

CARACTERIZACIÓN DE SENSORES ELECTROMAGNÉTICOS DE HUMEDAD DE SUELO CON FLUIDOS ESTÁNDAR DE PERMITIVIDAD CONOCIDA

Carlos M. Regalado^{1*}, Axel Ritter¹ y Omar García²

1: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)
Dep. Suelos y Riegos
Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife
e-mail: cregalad@icia.es, aritter@icia.es, web: <http://www.icia.es>

2: Estudiante de ETSIA
Universidad de La Laguna
Ctra. Geneto 2, La Laguna
e-mail: omargate@hotmail.com

Palabras clave: Calibración de sensores, capacitancia, impedancia, salinidad, TDR-Trase, TRIME.

RESUMEN. Se estudió el comportamiento dieléctrico de sensores electromagnéticos (EM) de tipo capacitivo (ECHO-TE, EC-5, EC-10 y EC-20), TDR (Trase, TRIME-P2 y TRIME-EZ) e impedancia (WET Sensor y ML2x), en medios líquidos estándar. Se derivaron ecuaciones de calibración que permiten relacionar la señal de los nueve sensores EM estudiados con la permitividad dieléctrica del medio (ϵ). En general la respuesta dieléctrica, en el rango $1 \leq \epsilon \leq 68$, de todos los sensores investigados fue correcta en condiciones dieléctricas equivalentes a las de un suelo no salino con textura arenosa. Cuando aparecen condiciones de relajación en el medio, tales como las que podrían tener lugar en suelos orgánicos o arcillosos, el WET Sensor y las sondas de capacitancia EC-10 y EC-20 exhiben un mejor comportamiento que el resto de sensores EM. Sin embargo, en condiciones salinas, las sondas EC-10 y EC-20 se muestran muy afectadas por la conductividad eléctrica del medio, σ , sobreestimando ϵ incluso para $\sigma \leq 0,5 \text{ dS m}^{-1}$. Para conductividades eléctricas moderadas $\sigma \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$, sólo el TDR Trase y el WET Sensor presentan un comportamiento dieléctrico aceptable. Ninguno de los sensores EM estudiados es fiable para todo el intervalo de conductividad investigado $0 \leq \sigma \leq 4 \text{ dS m}^{-1}$.

ABSTRACT. We investigated the dielectric behaviour of capacitance (ECHO-TE, EC-5, EC-10 and EC-20), TDR (Trase, TRIME-P2 and TRIME-EZ) and impedance (WET Sensor and ML2x) electromagnetic sensors (EM), in standard liquid media. We derived calibration equations which relate signal of the nine EM sensors studied with the dielectric permittivity of the media (ϵ). The dielectric response, within the range $1 \leq \epsilon \leq 68$, of all investigated sensors was satisfactory under dielectric conditions equivalent to those of a non-saline soil of sandy texture. When relaxing conditions show up, such as those that may take place in a organic or clayey soil, WET Sensor and the EC-10 and EC-20 capacitance probes exhibit a better response than the remaining EM sensors. However, in saline conditions, EC-10 and EC-20 probes are greatly affected by the electric conductivity of the media, σ , overestimating ϵ even for $\sigma \leq 0,5 \text{ dS m}^{-1}$. For moderate electrical conductivities $\sigma \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$, only the TDR Trase and the WET Sensor show an acceptable dielectric behaviour. None of the studied EM sensors is reliable for the whole conductivity interval investigated $0 \leq \sigma \leq 4 \text{ dS m}^{-1}$.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de sensores electromagnéticos (EM) en la investigación de procesos de flujo en la zona no saturada o para un uso más eficiente del agua de riego, plantea la necesidad de establecer estándares que

permitan determinar su respuesta con fiabilidad. Aprovechando la marcada diferencia en permitividad dieléctrica, ϵ (-), entre el agua ($\epsilon \approx 80$) y las otras fases presentes en el suelo: aire ($\epsilon \approx 1$) y partículas minerales ($\epsilon \approx 2-15$), se puede estimar el contenido de humedad de un suelo, θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), a partir de la relación existente entre ϵ y θ . Un ejemplo de relación ϵ - θ , de aplicación “universal”, es la ecuación de Topp (Topp et al., 1980):

$$\theta = -5,37 \cdot 10^{-2} + 2,32 \cdot 10^{-2} \epsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 - 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3 \quad (1)$$

responsable en parte del uso extendido que han tenido los sensores EM en instrumentación de la ZNS.

Los sensores EM determinan la ϵ de un medio poroso (in)saturado a partir de la medida de distintos principios físicos: tiempo de tránsito, impedancia, capacitancia, etc. Así por ejemplo, las técnicas de TDR y TDT (de las siglas inglesas *Time Domain Reflectometry* y *Time Domain Transmission*) estiman ϵ a partir de la relación que existe entre ésta y el tiempo de tránsito, t_s (s), de una onda electromagnética que se desplaza entre las varillas de longitud L (m) de una sonda insertada en un medio poroso, tal que (Heimovaara y Bouten, 1990):

$$\epsilon = (t_s c)^2 / (2L)^2 \quad (2)$$

En la ecuación (2), c es la velocidad de la luz en el vacío (m/s); el término $2L$ hace referencia al recorrido de ida y vuelta, en el caso del TDR (no así para el TDT), que realiza la onda electromagnética a lo largo de las varillas. Dentro de los métodos TDR cabe discutir el sistema TRIME (Imko GmbH, Ettlingen, Alemania) que lleva a cabo un tratamiento particular de la onda TDR no discutido frecuentemente, y que se diferencia de los sistemas TDR clásicos. El sistema TRIME mide el tiempo de tránsito de un pulso, t_1 (ps), relativo a un tiempo de referencia. Los diferentes modelos de sondas TRIME (P2, EZ, T3, etc.) se caracterizan por distintas relaciones t_1 *versus* contenido de agua θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para escalar la señal de los distintos tipos de sondas TRIME al mismo rango dinámico de t_p (no así de t_1), se define un tiempo normalizado o “pseudo tiempo de tránsito” t_p (-), linealmente relacionado con t_1 tal que

$$t_p = (t_1 + A) / D \quad (3)$$

donde A representa una traslación hacia el cero y D es una medida de la sensibilidad de la sonda. La estimación de θ se realiza entonces a partir de una calibración específica que toma la siguiente forma (Stacheder, 1996):

$$\theta = C_0 + C_1 t_p + C_2 t_p^2 + C_3 t_p^3 + C_4 t_p^4 + C_5 t_p^5; \quad 0 < t_p < 900 \quad (4)$$

siendo C_i parámetros específicos determinados de forma empírica para cada tipo de sonda (ver Figura 1 en Regalado et al., 2006). Regalado et al. (2006) propusieron además una relación logarítmica entre ϵ y t_p para sondas TRIME-P2 y T3 de la forma ($C_{eff}=0,90$; $RMSE=9,5$):

$$\ln(\epsilon) = 0,00478 t_p + 0,34928; \quad 100 < t_p < 900 \quad (5)$$

Por otro lado, los sensores de impedancia determinan la diferencia de amplitud de voltaje como consecuencia de cambios de impedancia, Z (Ω), entre la línea de transmisión del sensor y la de las varillas que se encuentran insertadas en el medio, para estimar así el valor de ϵ a partir de (Campbell, 1990):

$$\sqrt{\epsilon} = c \cdot \text{cotanh}^{-1}(Z) / (2\pi L) \quad (6)$$

Por último, los métodos capacitivos, o de capacitancia, consideran el medio suelo-sonda como un condensador, cuya capacitancia, C (F), es proporcional a ϵ (Kelleners et al., 2005):

$$C = g \epsilon \epsilon_0 \quad (7)$$

donde g (m) es un factor geométrico y $\epsilon_0=8,54 \text{ pF m}^{-1}$ corresponde al valor de permitividad del vacío.

La relación obtenida entre ϵ ó θ y la señal proporcionada por un determinado sensor EM se conoce como ecuación de calibración. En general, el fabricante de un sensor EM concreto proporciona ecuaciones θ *versus* señal, o bien ϵ *versus* señal, de aplicación para distintos medios o texturas de suelo. Sin embargo, dado que el suelo es un medio poroso heterogéneo de composición variable y dado que ϵ depende de otras variables tales

como la conductividad eléctrica del medio (Campbell, 2002; Seyfried y Murdock, 2004), o la frecuencia de la onda EM, f_e (kHz) (Kelleners et al., 2005), resulta aconsejable establecer ecuaciones de calibración *ad hoc*, especialmente cuando se demanda cierta precisión en la estimación de θ . Esto conlleva la dificultad de hacer luego extensibles ecuaciones de calibración establecidas para un suelo concreto a otros de similares características, dadas las incertidumbres que se generan como consecuencia de la propia variabilidad intrínseca del medio suelo, la salinidad y/o composición del mismo, o de la inserción de la sonda y alteración de la muestra. Es por ello que Jones et al. (2005) proponen derivar tales relaciones ϵ versus señal utilizando, en lugar de medios porosos, fluidos de permitividad conocida que reproduzcan de forma controlada características propias de un suelo, tales como su superficie específica (textura), salinidad y nivel de saturación. Se consigue así reducir la variabilidad de las medidas, disminuyendo la incertidumbre en la relación propuesta de ϵ versus la señal del sensor. Además, con este procedimiento, se pueden estudiar de forma independiente las posibles causas o condiciones propias de un suelo que afectan su comportamiento dieléctrico frente a un sensor EM determinado. Con este objetivo, Jones et al. (2005) utilizaron varios fluidos y disoluciones salinas como estándares para representar suelos con determinadas características o condiciones. Estos medios líquidos con propiedades dieléctricas conocidas se agrupan bajo la denominación de: No Relajantes-No Conductores (NR-NC), No Relajantes-Conductores (NR-C), y Relajantes-No Conductores (R-NC). Así, las propiedades dieléctricas de los fluidos NR-NC se asemejan a las de un suelo arenoso, con lo que permiten estudiar en condiciones controladas la respuesta de un sensor EM determinado en un medio de textura gruesa, donde ϵ es independiente de f_e . Se trata de fluidos no conductivos y cuya frecuencia de relajación (f_r) se encuentra por encima de los 2 GHz, por lo que dicha relajación es previsible que no afecte a la lectura de la mayoría de sensores EM, que generalmente trabajan a frecuencias $f_e < 2$ GHz. Los fluidos R-NC reproducen las propiedades dieléctricas típicas de suelos de textura fina y orgánicos con salinidad baja, permitiendo por tanto evaluar los efectos de relajación dieléctrica. Por último, las soluciones NR-C representan las condiciones de un suelo arenoso salino, y por tanto permiten investigar la dependencia de ϵ con la conductividad eléctrica del medio, para un determinado sensor EM a una frecuencia f_e concreta. Siguiendo lo propuesto por Jones et al. (2005), Blonquist et al. (2005) evaluaron la respuesta de varios sensores de tipo capacitivo, de impedancia y *Time Domain*. En este trabajo se completa el estudio de Blonquist et al. (2005) con sensores EM adicionales. Los objetivos del presente trabajo son por tanto: i) proponer ecuaciones de calibración ϵ versus señal del sensor EM en un medio NR-NC; ii) evaluar la exactitud de dichas ecuaciones de calibración en la estimación de ϵ , frente a las propuestas por el fabricante o autores previos para cada uno de los sensores EM estudiados; iii) determinar la estabilidad de dicha señal cuando otros factores, tales como la relajación o la salinidad del medio, varían (condiciones R-NC y NR-C).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sensores EM

Se evaluó la respuesta de nueve tipos de sensores EM, entre los que se encuentran tanto distintos sistemas TDR (sonda Trase de 3 varillas, TRIME-P2 y TRIME-EZ), como sondas de impedancia (WET Sensor, ML2x) y capacitancia (ECHO-TE, EC-5, EC-10 y EC-20) (Fig. 1). Las principales características de estos sensores y las ecuaciones de calibración propuestas por autores varios o por el fabricante se resumen en la Tabla 1.



Figura 1. Sensores EM. De izquierda a derecha: sonda Trase, TRIME-P2 y EZ, WET Sensor, ML2x, ECHO-TE, EC-5, EC-10 y EC-20.

Tabla 1. Características de los sensores EM y ecuaciones de calibración propuestas por el fabricante o autores previos (“de referencia”).

Técnica (f_c)	Modelo	V_e (cm ³)	L_s (cm)	Señal de lectura	Ecuación de calibración de referencia	Referencia	Fabricante
TDR (2-3 GHz) [§]	Trase de 3 varillas	700	20	ϵ (-)	$\epsilon = (t_s \cdot c)^2 / (2L)^2$	(2)	Heimovaara y Bouten (1990) Soil Moisture Equipment Corp.
TDR (0.6-1.2 GHz)	TRIME-P2 TRIME-EZ	700	16	t_p (-)	$\ln(\epsilon) = 0,00478t_p + 0,34928$; $100 < t_p < 900$	(5)	Regalado et al. (2006) IMKO GmbH
Impedancia (20 MHz)	WET Sensor	125	6,5	ϵ (-)	$\sqrt{\epsilon} = \cotanh^{-1}(Z) \cdot c / (2\pi L)$	(6)	Campbell (1990) Delta-T Devices Ltd.
Impedancia (100 MHz)	ML2x	200	6	S (mV)	$\sqrt{\epsilon} = 4,7 \cdot 10^{-9} S^3 - 6,40 \cdot 10^{-6} S^2 + 6,40 \cdot 10^{-3} S + 1,07$; $1 < \epsilon \leq 40$	(8)	Delta-T Devices Ltd. (1999)
Capacitancia (70 MHz)	ECHO-TE	80	5	S_d (-)	$\epsilon = 7,64 \cdot 10^{-8} S_d^3 - 8,85 \cdot 10^{-5} S_d^2 + 4,85 \cdot 10^{-2} S_d - 10$; $1 < \epsilon \leq 20$	(9)	Decagon Devices Inc. (2006b)
	EC-5	32	5	S (mV)	$\epsilon = f(\theta)$; $\theta = 11,9 \cdot 10^{-4} S - 0,401$	(10)	Decagon Devices Inc. (2006a)
Capacitancia (≈ 10 MHz)	EC-10	93	10	S (mV)	$\epsilon = f(\theta)$; $\theta = 9,36 \cdot 10^{-4} S - 0,376$	(11)	
	EC-20	140	20	S (mV)	$\epsilon = f(\theta)$; $\theta = 6,95 \cdot 10^{-4} S - 0,290$	(12)	

[§]Calculada a partir de $f_c = 0,35/t_r$, donde $t_r = 125-155$ ps (Robinson et al., 2003); V_e es el volumen explorado y L_s la longitud de la sonda; S_d es la señal digital del registrador Em50 (Decagon Devices Inc., Pullman, EEUU); S es la señal del sensor; $f(\theta)$ es la inversa de la ecuación de Topp (1).

2.2. Experimentos con líquidos estándar de permitividad conocida

Como medio NR-NC se utilizaron disoluciones acuosas de 2-iso-propoxietanol (Jones et al., 2005). Además, se utilizaron esferas de vidrio de 500 μm de diámetro (IMKO GmbH) secas ($\theta \approx 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), lo que proporciona un valor de $\epsilon = 3,8$ intermedio entre $\epsilon = 1$ (aire) y $\epsilon = 12,70$ para el 2-iso-propoxietanol puro, necesario para el ajuste de las ecuaciones de calibración en el rango bajo de permitividad. Como medio R-NC se utilizaron los siguientes líquidos: glicerol ($\epsilon = 46,5$; $f_c = 0,127 \text{ GHz}$), 1-propanol ($\epsilon = 22,75$; $f_c = 0,475 \text{ GHz}$), polietilenglicol 300 (Carbowax) ($\epsilon = 16,75$; $f_c = 1,27 \text{ GHz}$) y aceite de ricino ($\epsilon = 3,75$; $f_c = 1,06 \text{ GHz}$). Por último, como medios NR-C se prepararon disoluciones salinas de NaCl y 2-isopropoxietanol al 60% con conductividades eléctricas (σ) de 0, 0,5, 1,1, 2 y 4,1 dS m^{-1} . Para cada uno de estos medios, se realizaron medidas con los sensores EM en contenedores de PVC de dimensiones superiores a las exploradas por las sondas (ver Tabla 1) para evitar la influencia de las paredes del recipiente. Se llevaron a cabo 8 repeticiones para cada sensor EM y medio, presentándose los resultados como la media aritmética de éstas. Las lecturas de ϵ con la sonda Trase se obtuvieron a partir del análisis de la onda TDR que realiza el sistema Trase System I 6050X1 (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, EEUU). Las medidas con el sensor TRIME-P2 se realizaron utilizando como interfase el software SMCAL (IMKO GmbH) con un pulso de excitación proporcionado por el lector TRIME-FM (IMKO GmbH). Para el caso de la sonda TRIME-EZ, ésta se alimentó externamente con una batería de 12 V y las lecturas de t_p se realizaron desde un PC a través del puerto RS232 mediante el software TRIME WinCAL (IMKO GmbH). Para las sondas de impedancia se realizaron lecturas de ϵ (WET Sensor) y de voltaje (ML2x) con el lector HH2 Moisture meter (Delta-T Devices Ltd.). Todas las sondas de capacitancia se leyeron con el registrador Em50 (Decagon Devices Inc.)

gestionado desde la ECH2O utility 1.10 (Decagon Devices Inc.). La sonda EC-5 se sumergió completamente dentro de las soluciones, ya que se observaron diferencias cuando se compararon lecturas en las que el encapsulado se mantiene fuera versus dentro del medio.

2.3. Evaluación de la bondad de ajuste

La bondad del ajuste entre la permitividad de los medios utilizados, ϵ , y la permitividad estimada a partir de la señal de los sensores, ϵ_{est} , se cuantificó mediante el coeficiente de eficiencia ($-\infty \leq Ceff \leq 1$) y la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) definidos, respectivamente, como:

$$Ceff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_{est,i} - \epsilon_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{\epsilon} - \epsilon_i)^2}; \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_{est,i} - \epsilon_i)^2}{N}} \quad (13)$$

donde $\bar{\epsilon}$ es el promedio de los valores de permitividad y N es el número de medidas realizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calibración de los sensores EM en medios No Relajantes-No Conductores (NR-NC)

La Tabla 2 resume las ecuaciones de calibración de los sensores EM estudiados derivadas en medios NR-NC. En el caso del TDR Trase y el WET Sensor se obtienen directamente lecturas de ϵ , por lo que no se proponen ecuaciones de calibración para esos dos sensores EM. En general el ajuste es satisfactorio ($Ceff > 0,94$ y $RMSE \leq 5,3$), salvo para la sonda de impedancia ML2x, donde se utilizó la ecuación propuesta previamente por Blonquist et al. (2005), con $Ceff=0,698$ y $RMSE=7$ en el rango $43 < \epsilon \leq 80$

Tabla 2. Ecuaciones de calibración de los sensores EM derivadas en medios NR-NC.

Modelo	Ecuación de calibración	$Ceff$	$RMSE$
Sonda Trase	-	0,982	2,9
TRIME-P2	$\ln(\epsilon) = 0,4259 + 0,0047 \cdot t_p$	0,993	2,0
TRIME-EZ	$\ln(\epsilon) = 0,4714 + 0,0049 \cdot t_p$	0,995	1,4
WET	-	0,993	1,9
ML2x	$1/\epsilon = (-0,105 + 0,134/\sqrt{S}); \quad 1 \leq \epsilon \leq 43$	0,985	1,4
	$1/\epsilon = 0,0279 - 0,767 \cdot \ln^2(S); \quad 43 < \epsilon \leq 80$	0,698	7,0
ECHO-TE	$1/\epsilon = 1,3281 - 0,0032 \cdot S_d + 2,6741 \cdot 10^{-6} \cdot S_d^2 - 7,6082 \cdot 10^{-10} \cdot S_d^3$	0,947	5,3
EC-5	$\ln(\epsilon) = -11,5075 + 54,0203 \cdot S - 70,4199 \cdot S^2 + 32,3594 \cdot S^3$	0,991	2,2
EC-10	$1/\epsilon = -0,0455 + 0,0589/S^2$	0,996	1,4
EC-20	$1/\epsilon = -0,2581 + 0,0607 \cdot S + 0,2331/S$	0,999	0,7

3.2. Respuesta de los sensores EM en medios No Relajantes-No Conductores (NR-NC) y Relajantes-No Conductores (R-NC)

En la Fig. 2 se presenta, para cada sensor EM, la comparación entre los valores de ϵ frente a ϵ_{est} (usando las ecuaciones de calibración derivadas en medios NR-NC, Tabla 2) para condiciones tanto NR-NC como R-NC. Se incluye también ϵ obtenida a partir de las ecuaciones de calibración propuestas por el fabricante o autores previos, denominadas “de referencia” (Tabla 1). En ambos casos la capacidad del sensor para estimar el valor de ϵ se cuantifica mediante el $Ceff$ y el $RMSE$ (13), distinguiéndose con un asterisco ($Ceff^*$ y $RMSE^*$) cuando se han calculado con la ecuación de calibración de referencia correspondiente. Los sensores de tipo TDR (Trase, TRIME-P2 y TRIME-EZ) muestran valores de $Ceff \geq 0,846$ y $RMSE \leq 8,6$ (Fig. 2a-c). Aunque el TDR Trase muestra un buen ajuste ($Ceff=0,985$; $RMSE=2,8$) para medios NR-NC (Tabla 2), su fiabilidad empeora al considerar también líquidos R-NC ($Ceff=0,840$; $RMSE=8,6$), y en especial el glicerol ($\epsilon=46,5$; $f_i=0,127$ GHz). De hecho el valor de permitividad del glicerol ($\epsilon=46,5$) aparece como un “outlier” en la Fig. 2 para todos aquellos sensores EM que trabajan a $f \geq 7 \cdot 10^4$ Hz: Trase, TRIME, ML2x, ECHO-TE y EC-5, debido posiblemente a que

miden en un rango próximo a la frecuencia de relajación del glicerol ($f_r=1.27 \cdot 10^5$ Hz). La sonda TRIME-P2 exhibe un buen ajuste tanto cuando se usa la ecuación (5) que relaciona el pseudo tiempo de tránsito t_p versus ε ($C_{eff}^*=0,944$; $RMSE^*=5,3$), como cuando se utiliza una ecuación similar como la obtenida en este trabajo ($C_{eff}=0,951$; $RMSE=4,9$) (Fig. 2b). No ocurre lo mismo sin embargo para la sonda TRIME-EZ, en la que se observa que no se puede aplicar la ecuación (5), propuesta previamente por Regalado et al. (2006) para sondas TRIME-P2 y TRIME-T3, ya que los valores de t_p de salida del sensor son menores respecto a los que presenta la sonda TRIME-P2 para la misma ε ($C_{eff}^*=0,746$; $RMSE^*=11,2$). Se propone por tanto una ecuación alternativa que permite un buen ajuste tanto en condiciones NR-NC como R-NC ($C_{eff}=0,983$; $RMSE=2,9$) (Fig. 2c). En general, las sondas de impedancia (WET Sensor y ML2x) determinan correctamente los valores de ε en ambos medios NR-NC y R-NC. El WET Sensor exhibe un comportamiento satisfactorio próximo a la línea 1:1 ($C_{eff}=0,992$; $RMSE=2,0$) (Fig. 2d).

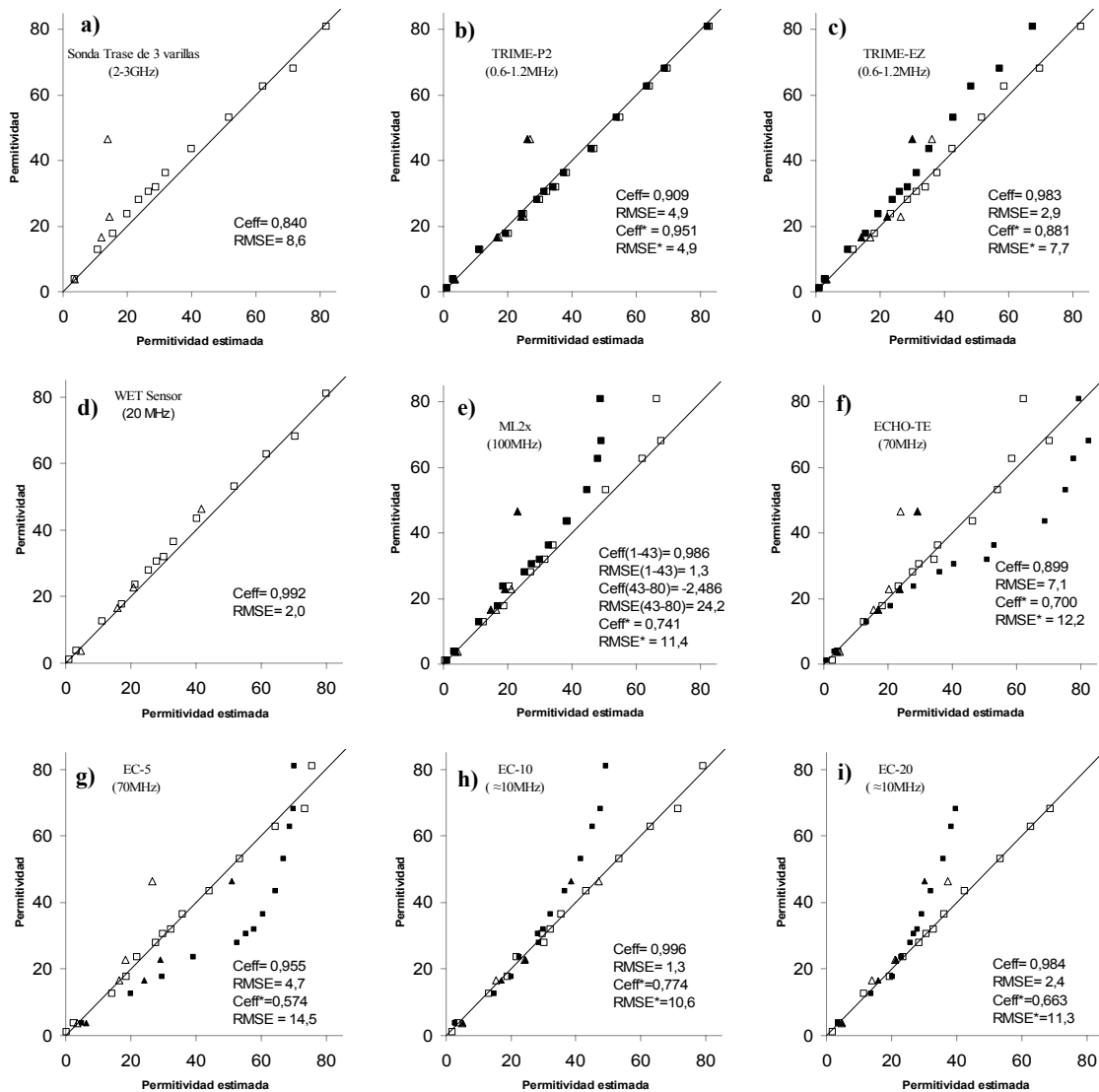


Figura 2. Comparación entre valores de ε frente a ε_{est} para cada sensor EM bajo condiciones NR-NC y R-NC. Se han utilizado las ecuaciones de calibración propuestas por otros autores, o el fabricante y descritas en la Tabla 1 (símbolos rellenos), así como las ecuaciones propuestas con este trabajo e incluidas en la Tabla 2 (símbolos vacíos). El C_{eff} y $RMSE$ para la ecuación de referencia se denota con un asterisco. □: NR-NC; ■: NR-NC*; △: R-NC; ▲: R-NC*; — línea 1:1.

La sonda ML2x estima de forma correcta la permitividad tanto con la ecuación de calibración propuesta previamente por Blonquist et al. (2005) ($C_{eff}=0,986$; $RMSE=1,3$), como con la ecuación propuesta previamente por el fabricante en el rango $1 \leq \epsilon \leq 43$ (Fig. 2e). El glicerol distorsiona la respuesta general de este sensor, lo que repercute en los indicadores de ajuste ($C_{eff}=-2,486$; $RMSE=24,2$; $C_{eff}^*=0,760$; $RMSE^*=11,2$). Por último, los sensores de capacitancia (EC-5, EC-10, EC-20 y ECHO-TE) muestran en general un comportamiento similar al resto de sensores, exceptuando la sonda ECHO-TE, cuya respuesta con la ecuación propuesta por el fabricante se desvía de la línea 1:1 ($C_{eff}^*=0,700$; $RMSE^*=12,2$) para valores de ϵ superiores al rango para el que fue obtenida ($\epsilon > 20$). Es por ello que se propone una ecuación de calibración alternativa válida en el rango de permitividad $1 < \epsilon \leq 68$ ($C_{eff}=0,899$; $RMSE=7,1$) (Fig. 2f). Las sondas EC-5, EC-10 y EC-20 muestran un comportamiento similar (Fig. 2g-i).

3.3. Respuesta de los sensores EM en medios No Relajantes-Conductores (NR-C)

Para estudiar el efecto que produce σ sobre la lectura de permitividad obtenida con cada sensor EM y las ecuaciones de calibración propuestas en la Tabla 2, se tomó como referencia el valor de ϵ correspondiente a una disolución acuosa al 60% de 2-isopropoxietanol ($\epsilon=40$ según Tabla 1 en Jones et al., 2005). La Fig. 3 muestra el resultado de este experimento para cada uno de los sensores EM estudiados. El TDR-Trase no produjo lecturas para $\sigma=4 \text{ dS m}^{-1}$ (como consecuencia de una atenuación de la onda TDR que no permite su análisis), aunque para $\sigma \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$ la respuesta es aceptable ($RMSE=1,37$) mostrando poca afección por la salinidad. La sonda TRIME-P2 exhibe una respuesta relativamente lineal en todo el intervalo de σ estudiado ($RMSE=8,71$). No ocurre así con la sonda TRIME-EZ que muestra una sobrestimación de ϵ clara con respecto al valor de referencia $\epsilon=40$, incluso para $\sigma < 1 \text{ dS m}^{-1}$, lo que resulta incoherente con el rango aplicable de esta sonda según el fabricante ($0 \leq \sigma \leq 10 \text{ dS m}^{-1}$). Al ser esta desviación de tipo lineal, sería sencillo la corrección de las lecturas de ϵ con la TRIME-EZ en medios salinos para incluir el efecto de σ sobre ϵ .

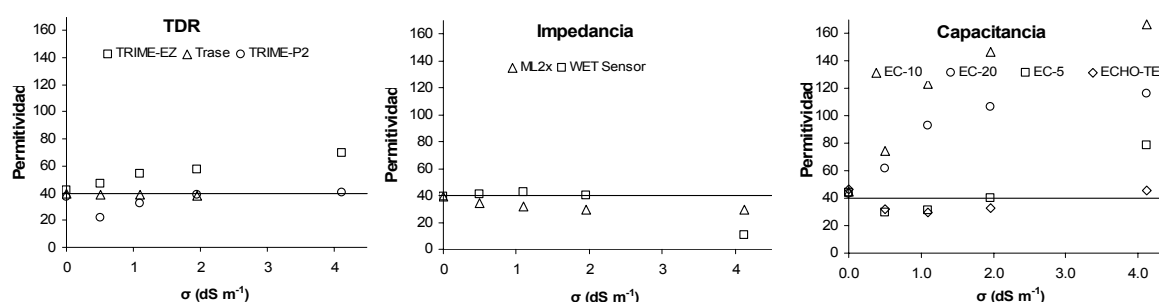


Figura 3. Respuesta de los sensores EM en medios salinos (NR-C).

En el caso de los sensores de impedancia, ambos se vieron afectados por valores altos de salinidad, alrededor de $\sigma=4 \text{ dS m}^{-1}$ ($RMSE=13,02$ para el WET Sensor y $RMSE=7,94$ para la sonda ML2x). Por debajo de $\sigma \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$ las medidas con el WET Sensor se mantienen relativamente constantes. Sin embargo la sonda ML2x se ve afectada por la salinidad en todo el rango de σ . Por último, los sensores de capacitancia, muestran disparidad en su comportamiento. Las sondas EC-10 ($RMSE=84,30$) y EC-20 ($RMSE=52,09$) se vieron muy afectadas por σ . Este hecho es previsible, dado que dichos sensores EM trabajan a frecuencias f_e bajas, del orden de 10 MHz, donde la ϵ se ve muy afectada por f_e . No obstante, estos sensores presentan una respuesta monótonica frente a σ lo que en principio permitiría una corrección sencilla del efecto de la salinidad sobre la lectura de la EC-10 y EC-20. Por el contrario los sensores ECHO-TE ($RMSE=7,61$) y EC-5 ($RMSE=18,29$), que trabajan a $f_e=70 \text{ MHz}$, se ven menos afectados por la salinidad para $\sigma \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$, aunque sobrestiman ϵ para $\sigma=4 \text{ dS m}^{-1}$.

4. CONCLUSIONES

Siguiendo la metodología propuesta por Jones et al. (2005), se evaluó la respuesta dieléctrica de nueve sensores

EM en líquidos estándar que simulan determinadas características o condiciones de un suelo tales como superficie específica (textura), salinidad y nivel de saturación. Se derivaron ecuaciones de calibración para cada uno de los sensores EM que permiten establecer relaciones entre permitividad ($1 \leq \epsilon \leq 68$) y la señal del sensor en un medio NR-NC y se compararon con las propuestas por el fabricante u otros autores previos. Dichas ecuaciones se obtuvieron en condiciones reproducibles y mismo rango de permitividad para todos los sensores EM, lo que facilita que sus respuestas sean comparables. En general, todos los sensores estudiados se comportaron correctamente en condiciones equivalentes a las de un suelo no salino con textura arenosa, es decir en un medio NR-NC. Dado que los nueve sensores estudiados son fiables en todo el rango de humedad, su idoneidad para una aplicación concreta debe decidirse en función de otros criterios particulares: volumen explorado, robustez de las sondas, posibilidad de automatización de las lecturas, versatilidad del registro de la señal, coste, etc. Cuando se manifiestan condiciones de relajación en el medio, tales como las que podrían aparecer en suelos arcillosos, los sensores que trabajan a frecuencias $f_e \leq 20$ MHz (WET Sensor y sondas de capacitancia EC-10 y EC-20) exhiben un mejor comportamiento que el resto de sensores EM. Como contrapunto, son precisamente las sondas EC-10 y EC-20, con frecuencias $f_e \approx 10$ MHz, las que se muestran más afectadas por la salinidad en un medio NR-C, sobreestimando ϵ incluso para salinidades bajas $\sigma \leq 0,5$ dS m⁻¹. La posibilidad de corrección de la señal teniendo en cuenta σ es, sin embargo, una opción potencial que debe ser explorada. Para conductividades eléctricas $\sigma \leq 2$ dS m⁻¹, sólo el TDR-Trase ($f_e = 2-3$ GHz) y el WET Sensor ($f_e = 20$ MHz) muestran un comportamiento aceptable. Ninguno de los sensores estudiados es fiable en todo el intervalo de conductividad investigado $0 \leq \sigma \leq 4$ dS m⁻¹. Desde un punto de vista práctico y dado su buen comportamiento en el rango de permitividad $1 < \epsilon \leq 68$, tanto en medios NR-NC como R-NC, bajo coste, posibilidad de registro y automatización de lecturas con registradores económicos, las sondas de capacitancia EC resultan un candidato óptimo a considerar en estudios de la ZNS y control del riego. Contando con lecturas de apoyo de la conductividad eléctrica de la solución del suelo y la correspondiente corrección de $\epsilon = f(\sigma)$, las sondas EC-10 y EC-20 podrían resultar también útiles en suelos y sustratos con salinidad moderada/alta.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación RTA2005-205. A. Ritter agradece la cofinanciación procedente del Fondo Social Europeo.

REFERENCIAS

- Blonquist, J.M. Jr., S.B. Jones y D.A. Robinson, 2005. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part2. Evaluation of seven sensing systems. *Vadose Zone J.* 4, 1059-1069.
- Campbell, J.E., 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 332-341.
- Campbell, J.E., 2002. Salinity effects in capacitive soil moisture measurement. 12 p. En I.C. Paltineau (ed.) *Transactions first international symposium on soil water measurement using capacitance and impedance*, volume 1. Baltimore, EEUU.
- Decagon Devices Inc., 2006a. ECH2O Soil moisture sensor operator's manual version 5. Decagon Devices Inc., Pullman, EEUU.
- Decagon Devices Inc., 2006b. ECH2O TE. Water content, EC and temperature sensor operator's manual version 2. Decagon Devices Inc., Pullman, EEUU.
- Delta-T Devices Ltd., 1999. Theta probe soil moisture sensor. User manual ML2x-UM-1.21. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, Reino Unido.
- Jones, S.B., J.M. Blonquist Jr., D.A. Robinson, V.P. Rasmussen y D. Or, 2005. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part1. Methodology. *Vadose Zone J.* 4, 1048-1058.
- Kelleners, T.J., D.A. Robinson, P.J. Shouse, J.E. Ayars y T.H. Skaggs, 2005. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 67-76.
- Regalado, C.M., A. Ritter y R. Becker, 2006. Comments on "Monitoring soil water content profiles with a commercial TDR system: Comparative field tests and laboratory calibration". *Vadose Zone J.* 5, 1067-1068.
- Robinson, D.A., S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or y S.P. Friedman, 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2, 444-475.
- Seyfried, M.S. y M.D. Murdock, 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 394-403.
- Stacheder, M., 1996. Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Tesis Docotoral Schriftenreihe angewandte Geologie, Karlsruhe, Alemania.
- Soil Moisture Equipment Corp., 2000. Trase System I 6050X1 operating instructions. Soil Moisture, Santa Bárbara, EEUU.
- Topp, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574-582.