

Investigación

Self Balance Impedance Bridge, un método alternativo al TDR para la determinación de la humedad edáfica

La determinación del contenido de agua en el suelo o cualquier otro sustrato es de gran importancia en muchas aplicaciones científicas e industriales tales como la agricultura, medio ambiente, construcción, industria alimentaria, ecología, hidrología y meteorología, entre otras. Con el objeto de conocer los procesos de humectación-deseccación en relación con otros parámetros geo-ecológicos tales como presencia-ausencia de piedras superficiales, vegetación anual y/o perenne, etc. se ha desarrollado y patentado un dispositivo que permite medir el contenido volumétrico de agua en el suelo. Este dispositivo debía ser una sonda de fácil instalación, coste moderado y volumen de medida reducido con el fin de obtener una resolución espacial óptima (por ejemplo, medición de humedad en raíces de plantas). Además el sensor debía permitir su utilización en suelos con un alto contenido en sales tales como los oasis de los desiertos o los suelos enarenados de cultivos bajo plástico. Presentamos un método alternativo al TDR (Time Domain Reflectometry) para la determinación de la humedad volumétrica en el suelo. La técnica del Self Balance Impedance Bridge (SBIB) permite separar parte real e imaginaria de la constante dieléctrica para la determinación de la humedad volumétrica y conductividad eléctrica, respectivamente. De esta manera es posible su utilización en suelos muy salinos donde el TDR suele acarrear problemas. Presenta otras ventajas adicionales tales como la corrección de la medida de humedad frente a la temperatura del suelo y un coste reducido.

Héctor Magán, Miguel Ángel Domene, Ramón Ordiales y Sebastián Vidal

Departamento de Instrumentación, Estación Experimental de Zonas Áridas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Almería.

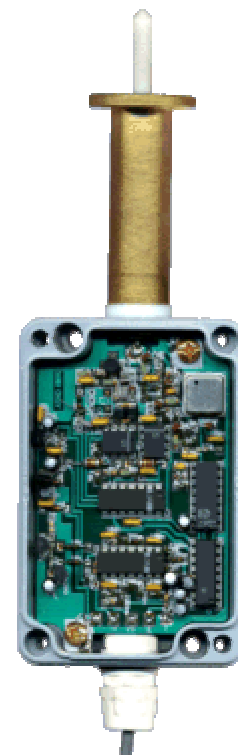


Foto 1: Aspecto general de un SBIB donde se puede apreciar su reducido tamaño.

Fundamentos teóricos

La constante dieléctrica global de un material está determinada por el conjunto de constantes dieléctricas de cada uno de sus componentes a través de la ecuación de Hasted (1973):

$$\epsilon_m = \left[\epsilon_h^{1/3} + p \left(\epsilon_{inc}^{1/3} - \epsilon_h^{1/3} \right) \right]^3 \quad (1)$$

donde ϵ_m es la constante o permitividad dieléctrica global, ϵ_h la del sustrato y ϵ_{inc} la del material añadido en una proporción p . Dado que la constante dieléctrica del suelo es baja (entre 2 y

4) y la del agua es muy alta (≈ 78.5), la constante dieléctrica de un suelo húmedo estará muy condicionada por el contenido de agua de dicho suelo. Conocidas las constantes dieléctricas del material añadido y del sustrato, si somos capaces de medir la constante dieléctrica global ϵ_m , seremos capaces de determinar la proporción del material añadido, agua en nuestro caso.

Entre las diferentes técnicas para la medición de la constante dieléctrica del un medio se encuentran los sensores capacitivos y las sondas *TDR*. Los primeros consisten en un oscilador controlado por la capacidad equivalente que presentan los electrodos introducidos en el medio a medir. La frecuencia del oscilador será proporcional al contenido de agua del suelo. El principal inconveniente que pueden presentar este tipo de dispositivos es la estabilidad del oscilador frente a cambios de temperatura y el efecto parásito de la conductividad del suelo sobre la frecuencia de oscilación. La principal ventaja de este tipo de sensores es su precio moderado.

El funcionamiento de las sondas *TDR* se basa en la relación que hay entre la velocidad de propagación de una onda electromagnética y la constante dieléctrica del medio. Para ello se excita la sonda mediante un pulso de corta duración y se mide el tiempo transcurrido hasta que se recibe el eco de la onda reflejada en el extremo final de la sonda. Conociendo la longitud real de la sonda podremos calcular la velocidad de propagación. El principal inconveniente de esta técnica es la necesidad de resolver tiempos extremadamente cortos lo cual encarece la electrónica del dispositivo. Además su uso está restringido a suelos de baja conductividad eléctrica ya que en suelos con un alto contenido salino la atenuación de la señal es tal que apenas puede distinguirse el pulso reflejado. Esto obliga al uso de sondas excesivamente cortas donde la resolución temporal se hace inalcanzable. Por último, las sondas deben tener una longitud mínima que permita resolver con suficiente precisión los intervalos de tiempo de tránsito, obligando a volúmenes de sonda excesivamente grandes para determinadas aplicaciones.

La constante dieléctrica de un medio puede ser entendida como una magnitud compleja, es decir, tiene una parte real y otra imaginaria. La parte real de la constante dieléctrica está asociada a las propiedades dieléctricas del material. La parte imaginaria está asociada a pérdidas en el material debidas a la conductividad y a fenómenos de relajación tal y como podemos observar en la **Ecuación (1)** del **Cuadro 1** (Hastead 1973).

La técnica del *SBIB* permite separar ambas partes, la real y la imaginaria, de la constante dieléctrica midiendo la impedancia compleja que presentan los dos electrodos que constituyen la sonda. La impedancia de un medio se define como la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético en una onda plana (Simon et al. 1974).

$$Z = \sqrt{\mu / \epsilon^*} \quad (2)$$

Dado que la constante dieléctrica es una magnitud compleja, la impedancia y la admitancia ($Y=1/Z$) también lo serán. Expresando la admitancia en forma compleja

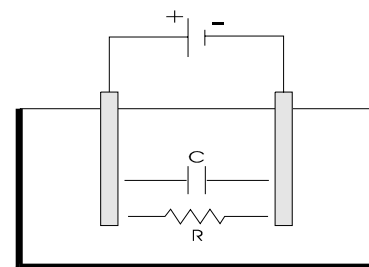


Figura 1: Comportamiento eléctrico de electrodos inmersos en un material.

($Y=a+jb$) obtenemos una expresión equivalente al circuito de la **Figura 1**, que formarían un condensador en paralelo con una resistencia (ecuación 3)

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C \quad (3)$$

La resistencia está asociada a la conductividad del suelo, es decir, a la parte imaginaria de la constante dieléctrica. La capacidad está asociada a las propiedades dieléctricas del material, la parte real de la constante dieléctrica y por tanto a la humedad del suelo. Así, si medimos la impedancia como parte real e imaginaria podemos separar perfectamente las medidas de humedad y conductividad del suelo. Para medir dicha impedancia el SBIB utiliza un puente de impedancias. El funcionamiento de este circuito (**Figura 2**) es equivalente al de una balanza y se utiliza para detectar desequilibrios entre las impedancias R_1 y R_2 . Cuando $R_1=R_2$ se dice que el puente está equilibrado (la señal de desequilibrio del puente V_{12} es 0).

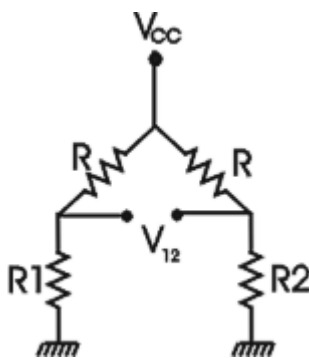


Figura 2. Puente resistivo

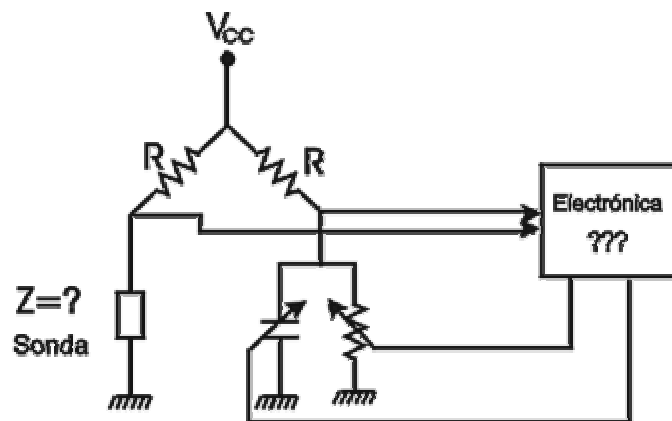


Figura 3. Puente de Impedancias adaptado al SBIB

En la **Figura 3** se observa cómo se utiliza el puente de impedancias en el SBIB para medir la impedancia (Z) de la sonda. Un circuito electrónico se encarga de medir la señal de desequilibrio del puente (V_{12}) y de actuar sobre un condensador y una resistencia variable. Cuando $V_{12}=0$, es decir, el puente está en equilibrio, las señales de control del condensador y resistencia variables nos indican el valor de la conductividad y la capacidad equivalente. La frecuencia de funcionamiento del SBIB es de 50MHz. Esta frecuencia es lo suficientemente alta como para que la parte reactiva y la resistiva de la impedancia tengan valores similares y se alcance el equilibrio del puente con facilidad. Además, es lo suficientemente baja como para no tener pérdidas en el dieléctrico debidas a fenómenos de relajación, correspondiendo la parte resistiva de la constante dieléctrica únicamente a la conductividad del suelo.

Para minimizar efectos parásitos como variaciones con la temperatura u otros efectos como la degradación de los electrodos, el circuito se complementa con un sistema de *chopping* o conexión y desconexión de los electrodos a una frecuencia de 300Hz. De esta manera la señal de desequilibrio del puente es amplificada diferencialmente entre el

estado de sonda conectada y desconectada. Al realizar una medida diferencial las variaciones debidas a derivas térmicas o envejecimiento se minimizan.

El *SBIB* está dotado con un sensor de temperatura para corregir las variaciones de la constante dieléctrica del agua con la temperatura. Cualquier método basado en la medición de la constante dieléctrica debería realizar una corrección con la temperatura si quiere alcanzar precisiones por debajo del 1%. La **Ecuación (4)** nos muestra la dependencia de la constante dieléctrica del agua con la temperatura (Roth et al. 1990).

$$\varepsilon = 78.54 \cdot [1 - 4.579 \cdot 10^{-3} \cdot (t-25) + 1.19 \cdot 10^{-5} \cdot (t-25)^2 - 2.8 \cdot 10^{-8} \cdot (t-25)^3] \quad (4)$$

Resultados de las medidas con sensores *SBIB*

Las medidas realizadas con el *SBIB* se han calibrado frente a las medidas realizadas gravimétricamente (reynolds 1970) y los resultados se han comparado con los obtenidos con la técnica *TDR*. Se han utilizado tres tipos distintos de substratos con el fin de verificar su correcto funcionamiento en diferentes tipos de suelo:

- a. Arena lavada y calibrada, tamizada con 1mm de luz de malla, densidad aparente 1.52 g cm^{-3} y sin contenido en materia orgánica.
- b. Suelo de micaesquitos de textura arenoso-franca de Rambla Honda (Tabernas, Almería), tamizado a 2mm, densidad aparente 1.55 g cm^{-3} , con un contenido pobre en sales (0.7 dS m^{-1}) y bajo contenido en materia orgánica (1.5%).
- c. Suelo margoso de densidad aparente 1.39 g cm^{-3} , con alto contenido en sales (4.2 dS m^{-1}), muy bajo contenido en materia orgánica (0.75%) pero elevado contenido en carbonato (18%).

Se realizaron diferentes ciclos de desecación registrándose al mismo tiempo las lecturas del *SBIB*, la sonda *TDR*, la pérdida de peso por evaporación y la temperatura de la muestra de suelo para corregir la dependencia de la constante dieléctrica del agua con la temperatura. La sonda utilizada para la técnica *TDR* es un modelo de tres electrodos dispuestos paralelamente sobre el mismo plano (Zegelling et al. 1989) y con dimensiones de 4 mm de diámetro, 158 mm de longitud y 50 mm de separación entre electrodos. La **Figura 4** muestra los resultados del *SBIB* y el *TDR* frente a las mediciones realizadas gravimétricamente. En ella se observa un mejor comportamiento en la zona de humedad baja del *SBIB* frente al *TDR*. Ello se debe a que con la disminución de la humedad se produce un aumento de la velocidad de propagación de la señal disminuyendo por tanto el tiempo de propagación y aumentando el error de la medida *TDR*.

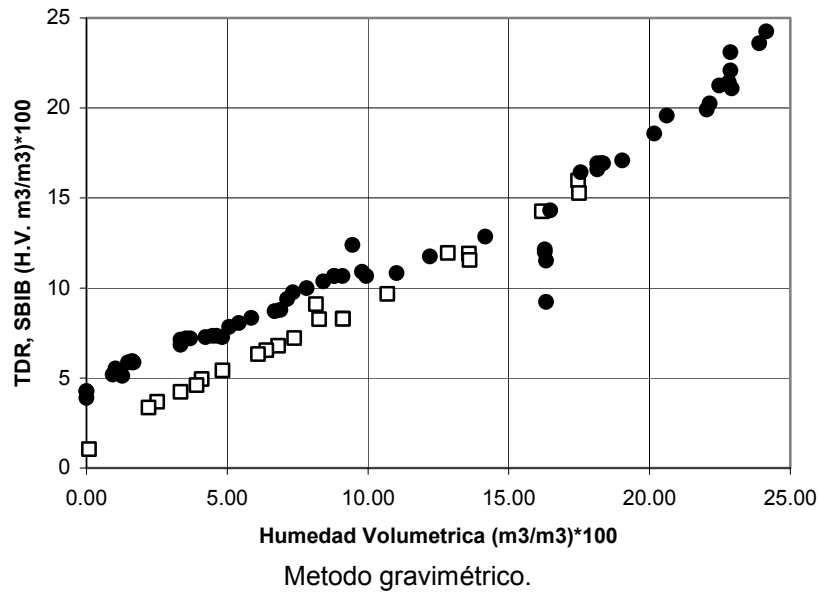


Figura 4. Medidas registradas con los sensores SBIB (□) y TDR (●) de la humedad volumétrica determinada gravimétricamente.

La calibración del *SBIB* se mantiene independientemente del tipo de suelo (**Figura 5**), asegurando un óptimo funcionamiento en cualquier situación porque evita el tener que utilizar diferentes calibraciones para cada tipo de suelo. Además, el método del *SBIB* es capaz de medir humedad independientemente de la conductividad del terreno (**Figura 6**).

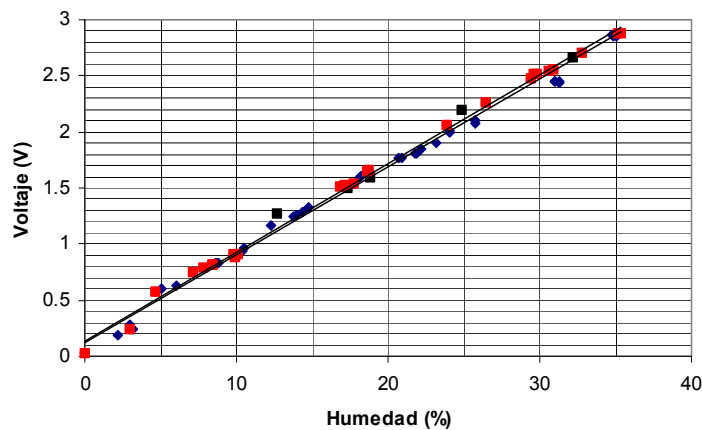


Figura 5. Calibración del SBIB con diferentes tipos de suelo: Arena Lavada (■), suelo arenoso-franco (◆) y suelo franco-limoso (■).

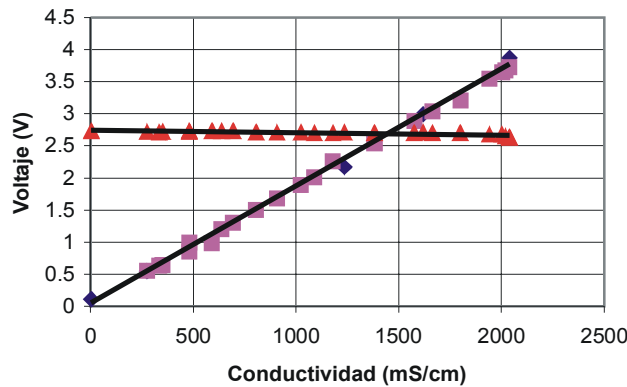


Figura 6. Independencia entre medida de humedad (\blacktriangle) y conductividad (\blacklozenge). Este experimento se realizó con distintas mezclas de líquidos orgánicos, metanol y tricloroetileno, a los que se les variaba la conductividad eléctrica añadiendo sal y manteniendo constante el valor de la cte. dieléctrica. Se puede observar que en todo el intervalo de conductividad la medida de humedad se mantiene prácticamente constante.

Los sensores *SBIB* han sido probados en numerosas situaciones con éxito: Rambla Honda (Tabernas Almería), cultivos bajo plástico y cultivos en el exterior. En las **Figuras 7** y **8** observamos los resultados de varios sensores colocados a distintas profundidades en un cultivo de tomate bajo plástico.

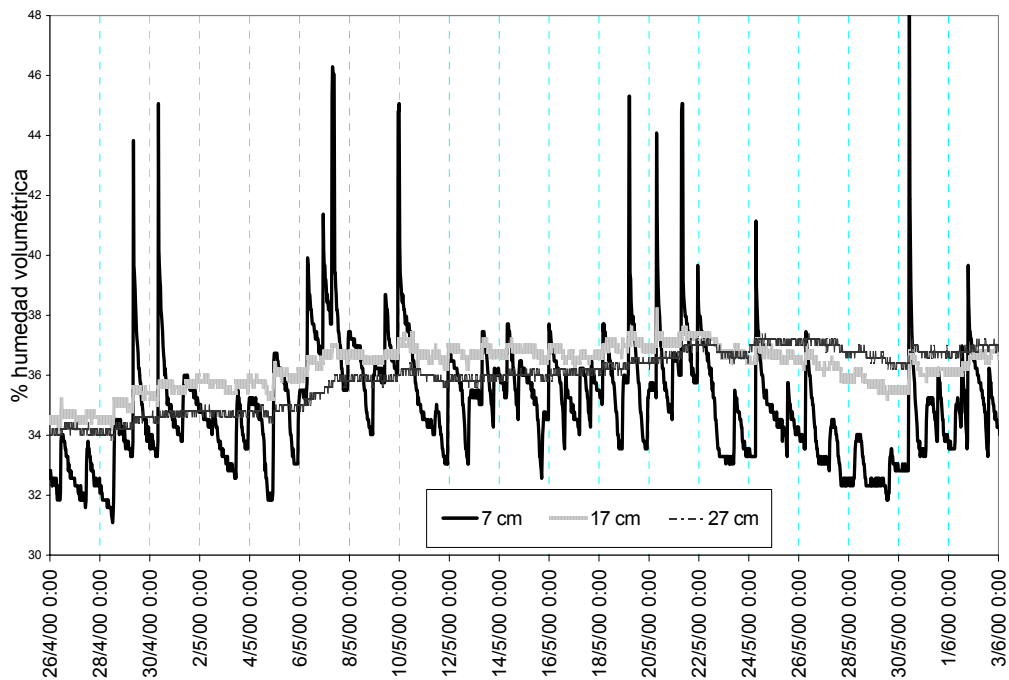


Figura 7. Uso de SBIBs para la medida en continuo de la humedad de una plantación de tomates a varias profundidades.

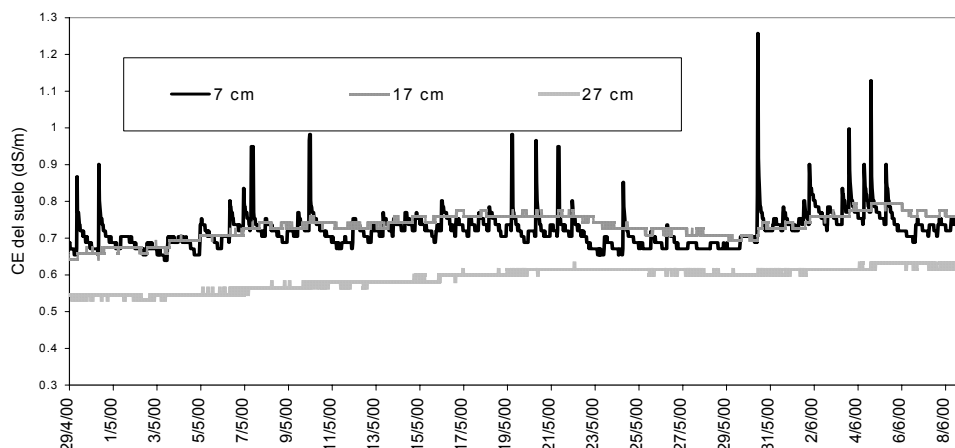


Figura 8. Uso de SBIBs para la medida en continuo de la conductividad eléctrica de una plantación de tomates a varias profundidades.

Conclusiones

Con este nuevo sensor se intenta superar algunas de las deficiencias encontradas en la técnica *TDR*:

- Dificultad de aplicación en suelos con elevada conductividad eléctrica.
- El amplio contenido espectral de las formas de onda utilizadas en *TDR* favorece la aparición de fenómenos de relajación y dispersión del pulso enviado.
- Limitación del tamaño mínimo de la sonda debido a la imposibilidad de resolver intervalos de tiempo de tránsito suficientemente pequeños.
- La necesidad de resolver tiempos excesivamente cortos encarece esta técnica.

El *SBIB* ha sido utilizado en diferentes tipos de suelo y su funcionamiento ha resultado correcto. Frente a los inconvenientes mencionados para el *TDR*, el *SBIB* presenta las siguientes ventajas:

- Independencia entre las medidas de humedad y conductividad.
- No se producen fenómenos de relajación debido a que la frecuencia de funcionamiento es suficientemente baja (50MHz).
- Posibilidad de utilizar sondas de tamaño reducido para aplicaciones en raíces de plantas.

- Corrección de la medida de humedad frente a la temperatura del suelo.
- Coste reducido.

Cuadro 1.- Fracciones real e imaginaria de la constante dieléctrica.

$$\varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) + j\varepsilon''(f) = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j \frac{f}{f_{rel}})^{1-\beta}} \right] - \frac{j\sigma_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (1)$$

donde ε_0 es la constante dieléctrica en el vacío, ε_∞ la constante dieléctrica a frecuencia infinita, ε_s la constante dieléctrica estática o a frecuencia cero, f_{rel} la frecuencia de relajación característica del material, $j = \sqrt{-1}$ y σ_{dc} es la conductividad eléctrica. β es un coeficiente adimensional.

Por otro lado, la **Ecuación (2)** representa el campo eléctrico (E) de una onda electromagnética propagándose a lo largo de la dirección Z .

$$E_x = E \cdot e^{-jkz} \quad (2)$$

donde k es el número de onda y se expresa como $k = 2\pi f \sqrt{\mu\varepsilon^*}$ (Simon et al. 1974)

Haciendo uso de la Ecuación (1) obtenemos que el número de onda se puede expresar como una magnitud compleja $jk = \alpha + j\beta$. Sustituyendo en la Ecuación (2) nos queda:

$$E_x = E \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{j\beta z} \quad (3)$$

donde α es la constante de atenuación de la señal y β la constante de fase que define la velocidad de propagación de la onda.

$$\alpha = \omega \sqrt{(\mu\varepsilon'/2) [\sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} - 1]}$$

$$\beta = \omega \sqrt{(\mu\varepsilon'/2) [\sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} + 1]}$$

En medios sin conductividad y para frecuencias por debajo de la de relajación ($\varepsilon''=0$) la constante de atenuación vale cero y la constante de fase vale

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon'}$$

A medida que aumenta la conductividad, aumenta la constante de atenuación α y la constante de fase β . Un aumento de la cte. de fase provoca una disminución de la velocidad de propagación de la señal. Es por ello que el *TDR* no es aplicable en suelos de alta conductividad eléctrica ya que un aumento de la conductividad no sólo provocaría una atenuación de la señal sino también una disminución de la velocidad de propagación debido al aumento de la constante de fase. Por ello ha sido necesario desarrollar una técnica que permita separar la parte real y la parte imaginaria de la constante dieléctrica.

Bibliografía

Patente 2111444. *Dispositivo para la determinación simultánea del contenido de agua o grado de humedad y conductividad eléctrica en terrenos o materiales de baja constante dieléctrica*. 28 Julio de 1994. Estación Experimental de Zonas Áridas.

Hastead, J.B. 1973. *Aqueous dielectrics*. Chapman and Hall. London.

Roth, K., Schulin, R., Flühler, H. and Attinger, W. 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26: 2267-2273.

Simon R., Whinnery J.R. y Van Duzer T. 1974. *Campos y Ondas. Aplicación a las comunicaciones electrónicas*. Ediciones Pirámide S.A. Cap. 6. Pp. 344-347.

Reynolds, S.G. 1970. The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A study of equipment and methodological problems. *Journal of Hydrology* 11: 258-273.

Zegelling, S.L., White, I. and Jenkins, D.R. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using Time Domain Reflectometry. *Water Resources Res.* 25: 2367 - 2376.