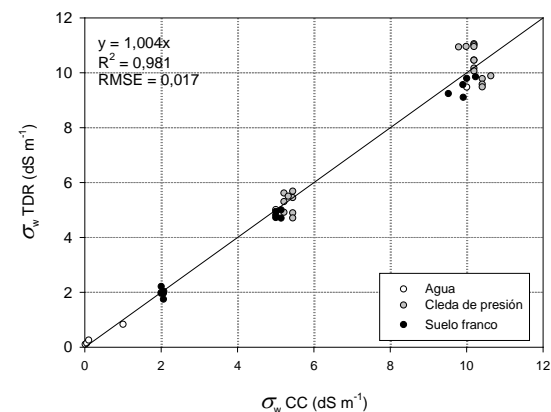
El valor de  $\theta_{sat}$  utilizado en las Ecs. (5), (6) y (7) para calcular  $\sigma_w$  fue 0,389 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, y el factor  $\tau$  obtenido en el experimento de calibración de la sonda WEC<sub>p</sub> con diferentes soluciones salinas de NaCl fue 1,957. Los resultados muestran como este factor permite obtener una excelente correlación ( $p < 0,001$ ; Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (E) = 0,99) (Fig. 2) entre los valores de  $\sigma_{a-sat}$  medido con TDR los calculados con la Ec. (6). El valor del factor  $\beta$  calculado con el experimento de cámara de presión fue 4,282. Este dato permitió un excelente ajuste ( $p < 0,001$ ; E = 0,96) entre los valores de  $\sigma_a$  medidos por TDR y los calculados con la Ec. (5) (Fig. 3).



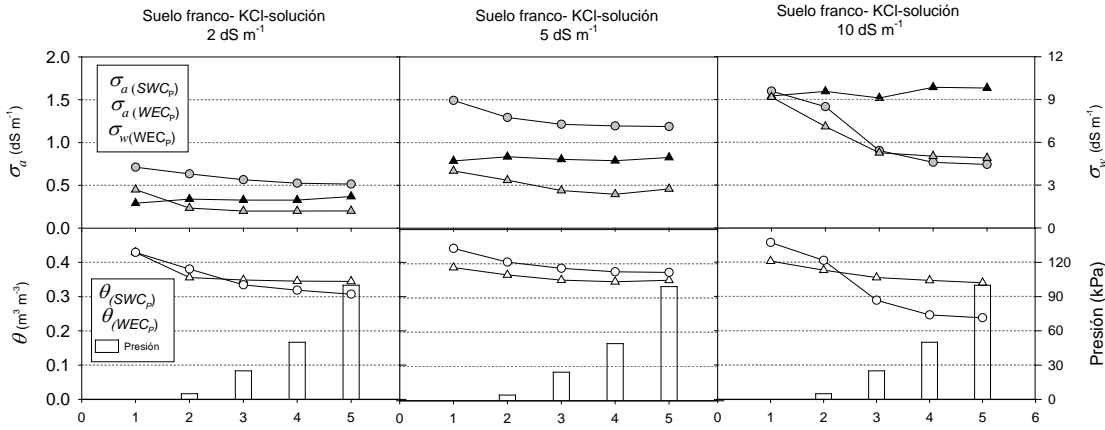
**Fig. 2.** Relación entre la conductividad eléctrica aparente a saturación medida por TDR y la estimada con la Ec. 6 para los valores optimizados de  $\tau$



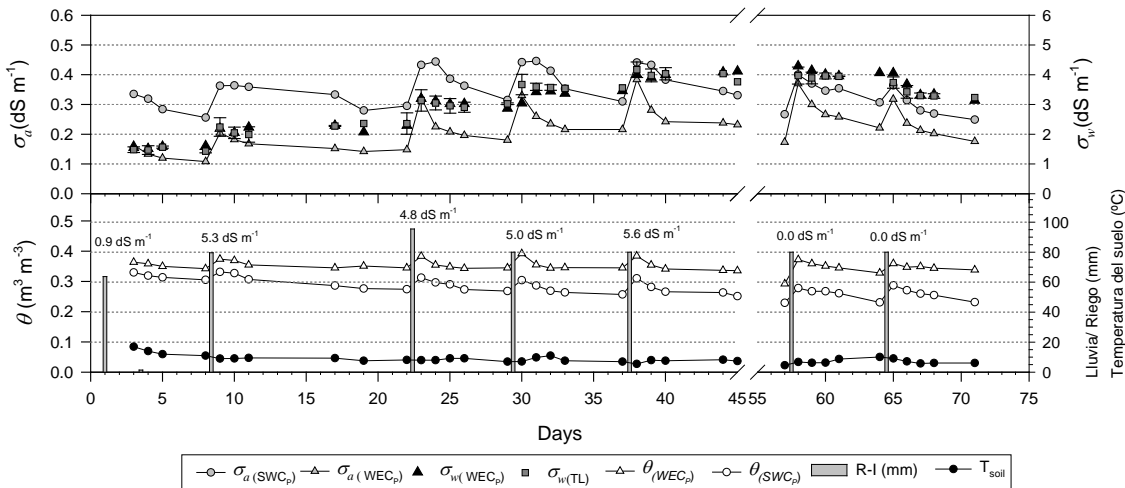
**Fig. 3.** Relación entre la conductividad eléctrica aparente medida por TDR y la estimada con la Ec. (7) para los valores optimizados de  $\beta$



**Fig. 4.** Relación entre la conductividad eléctrica de la solución del suelo medida ( $\sigma_w-CC$ ) en todos los experimentos de laboratorio (agua, cámara de presión y suelo franco) y la estimada con TDR ( $\sigma_w-TDR$ ) (Ec. 7)



**Fig. 5.** Evolución temporal de  $\theta$  y  $\sigma_a$  medida con  $SWC_p$  y  $WEC_p$  y  $\sigma_w$  estimada con  $WEC_p$  en la columna con suelo franco tamizado tras ser saturado con tres soluciones salinas de KCl, y posterior drenaje a presiones comprendidas entre 3 y 100 kPa



**Fig. 6.** Evolución temporal de  $\theta$  y  $\sigma_a$  medida con  $SWC_p$  y  $WEC_p$ ,  $\sigma_w$  estimada con  $WEC_p$  y promedio de  $\sigma_w$  medidos a partir del extracto de solución salina obtenidos con los tres lisímetros de tensión (LT). Las columnas de la figura inferior muestran el volumen de solución salina de KCl añadida en el suelo. Las barras verticales indican la desviación estándar sobre la media de  $\sigma_w$  medidos con los lisímetros de tensión

La excelente correlación ( $p < 0,001$ ;  $E = 0,98$ ) entre la conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $\sigma_w$ ) medida a partir del lixiviado de la solución salina y la obtenida por TDR (Ec. 7) para el conjunto de medidas de laboratorio (Fig. 4) demuestra que la sonda  $WEC_p$  puede ser una alternativa viable para la medida indirecta de  $\sigma_w$ .

La evolución temporal de  $\theta$  y  $\sigma_a$  medidos en laboratorio con las sondas  $SWC_p$  y  $WEC_p$  y la  $\sigma_w$  estimada con  $WEC_p$ , insertadas ambas en suelo franco tamizado humectado con diferentes soluciones salinas y posteriormente drenado a diferentes tensiones (3 a 100 kPa), muestra como los valores de  $\theta$  y  $\sigma_a$  medidos por TDR decrecen al aumentar la presión de drenaje. Sin embargo, los valores de  $\sigma_w$  permanecen prácticamente constantes a lo largo del experimento (Fig. 5). Esto es debido a que, durante un proceso de drenaje sin evaporación, los valores de  $\sigma_a$  dependen de la humedad y la concentración de sales de la solución del suelo,

expresado con  $\sigma_w$ .

El experimento de campo diseñado para validar los resultados obtenidos en laboratorio, muestran una excelente correlación entre el valor promedio de  $\sigma_w$  estimado con de tres LT ( $\sigma_{w-LT}$ ) y los obtenidos con la sonda  $WEC_p$  ( $\sigma_{w-TDR} = 1,007 \sigma_{w-LT}$ ,  $R^2 = 0,97$ ,  $RMSE = 0,027$ ,  $p < 0,001$ ). La dinámica de  $\theta$  y  $\sigma_a$  medida con las sondas  $SWC_p$  y  $WEC_p$  y la  $\sigma_w$  medida con  $WEC_p$  y los LT fue similar a la observada en el experimento de laboratorio. Mientras las fluctuaciones de  $\sigma_a$  dependieron de la humedad del suelo y la CE de la solución salina de infiltración, el valor de  $\sigma_w$  medida con  $WEC_p$  y LT estuvo solamente condicionado por la solución salina de infiltración, cuyos valores aumentaron a medida que se añadían nuevas soluciones salinas (Fig. 6). Se observó un comportamiento inverso de decrecimiento de  $\sigma_w$  cuando en el suelo comenzó a aplicarse agua destilada. Los valores de  $\sigma_w$  medidos

con  $WEC_p$  fueron parejos a los estimados con LT, excepto durante las primeras 48 h tras aplicar agua destilada (días 58 y 65; Fig. 6). Estos resultados indican que la sonda  $WEC_p$  necesita aproximadamente dos días para equilibrar la solución salina entre las discos porosas y los poros de suelo; sin embargo, el tiempo de respuesta del sensor no es una limitación relevante para los estudios a largo plazo de procesos de salinización del suelo.

## 5.- Conclusiones

Este trabajo presenta una nueva sonda TDR ( $WEC_p$ ) para la medida de la conductividad eléctrica de la solución del suelo por TDR. El diseño consiste en una sonda TDR de 3 electrodos de 10 cm de longitud insertada en 14 discos cerámicos de 0,5 bar de presión de cavitación. Este método se basa en la hipótesis de que la solución salina en los discos cerámicos está en equilibrio con la solución en el sistema de poros del suelo. Debido a que los discos cerámicos tienen una geometría de poros constante, una única calibración de  $\sigma_w - \sigma_a - \theta$  es requerida. Esta nueva sonda fue calibrada y testada en laboratorio y finalmente validada en condiciones de campo. Los resultados muestran que esta nueva sonda permite estimar de forma precisa la conductividad eléctrica de la solución del suelo, independientemente del contenido de humedad volumétrica del suelo. Aunque el equipo TDR es relativamente caro, la gran versatilidad de esta técnica permite desarrollar sondas de fabricación “casera” de bajo coste. Las principales ventajas de este nuevo método pueden resumirse en (i) sensores de bajo coste; (ii) sondas de fácil y rápida instalación; (iii) sondas robustas y de reducido mantenimiento. Sin embargo, son necesarios nuevos trabajos encaminados a incorporar sensores de temperatura en la sonda TDR o la búsqueda de nuevos materiales cerámicos que permitan ampliar el rango de tensiones a aplicar.

*Agradecimientos.* El presente trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto: AGL2010-22050-CO3-02/AGR) y por el Gobierno de Aragón y La Caixa (proyectos: GALC020/2010; 2012/ GA LC 074). Los autores agradecen la colaboración de Ricardo Gracia, M. Josefa Salvador y Ana Bielsa por su apoyo en la consecución de este trabajo.

## 6.- Bibliografía

Evelt, S.R., J.A. Tolk, y T.A. Howell, 2005. Time domain reflectometry laboratory calibration in travel time, bulk electrical conductivity, and effective frequency. *Vadose Zone J.* 4, 1020–1029.

Evelt, S.R., J.A. Tolk, y T.A. Howell, 2006. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone J.* 5, 894–907.

Giese, K., y R. Tiemann, 1975. Determination of the complex permittivity from thin sample time domain reflectometry: improved analysis of the step response waveform. *Adv. Mol. Relaxation Process.* 7, 45–49.

Hendrickx, J.M.H., J.M. Wraith, D.L. Crown, y R. Kachanoski, R., 2002. Miscible solute transport. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4.* SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.

Hilhorst, M., 2000. A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1922–1925.

Leone, A.P., M. Menenti, A. Buondonno, A. Letizia, C. Maffei, y G. Sorrentino, 2007. A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity. *Agric. Water Manage.* 89, 39–48.

Lin, C.-P., C.C. Chung, J.J. Huisman, y S.H. Tang, 2008. Clarification and calibration of reflection coefficient for electrical conductivity measurement by time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 72, 1033–1040.

Moret-Fernández, D., J. Vicente, F. Lera, B. Latorre, M.V. López, N. Blanco, C. González-Cebollada, J.L. Arrúe, R. Gracia, M.J. Salvador, y A. Bielsa, 2010. TDR-Lab Version 1.0 Users Guide. [consulta: 24 julio 2013] <http://digital.csic.es/handle/10261/35790>

Mortl, A., R. Muñoz-Carpena, D. Kaplan, y Y. Li, 2011. Calibration of a combined dielectric probe for soil moisture and porewater salinity measurement in organic and mineral coastal wetland soils. *Geoderma* 161, 50–62.

Mualem, Y., y S.P. Friedman, 1991. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resour. Res.* 27, 2771–2777.

Muñoz-Carpena, R., C.M. Regalado, A. Ritter, J. Álvarez-Benedí, y A.R. Socorro, 2005. TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. *Geoderma* 124, 399–413.

Persson, M., 1997. Soil solution electrical conductivity measurements under transient conditions using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 997–1003.

Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, y W.J. Alves, 1976. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 433–439.

Rhoades, J.D., F. Chanduvi, y S. Lesch, 1999. *Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements.* FAO Irrigation and Drainage Paper, 57, ISSN: 0254-5284.

Robinson, D.A., S.B. Jones, y J.M. Wraith, 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 2, 444–475.

Topp, G.C., y T.P.A. Ferré, 2002. Water content. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4.* SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.

Topp, G.C., y W.D. Reynolds, 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil Tillage Res.* 47, 125–132.

US Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Handbook 60*, US Government Printing Office, Washington, DC.

Vogeler, I., B.E. Clothier, S.R. Green, D.R. Scotter, y R.W. Tillman, 1996. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 5–12.