

DETERMINACIÓN SIMULTÁNEA MEDIANTE TDR DEL TRANSPORTE DE AGUA Y UN SOLUTO SALINO EN EL SUELO

R. Muñoz-Carpena¹, C.M. Regalado¹, J. Alvarez-Benedí², A.R. Socorro¹, N. Pérez¹

¹ Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), Apdo. 60, 38200 La Laguna, carpena@icia.es

² Servicio de Investigación y Tecnología Agraria (SITA), Apdo. 172, 47011 Valladolid

RESUMEN. Se evalúa el uso del método del TDR (Time Domain Reflectometry) para la estimación de la concentración de un ión salino (Br^-) utilizado como trazador en el suelo. Se comparan primeramente 6 métodos para la obtención de la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) a partir de la forma de la onda de TDR utilizando varias disoluciones patrón acuosas de una sal del trazador (KCl). El método de Nadler es el más adecuado en nuestras condiciones ($r^2_{1:1} = 0.988$). Se evaluaron tres tipos de modelos (lineal, no-lineal y empírico) para estimar la conductividad eléctrica de la disolución del suelo (σ_w) a partir de los datos de σ y el contenido de humedad (θ) obtenidos en un ensayo con 24 columnas de suelo (6 concentraciones salinas (BrK) x 4 niveles de humedad) empaquetado a su densidad natural. El modelo lineal (ecuación de Rhoades) predice adecuadamente ($r^2_{1:1} = 0.986$) y no existe mejora en la introducción de un modelo no-lineal más complejo. Se contrasta también el comportamiento de la sonda clásica de salinidad aparente del suelo de 4 electrodos (s4e) frente al TDR encontrándose una buena correlación entre ambas medidas ($r^2 = 0.964$), aunque la s4e arroja medidas sistemáticamente inferiores. Finalmente se obtuvo un buen ajuste lineal entre las concentraciones del trazador Br^- en la disolución del suelo y σ_w ($r^2 = 0.96$). El método confirma ser una herramienta robusta para el estudio de transporte de un trazador salino a través del suelo.

ABSTRACT. The use of the TDR signal to predict concentration of a saline tracer (Br^-) through the soil is evaluated. Six TDR-based methods to estimate bulk electrical conductivity (σ) on a range of standard KCl solutions are compared. Nadler's method works the best in our conditions ($r^2_{1:1} = 0.988$). Three models (linear, non-linear and empirical) to predict soil solution electrical conductivity (σ_w) based on σ and water content (θ) are experimentally tested on a laboratory set-up that included 24 hand packed soil columns as a combination of 6 salinity (Br^-) levels and 4 moisture contents. The linear model (Rhoades' equation) predicted slightly better than the other two ($r^2_{1:1} = 0.986$ vs. 0.976 and 0.983). Since this is a simpler model (3 vs. 4 parameters) it is thus recommended. Measurements made simultaneously with a four electrode salinity probe gave good correlation with those obtained with the TDR ($r^2 = 0.964$). A good correlation was also found between tracer concentration in the soil solution and σ_w ($r^2 = 0.96$). The method reveals itself as a robust tool for solute transport studies under controlled salinity conditions.

1.- Introducción

La técnica del TDR (Time Domain Reflectometry) fue inicialmente aplicada al suelo por Topp y Davis (1980) para la medida del contenido de humedad basándose en el tiempo de retraso de la onda electromagnética al viajar por el dieléctrico (suelo). La propiedad que define la transmisión (velocidad) de la onda es la constante dieléctrica compuesta del medio (ϵ_c). Sin embargo la atenuación en la forma de la onda de TDR al transmitirse por medios de diferente conductividad eléctrica (**Figura 1**), puede servir también para estimar la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ). Es posible relacionar esta medida de la conductividad eléctrica con la de la disolución del suelo (σ_w), dependiente del contenido de humedad y otras propiedades físicas del suelo. En estudios de trazadores, en los que un soluto salino controla la concentración de la disolución del suelo, ésta puede correlacionarse con cambios en la σ_w , lo que permite obtener con un solo instrumento todas las lecturas necesarias para la interpretación del proceso de transporte de solutos a través del suelo en campo y laboratorio (Kachanoski et al., 1992; Mallants y Vanclouster, 1994; Mallants et al., 1994; Ward et al., 1994; Heimovaara et al., 1995; Mallants y Vanclouster, 1996; Mallants et al., 1996; Vogeler y Clothier, 1996; Vogeler et al., 1997; Vogeler et al., 2000).

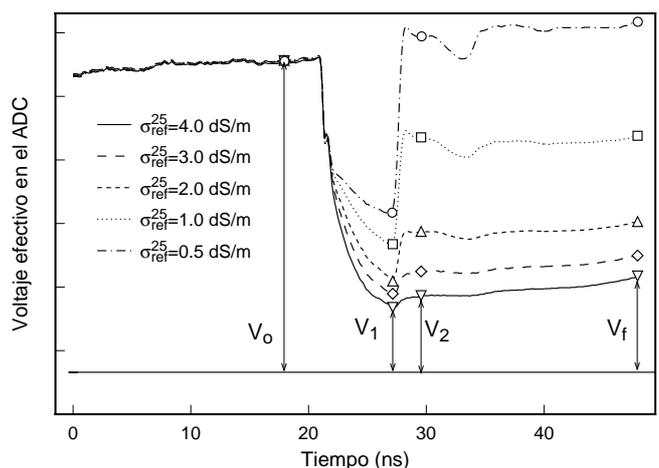


Figura 1. Deformación de la onda del TDR por efecto de la salinidad

Para la obtención de la σ a partir de la onda del TDR se consideran 4 voltajes singulares de la onda que pueden ser leídos directamente en la pantalla del TDR (**Figura 1**): V_0 amplitud del pulso de TDR, V_1 señal después de la reflexión parcial al principio de la sonda, V_2 señal reflejada después

del final de la sonda, y V_f señal reflejada después de un tiempo largo. Con estos valores se han presentado diferentes procedimientos de cálculo resumidos en la **Tabla 1**. Las mejoras que de forma cronológica se han ido introduciendo en las ecuaciones de la citada Tabla responden a la inclusión del efecto de multireflexión de la onda en la parte final de la misma causado por discontinuidades en la impedancia de la línea de transmisión.

Tabla 1. Ecuaciones de cálculo de la σ a partir de la onda TDR¹

Referencia	Ecuación
Giese y Tiemann (1975)	$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{120\pi L} \left(\frac{2V_o}{V_f} - 1 \right)$ [1]
Dalton et al. (1984)	$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{120\pi L} \left(\frac{V_1}{V_2 - V_1} \right)$ [2]
Topp et al. (1988)	$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{120\pi L} \ln \left(\frac{V_1(2V_o - V_1)}{V_o(V_2 - V_1)} \right)$ [3]
Yanuka et al. (1988)	$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{120\pi L} \left(\frac{V_1 V_f - V_o(V_1 + V_f)}{V_o(V_1 - V_f)} \right)$ [4]
Zegelin et al. (1989)	$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{120\pi L} \frac{V_1}{V_f} \left(\frac{2V_o - V_f}{2V_o - V_1} \right)$ [5]
Nadler et al. (1991)	$\sigma^{25} = (K_c/Z_s) f_t$ [6]

¹L= longitud de la sonda de TDR (m); σ en (dS/m)

En un orden distinto de métodos se incluye el propuesto por Nadler et al. (1991) que además de evitar las alteraciones de los efectos comentados necesita de un número inferior de parametros (V_o , y V_f exclusivamente). El método se basa en la medida del coeficiente de reflexión, ρ , definido de manera general como

$$\rho = (V_f / V_o) - 1 \quad [7]$$

Para el caso en el que la sonda de TDR no necesita un transformador de balance de carga (balun), como sucede en sondas de 3 o más varillas, el coeficiente de reflexión se puede calcular también como (Heimovaara et al., 1995)

$$\rho = (V_f - V_o) / V_o \quad [8]$$

La impedancia total del sistema (Z_T) se define como

$$Z_T = Z_o (1 + \rho) / (1 - \rho) \quad [9]$$

donde Z_o es la impedancia característica del cable coaxial (50 Ω). Nadler et al. (1991) propusieron la estimación de la conductividad eléctrica aparente del suelo (σ) a partir de una ecuación similar a la propuesta por Rhoades y Schilfgaard (1976) para la sonda de salinidad del suelo de 4 electrodos (Ecuación 6) donde K_c es la constante de celda del sensor (TDR aquí), Z_s es la impedancia del suelo muestreado y f_t es el coeficiente de corrección de la σ con la temperatura ($f_t=1$ para $T= 25^\circ\text{C}$). La impedancia de la muestra puede calcularse a partir de la total (Ecuación 9) y la del cable (Z_{cable}) como (Heimovaara et al., 1995),

$$Z_s = Z_T - Z_{\text{cable}} \quad [10]$$

Una primera relación entre la σ y la conductividad eléctrica de la disolución del suelo (σ_w) fue propuesta por Rhoades et

al. (1976),

$$\sigma = \theta T \sigma_w + \sigma_s' \quad [11]$$

donde θ es el contenido volumétrico de humedad del suelo, T es un coeficiente de transmisión también llamado tortuosidad, y σ_s' es la parte de la conductividad eléctrica de la fase sólida del suelo asociada con el intercambio de iones en la interfase sólido-líquido del suelo y normalmente considerada como una constante para cada suelo. La T puede expresarse como una función lineal del contenido de humedad,

$$T = a \theta + b \quad [12]$$

con lo que la relación entre σ y σ_w es cuadrática con respecto a la humedad (Ecuación 13 en **Tabla 2**). Nótese cómo esta relación entre σ y σ_w es lineal para cada contenido de humedad fijo.

Tabla 2. Ecuaciones que relacionan σ y σ_w ¹

Modelo	Ecuación	Parámetros
Lineal	$\sigma = (a \theta^2 + b \theta) \sigma_w + \sigma_s'$	a, b, σ_s [13]
No lineal	$\sigma = [\theta - (c\theta + d)] \sigma_w + \frac{(\theta_{\text{sol}} + c\theta + d)^2}{\theta_{\text{sol}}}$	c, d, σ_s , θ_{sol} [14]
Empírico	$\sigma = (c\theta - d) \sigma_w + (a\theta - b)$	a, b, c, d [15]

¹ θ en (cm^3/cm^3); σ en (dS/m)

Varios autores (Nadler y Frenkel 1980; Rhoades et al., 1989; Mallants et al., 1996; Nadler, 1997) han observado como para valores bajos de σ_w se pierde la citada linealidad debido a que el factor σ_s' varía. Para considerar este efecto se han propuesto modelos alternativos en los que el término variable σ_s' se sustituye por un término $\delta\sigma_s$, en el que σ_s es constante y δ es una relación empírica variable con la θ y salinidad (Nadler y Frenkel, 1980). Una de estas relaciones no lineales (Ecuación 14 en **Tabla 2**) ha sido propuesta por Rhoades et al. (1989). El factor δ incluye en este caso el efecto de la distribución de los solutos en la fracción móvil del agua (y sales) del suelo. El factor θ_{sol} de dicha ecuación corresponde a la fracción volumétrica ocupada por los solutos del suelo y puede calcularse como la relación entre las densidades aparente (ρ_b) y específica (ρ_s) medidas en un suelo

$$\theta_{\text{sol}} = \rho_b / \rho_s \quad [16]$$

Una última opción para relacionar la σ y σ_w sería mediante un modelo empírico como el propuesto por Vogeler y Clothier (1996) para suelos agregados (Ecuación 15 en **Tabla 2**).

Una vez estimada la conductividad eléctrica de la disolución del suelo es posible relacionarla con la concentración de un soluto salino cuando éste en predomina la disolución del suelo. La mayoría de los autores han coincidido en que en estas condiciones se obtiene un buen ajuste de tipo lineal (Heimovaara et al., 1995; Vogeler y Clothier, 1996; Vogeler et al., 1997; Neve et al., 2000). El objetivo de este trabajo es presentar el método obtener la concentración de un soluto mediante TDR y la validez de las ecuaciones de cálculo propuestas por otros autores.

2.- Materiales y métodos

Muestreo y caracterización del suelo

El suelo se obtuvo en una parcela sorribada en cultivo de platanera en el Norte de Tenerife. El muestreo fue realizado a 15 cm en varios puntos de la parcela. A la llegada al laboratorio se llenaron con el suelo contenedores de 50 litros perforados en el fondo y con una base de arena y malla. Los contenedores se regaron durante 24 h o hasta obtener un valor constante de conductividad eléctrica en la disolución de drenaje. Posteriormente el suelo se secó al aire y tamizó por debajo de 2 mm.

Las texturas se determinaron por el método del densímetro Bouyoucos (Métodos Oficiales de Análisis, 1986). El contenido en materia orgánica se determinó mediante el método de Walkey (Métodos Oficiales de Análisis, 1986). La densidad aparente y porosidad (η) se determinaron mediante métodos estándar (Klute, 1986). La densidad específica del suelo se midió mediante el método del picnómetro con etanol standard (Klute, 1986).

Medida de la conductividad eléctrica aparente

Para la obtención de la constante de celda del método de Nadler et al. (1991), K_c , y resistencia del cable (Z_{cable}) se realizaron una serie de medidas en disoluciones de KCl con conductividades eléctricas conocidas ($\sigma_{ref}^{25}=0.52, 1.06, 2.03, 3.01$ y $4.02 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Las medidas se realizaron en un vaso con agitación continua y registrando la temperatura y la curva de TDR resultante. Los parámetros buscados se obtienen a partir de los valores medidos de σ^{25} y Z_T (Ecuación 9). Se tomaron 3 medidas adicionales en disoluciones patrón diferentes ($\sigma_{ref}^{25}=0.75, 1.70, 2.90 \text{ dS/m}$) para comprobar la bondad del ajuste. Para el resto de los métodos de la **Tabla 1** se leyeron los valores del voltaje de las señales almacenadas de TDR por el equipo, con resolución de 1200 puntos por medida (**Figura 1**).

Estimación de conductividad eléctrica de la disolución del suelo

Se diseñó un experimento con 24 columnas de suelo resultantes de la combinación de 4 contenidos de humedad ($\theta=0.5\eta, 0.6\eta, 0.7\eta, 0.9\eta$) y 6 niveles de conductividad de la disolución del suelo correspondientes a distintas concentraciones de BrK (**Tabla 3**).

Tabla 3. Disoluciones de BrK utilizadas en la determinación de la σ_w

	CE0	CE0.5	CE1.0	CE2.0	CE3.0	CE4.0
σ^{25} (dS/m)	0.01	0.55	1.10	2.29	3.31	4.13
[Br ⁻] (ppm)	0.0	304.4	608.7	1434.8	2087.0	2228.3

Para ello se utilizaron 24 contenedores cilíndricos ($\varnothing_i=15.5 \text{ cm}$, $h=21.0 \text{ cm}$) de 3.962 l que se llenaron con suelo con un 12% de humedad gravimétrica, tamizado por debajo de 2 mm, y empaquetado a una densidad aparente semejante a la natural de campo, $\rho_b=0.93$ (equivalente a 3.696 Kg de suelo seco por contenedor). El suelo de cada contenedor se mezcló con la disolución de BrK correspondiente a cada nivel de conductividad deseado en un volumen igual al necesario para los niveles de humedad buscados (0.84,

1.05, 1.26 y 1.46 l respectivamente para cada contenedor). La mezcla se homogeneizó hasta obtener un contenido de humedad uniforme y se empaquetó por capas a la densidad aparente deseada.

Cada contenedor se instrumentó secuencialmente con una sonda de TDR de tres varillas y 20 cm de longitud, una sonda estándar de σ de 4 electrodos a 1-20 KHz combinada con un sensor de temperatura (Rhoades y Schilfgaarde, 1976), y un extractor de la disolución del suelo (pelillo radicular a 70 cb succión) (**Figura 2**). De los dos primeros dispositivos se obtuvieron valores de σ^{25} y del último los σ_w^{25} correspondientes tras la medida con un conductivímetro de laboratorio. Al término del ensayo se midió la conductividad eléctrica del extracto de saturación con el conductivímetro de laboratorio.

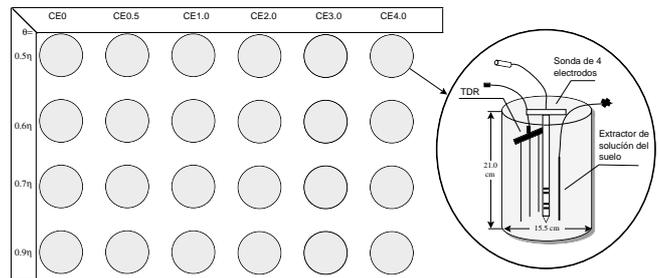


Figura 2. Esquema del ensayo de laboratorio

La medida de la humedad del suelo se realizó mediante el TDR registrando valores de la constante dieléctrica del suelo (ϵ_c) y aplicando la ecuación de calibración desarrollada específicamente para este suelo (Regalado et al., 2001)

$$\theta = -11.2 \times 10^{-2} + 5 \times 10^{-2} \epsilon_c - 16 \times 10^{-4} \epsilon_c^2 + 2 \times 10^{-5} \epsilon_c^3 \quad [17]$$

Relación entre la concentración del bromuro y la σ_w

En las soluciones extraídas con el pelillo radicular se analizó el ión bromuro mediante el método colorimétrico de la Cloramina-T en un autonalizador Technicon AAIL. Dichos valores se ajustaron a σ_w con un modelo lineal.

3.- Resultados y discusión

3.1 Caracterización del suelo

Las características del suelo de interés para este estudio se resumen en la **Tabla 4**. Este suelo presenta marcadas características ándicas (se puede clasificar como andosol en algunas muestras) como son la baja densidad aparente del suelo y su fuerte microagregación natural, que condicionan su alta retención de humedad, unido a un valor alto de conductividad hidráulica (Armas Espinel, 2001).

Tabla 4. Características del suelo del ensayo.

Propiedad	Valor
Porcentaje de arcilla, A_c (%)	13.0±6.2
Textura (USDA)	Franco-arcilloso
Materia orgánica, MO (%)	2.30±0.05
porosidad, η (%)	66.4±2.4
densidad aparente, ρ_b (g/cm ³)	0.87±0.08
densidad específica, ρ_s (g/cm ³)	2.70±0.09
fracción volumétrica de sólidos del suelo, θ_{sol}	0.32±0.03

3.2 Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo

Los resultados del ajuste de la ecuación de Nadler et al. (1991) se observan en la **Figura 3**, con $K_c=30.06$, $Z_{cable}=2.68\Omega$ ($r^2_{1:1}=0.988$). La comprobación de la estimación obtenida con esta calibración para las tres disoluciones patrón adicionales (no incluidas en el ajuste) fue muy bueno con lo que la bondad del ajuste se garantiza

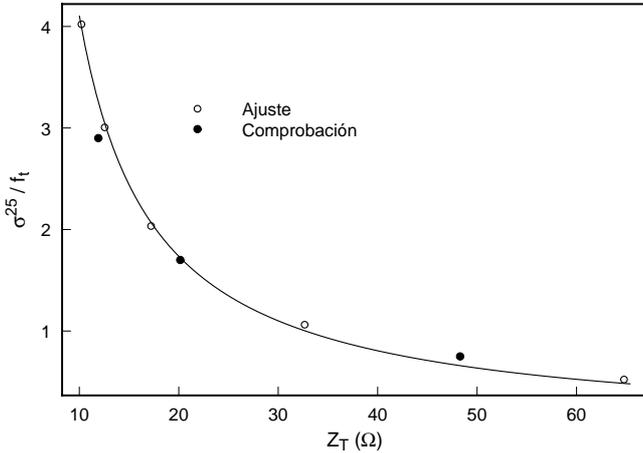


Figura 3. Ajuste experimental del método de Nadler

Con los valores singulares del voltaje obtenidos de las ondas TDR registradas en cada lectura se calcularon los valores de σ para las ecuaciones de la **Tabla 1**. La comparación de los resultados de los distintos métodos se presenta en la **Figura 4**.

Se observa una marcada no linealidad para conductividades superiores a 2 dS/m en los métodos de Yanuka (Y), Giese y Tienman (G-T), y Zegelin, mientras que los de Topp, Dalton y Nadler son de respuesta lineal. Estos últimos sin embargo sobreestiman los valores de referencia de las disoluciones. Estos resultados poco satisfactorios para los métodos Y y G-T coinciden con los presentados por Zegelin et al. (1989).

Estos resultados afirman el método de Nadler como la mejor opción de entre las estudiadas y fue el que se utilizó en el ensayo posterior. Aunque este método requiere una calibración previa como la presentada, posteriormente permite obtener muy buenas estimaciones de la σ con sólo dos valores de voltaje de la onda de TDR. Es interesante resaltar además que estos valores (V_o y V_f) son además fácilmente identificables al tratarse del valor inicial y final de la onda visible en la pantalla del TDR (o de su registro). Esto permite seleccionar fácilmente estos valores mediante un pequeño programa que automáticamente lea los voltajes registrados para cada onda. En nuestro caso se hizo tomando como valor de V_o la media de los primeros 20 valores de la onda (de un total de 1200) y de los últimos 20 para el V_f .

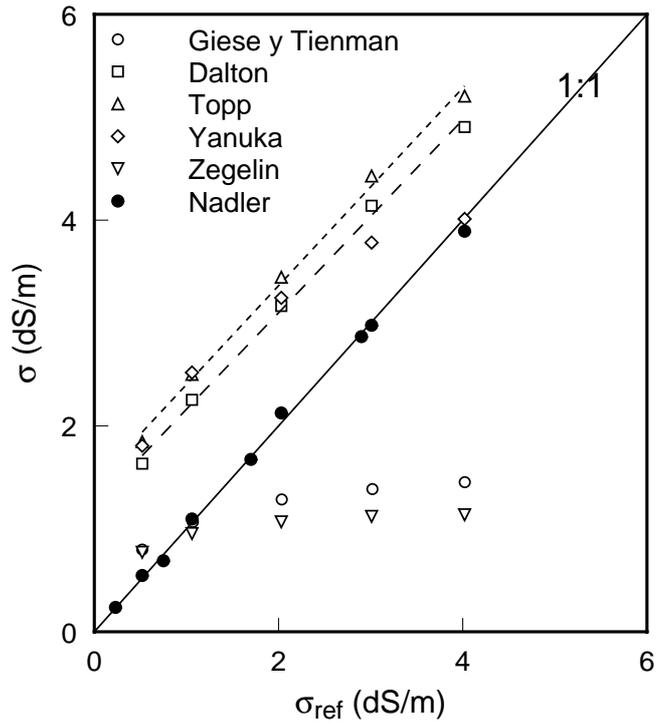


Figura 4. Comparación de los métodos para obtener σ mediante el TDR

3.3 Estimación de conductividad eléctrica de la disolución del suelo

Los datos obtenidos en el ensayo se recogen en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Resultados experimentales para la estimación de σ_w (dS/m).

θ (%)	σ -TDR	σ_w	σ -4e	σ -pasta
35.5±1.0	0.14	1.05	0.050	0.71
	0.17	--	0.102	0.85
	0.20	--	0.149	0.98
	0.20	--	0.159	1.28
	0.23	2.22	0.199	1.47
	0.30	2.86	0.215	1.79
42.9±1.0	0.21	1.12	0.139	0.74
	0.27	1.23	0.195	0.97
	0.29	1.51	0.232	1.05
	0.34	2.14	0.301	1.36
	0.40	2.46	0.326	1.57
	0.44	2.84	0.314	1.81
46.8±0.7	0.29	1.02	0.244	0.71
	0.35	1.19	0.287	0.89
	0.38	1.41	0.331	1.12
	0.48	2.16	0.433	1.55
	0.59	2.62	0.477	1.92
	0.64	2.86	0.535	2.05
58.0±0.6	0.41	0.78	0.315	0.68
	0.50	1.05	0.384	0.93
	0.57	1.40	0.467	1.14
	0.71	1.89	0.612	1.65
	0.92	2.41	0.756	2.10
	1.03	2.78	0.822	2.24

La extracción de la disolución del suelo mediante los pellizcos radiculares no fue posible en 3 de las 6 muestras con menor humedad (35.5±1.0%). Esto no es sorprendente si se tiene en cuenta que los datos de curvas de succión de este suelo obtenidas sobre 70 muestras en otro estudio mostraron que a la succión de 70 cb el contenido medio de humedad del suelo es del 36%.

La comparación de los valores de σ obtenidos con la sonda convencional de 4 electrodos y el TDR (**Figura 5**)

resultaron favorables ($r^2 = 0.986$), si bien la sonda tiende a sobreestimar con respecto al TDR (pendiente de la recta de ajuste σ_{TDR} vs. σ_{4e} menor que 1). Esto implica que las relaciones con la σ_w derivadas para el dispositivo clásico son potencialmente aplicables al nuevo método basado en el TDR.

Se encontró así mismo una buena correlación entre la σ_w y la conductividad eléctrica de la pasta saturada (σ_{pasta}),

$$\sigma_w = 0.0375 + 1.3425 \sigma_{pasta} ; r^2 = 0.88 \quad [18]$$

Esta relación resultaría de interés si se quisieran explorar niveles de humedad del suelo por debajo del límite de extracción de los pelos radiculares descrito anteriormente.

Tabla 6. Resultados del ajuste de los modelos para la estimación de σ_w .

Modelo	a	b	c	d	σ_s	$r^2_{1:1}$
TDR						
Lineal	1.876	-0.512	--	--	0.112	0.986
No-lineal ¹	--	--	-0.323	0.435	0.094	0.976
Empírico	0.547	0.153	1.023	0.293	--	0.983
Sonda 4e						
Lineal	1.583	-0.430	--	--	0.075	0.968
No-lineal ¹	--	--	-0.093	0.357	0.059	0.966
Empírico	0.581	0.204	0.817	0.225	--	0.974

¹ $\theta_{sol}=0.3455$

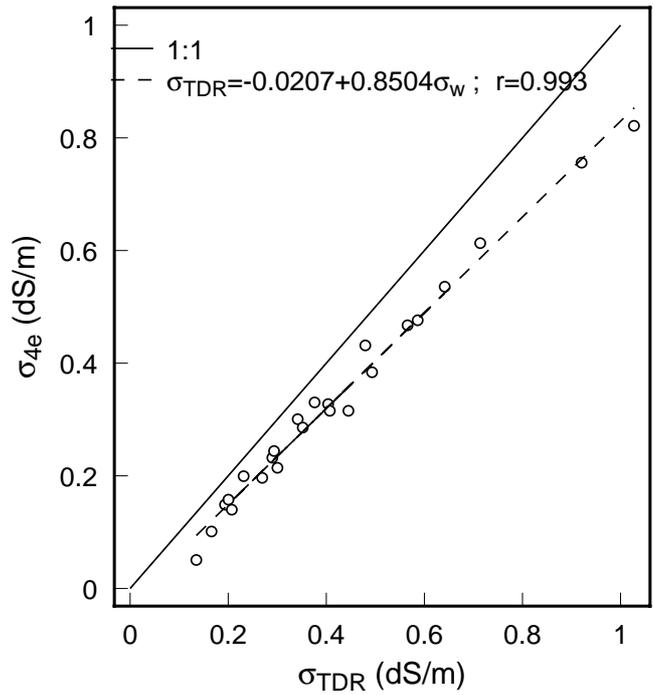


Figura 5. Comparación de instrumentos para la estimación de σ en suelo

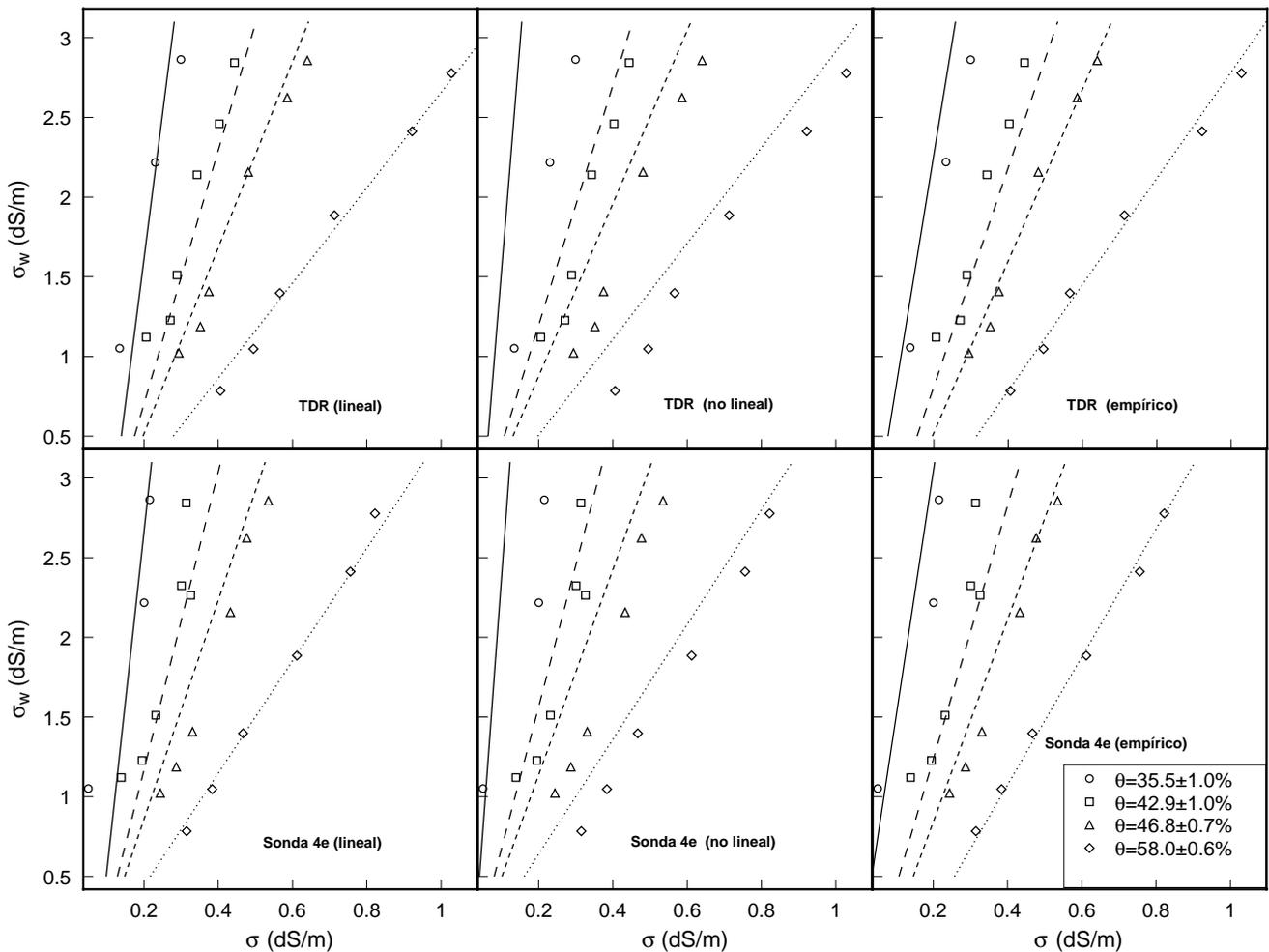


Figura 6. Comparación de los ajustes obtenidos para los distintos tipos de modelos que relacionan la σ con la σ_w

En los resultados del ajuste de los tres modelos de predicción de la σ_w en función de la σ (y **Figura 6**) se observa cómo para el TDR el modelo lineal ofrece los mejores resultados con el menor número de parámetros por lo que no existe justificación en este caso para la utilización de los otros dos modelos, con mayor número de parámetros. Resultados similares fueron encontrados por Neve et al. (2000) trabajando con disoluciones de KNO_3 . En la interpretación de nuestros resultados es importante señalar que la no-linealidad de la relación entre σ_w y σ (para un contenido de humedad fijo) es más patente a valores bajos de salinidad como explican los autores que han propuesto los modelos no lineales. En nuestro estudio el valor menor de σ_w es 0.78 dS/m, con lo que posiblemente no se captura la parte curvilínea de las expresiones.

En el ajuste del modelo de Vogeler y Clothier (1996) la matriz de correlación sugiere que los parámetros del modelo están fuertemente intercorrelacionados (la correlación entre c y d , a y b es 0.98 y entre c y a , d y b es -0.93). Esto podría indicar que el modelo está sobreparametrizado. Fijando el parámetro $c=1$ y volviendo a ajustar los datos se observa como la interdependencia de los parámetros se suaviza (el coeficiente de correlación entre d y a es -0.14, y entre d y b -0.49) al mismo tiempo que el ajuste del modelo no se ve afectado ($r^2_{1:1} = 0.9827$). Si la hipótesis nula es $H_0: c=1$, se obtiene una probabilidad $P=0.86$ con el test F de comparación de varianzas, que indica que no existe una diferencia significativa entre el modelo de cuatro y el de tres parámetros. De hecho si se compara el valor de los parámetros en los dos modelos (**Tabla 7**), se observa que éstos toman valores similares.

Tabla 7. Reducción del número de parámetros en modelo empírico.

Parámetro	3 parámetros	4 parámetros
C	1.000	1.023
D	0.282	0.293
A	0.589	0.547
B	0.173	0.152

3.4 Relación con la concentración del trazador en el suelo

La relación entre la concentración del trazador bromuro [mg/l] y la conductividad eléctrica de la disolución del suelo (dS/m) obtenida es (**Figura 7**)

$$[\text{Br}^-] = -817.51 + 893.33 \sigma_w; \quad r^2=0.96 \quad [19]$$

y en términos de mol/l y S/m queda como,

$$[\text{Br}^-] = -0.0102 + 0.112 \sigma_w; \quad r^2=0.96 \quad [20]$$

Estos resultados están dentro del rango de los obtenidos por otros autores (Vogeler y Clothier, 1996; Vogeler et al., 1997; Neve et al., 2000) para otros trazadores (Cl^- , NO_3^-), con rangos de pendiente de la recta de 0.076 a 0.100 y corte con las ordenadas de -0.0007 a -0.0012.

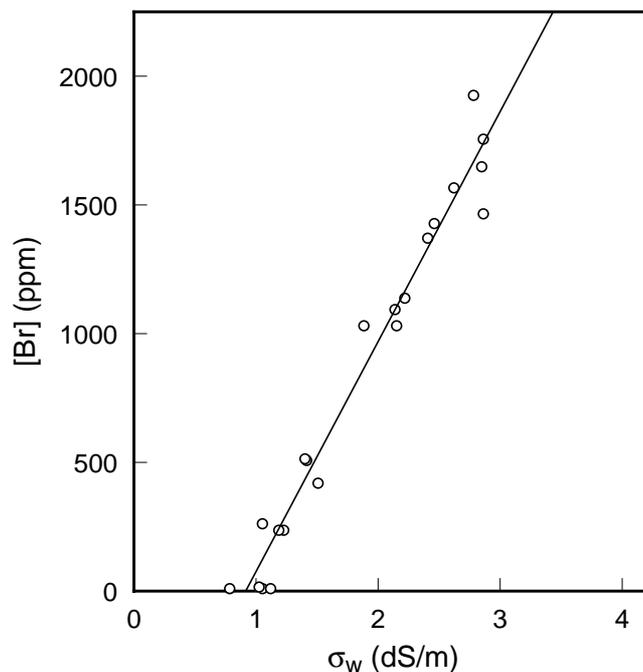


Figura 7. Relación entre concentración del trazador y conductividad eléctrica de la disolución del suelo

4.- Conclusiones

El estudio realizado plantea la obtención simultánea del contenido de humedad y la concentración de un soluto en la disolución del suelo como un proceso en varias fases: i) obtención de la conductividad aparente del suelo (σ) a partir del análisis de la forma de la onda del TDR; ii) estimación de la conductividad eléctrica de la disolución del suelo (σ_w) a partir del valor de σ ; iii) cálculo del valor de la concentración del soluto a partir del valor de σ_w . Para la primera fase se encontró que la relación de Nadler et al. (1991), aunque requiere una calibración previa, es la más adecuada frente a otras 5 relaciones estudiadas. En la segunda fase el modelo de Rhoades et al. (1976), una relación de tipo lineal entre σ y σ_w (para cada contenido de humedad), resultó suficiente frente a otros modelos más complejos. En el último paso se encontró una buena correlación entre los valores de concentración del soluto y los valores de σ_w estimados.

El método se presenta como una potente herramienta en el estudio del flujo de agua y transporte de solutos a través de la zona no saturada.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente con fondos del proyecto del Plan Nacional de I+D INIA SC99-024-C2, EU-COST 622. Los autores quieren agradecer de una manera especial a Martín Morawietz (Universidad de Friburgo) su colaboración en la parte experimental del proyecto.

5.- Bibliografía

- Armas Espinel, S. 2001. Propiedades físicas de los suelos ándicos cultivados. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad de La Laguna, La Laguna.
- Dalton, F. N., W. N. Herkelrath, D. S. Rawlins, y J. D. Rhoades. 1984. Time domain reflectometry: Simultaneous in-situ measurement of soil

- water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* **224**:989-990.
- Giese, K., y R. Tiemann. 1975. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. *Adv. Mol. Relax. Processes* **7**:45-49.
- Heimovaara, T. J., A. G. Focke, W. Bouten, y J. M. Verstraten. 1995. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci Soc Am j. [Madison, Wis.] Soil Science Society of America*. May/June **59**:689-698.
- Kachanoski, R. G., E. Pringle, y A. Ward. 1992. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Sci Soc Am J. Madison, Wis. : The Society*. Jan/Feb **56**:47-52.
- Klute, A., editor. 1986. *Methods of Soil Analysis*, 2nd edition. ASA-SSSA., Madison.
- Mallants, D., y M. Vanclooster. 1994. Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time-domain reflectometry. *J. of Contaminant Hydrology* **17**:91-109.
- Mallants, D., y M. Vanclooster. 1996. Transect study on solute transport in a macroporous soil. *Hydrological Processes* **10**:55-70.
- Mallants, D., M. Vanclooster, M. Meddahi, y J. Feyen. 1994. Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time-domain reflectometry. *Journal of Contaminant Hydrology* **17**:91-109.
- Mallants, D., M. Vanclooster, N. Toride, J. Vanderborght, M. T. Van Genuchten, y J. Feyen. 1996. Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in undisturbed soil. *Soil Sci Soc Am j. [Madison, Wis.] Soil Science Society of America*. May/June **60**:747-754.
- Métodos Oficiales de Análisis. 1986. Secretaría General Técnica, Mo. Agricultura, Pesca y Alimentación (ed.). Tomo III. Madrid.
- Nadler, A. 1997. Discrepancies between soil solute concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. *Australian Journal of Soil Research* **35**:527-537.
- Nadler, A., S. Dasberg, y I. Lapid. 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal* **55**:938-943.
- Nadler, A., y H. Frenkel. 1980. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method. *Soil Science Society of America Journal* **44**:1216-1221.
- Neve, S. d., J. v. d. Steene, R. Hartmann, y G. Hofman. 2000. Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. *Eur j soil sci* **51**:295-304.
- Regalado, C. M., R. Muñoz Carpena, A. R. Socorro, y J. M. Hernández Moreno. 2001. ¿Por qué los suelos volcánicos no siguen la ecuación de Topp? *in* (En esta publicación).
- Rhoades, J. D., N. A. Manteghi, P. J. Shouse, y W. J. Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal* **53**:433-439.
- Rhoades, J. D., P. A. C. Raats, y R. J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* **40**:651-655.
- Rhoades, J. D., y J. V. Schilfgaard. 1976. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Science Society of America Journal* **40**:647-651.
- Topp, G. C., y J. L. Davis. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* **16**:574-582.
- Topp, G. C., M. Yanuka, W. D. Zebchuk, y S. Zegelin. 1988. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resources Research* **24**:945-952.
- Vogeler, I., y B. E. Clothier. 1996. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. *Soil Science Society of America Journal* **60**:5-12.
- Vogeler, I., B. E. Clothier, y S. R. Green. 1997. TDR estimation of the resident concentration of electrolyte in the soil solution. *Australian Journal of Soil Research* **35**:515-526.
- Vogeler, I., C. Duwig, B. E. Clothier, y S. R. Green. 2000. A simple approach to determine reactive solute transport using time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* **64**:12-18.
- Ward, A. L., R. G. Kachanoski, y D. E. Elrick. 1994. Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* **58**:1031-1039.
- Yanuka, M., G. C. Topp, S. Zegelin, y W. D. Zebchuk. 1988. Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: Theoretical considerations for applications to soil and water. *Water Resources Research* **24**:939-944.
- Zegelin, S., I. White, y D. R. Jenkins. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research* **25**:2367-2376.