

MEDICION DEL CONTENIDO HIDRICO DEL SUELO POR MEDIO DE LA ATENUACION DE UNA SEÑAL DE MICROONDAS¹

Susana Orden *
Martha Goldberg *
Nilda Arrigo **
Ana Landini *
Claudia Sainato *
Lucila Bottini *

ABSTRACT

Measuring soil water content by means of microwave signal attenuation. The attenuation of a microwave signal was used to measure the moisture of various soils. Samples of three soils with different textures and organic matter contents were used. The attenuation of the transmitted electromagnetic signal was measured for each sample with different values of soil moisture. Linear regression models were used to fit the experimental values obtained, and the 95% prediction interval was estimated for the attenuation. From the comparison between the moisture values obtained with this method and those of the gravimetric method, the advantages of the first one are seen, both in speed and in the possibility to estimate the *in situ* moisture, even if this method has a greater relative error. This method would be useful to operate an automatic control irrigation system, preventing hydric stress when the values of soil moisture reach near field capacity.

INTRODUCCION

La radiación electromagnética en la región de microondas es ampliamente usada con múltiples propósitos. Estos van desde el equipo doméstico utilizado para la cocción de alimentos, hasta el uso terapéutico empleándolas como fuente de calor, o en el diagnóstico médico, que utiliza su propiedad de localizar agua para el monitoreo y la detección del edema de pulmón y del cáncer. En agricultura puede citarse su uso para la determinación del contenido de agua en granos

(Kraszewski, 1991; Kraszewsky y Nelson, 1992; 1993). Se han utilizado también técnicas de microondas en el proceso de producción de azúcar (Doscher y Gahlert, 1994). Las técnicas de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) (Topp *et al.*, 1980; Topp y Davis, 1985; Topp *et al.*, 1988) demostraron ser útiles para determinaciones de humedad y conductividad eléctrica de suelos a campo, en el espacio libre y mediante el uso de líneas de transmisión adecuadas (Zegelin y White, 1989).

En el presente trabajo se utilizan técnicas de transmisión de una señal de microondas para evaluar la humedad del suelo. Una descripción de esta técnica fue realizada por Kraszewski (1991) y Herrmann (1993). Se trata de un método rápido, no destructivo y no contaminante, para determinar el contenido de humedad, que ofrece la ventaja adicional de tener como respuesta una señal eléctrica utilizable para realizar un registro automático y continuo. Estas ventajas, sumadas a la sencillez

1/ Recibido para publicación el 9 de enero de 1995.
* Cátedra de Física. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
** Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

y bajo costo del equipo, se han tenido en cuenta en el diseño de una metodología, para investigar la respuesta de la señal electromagnética en función del contenido hídrico de suelos de distinta textura, especialmente con humedades que van desde la saturación hasta el coeficiente de marchitez permanente.

De acuerdo a lo anteriormente expresado el objetivo de este trabajo fue calibrar la atenuación de la señal de microondas en función del contenido de humedad del suelo, medida esta última con el método gravimétrico, para su posterior utilización en el diseño de un equipo automatizado de riego.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizó como generador de microondas un tubo Klystron de reflejo, de 25 mW de potencia, que trabaja a una frecuencia de 9450 MHz con el cual se obtienen oscilaciones de 3,2 cm de longitud de onda en el vacío. Como dipolo receptor se usó un diodo de germanio. Dos conductores huecos, que se ensanchan en forma de embudos, funcionan como antenas emisora y receptora. Un transformador de red equipada con un estabilizador, suministró la tensión de servicio del emisor.

La salida del receptor, fue amplificada y medida su amplitud con un osciloscopio (Figura 1).

Dado que el suelo húmedo es un medio conductor, entonces la amplitud de la onda electromagnética decrece debido a pérdidas por efecto Joule. En estas condiciones la onda progresiva está descrita por:

$$E_y = E_m e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)} \quad (\text{Expresión 1})$$

donde:

E_y = vector complejo campo eléctrico a una distancia x del emisor y en un instante t

E_m = amplitud máxima del campo eléctrico

α = factor de amortiguamiento

ω = pulsación de la onda

k = número de onda

El factor $e^{-\alpha x}$ representa el amortiguamiento de la amplitud debido a pérdidas por efecto Joule. En el caso en que el medio tenga baja conductividad ($\sigma/\omega\epsilon \ll 1$), tal como es el de un suelo húmedo en la región de microonda resulta:

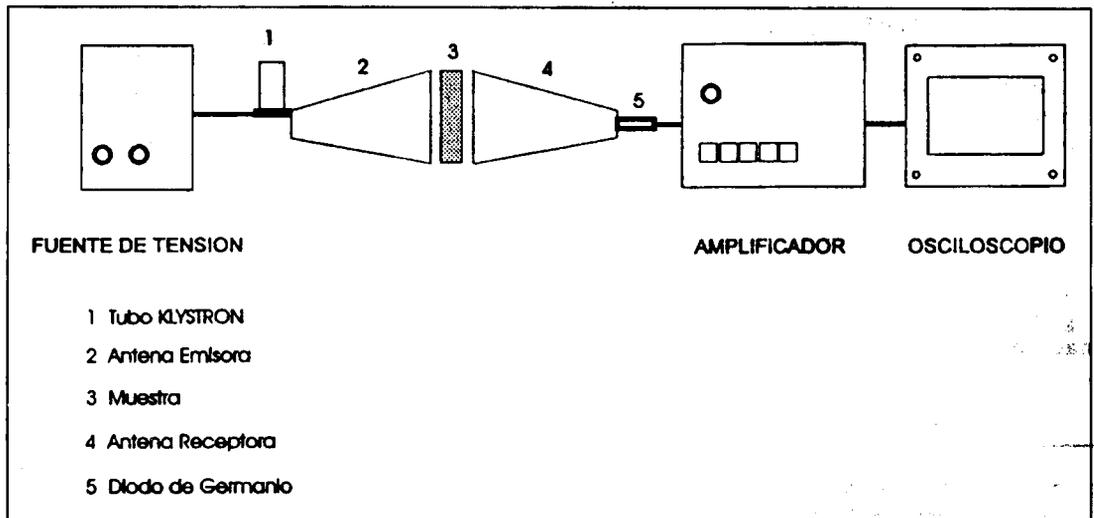


Fig. 1. Esquema del equipo experimental.

$$\alpha = \sigma/2 \cdot (\mu/\epsilon)^{1/2} \quad (\text{Expresión 2})$$

donde:

- α = conductividad eléctrica
- μ = permeabilidad magnética
- ϵ = constante dieléctrica del medio

La alta constante dieléctrica relativa del agua varía sensiblemente la constante dieléctrica del suelo y por consiguiente el factor de amortiguamiento. El valor de la permeabilidad relativa permanece constante y aproximadamente igual a la Expresión 1.

Se define la atenuación (A) de la señal transmitida en decibeles (dB) a través de la expresión:

$$A = -20 \log (V_2/V_1) \quad (\text{Expresión 3})$$

donde:

- V_2 = amplitud del pulso transmitido por el suelo húmedo
- V_1 = amplitud del mismo para el suelo seco.

Se utilizaron muestras de 3 suelos de horizontes superficiales; para la textura se utilizó el método descrito por Klute (1986) y para la materia orgánica el desarrollado por Page *et al.* (1982). Ambas propiedades se determinaron por estar estrechamente relacionadas al contenido hídrico del suelo. Los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características de los suelos utilizados en la calibración.

Suelo	% arcilla	% limo	% arena	% materia orgánica	Clase textural
1	20,70	43,60	35,70	2,98	Franco
2	43,75	33,75	22,50	3,84	Arcilloso
3	20,00	2,50	77,50	0,6	Franco arenoso

Las muestras se colocaron en cajas plásticas de 11 mm de espesor, 100 mm de ancho y 120 mm de alto. Con estas dimensiones se cubre totalmente las bocas de las antenas emisora y receptora.

Para cada suelo se humedeció la muestra hasta valores próximos a la saturación y se consiguieron valores de humedad decrecientes por secado. La humedad de cada muestra de suelo se

calculó por el método gravimétrico el cual es tomado como método de referencia, a partir de la expresión siguiente:

$$H(\%) = 100 m_a/m_s \quad (\text{Expresión 4})$$

donde:

- m_a = masa de agua en el suelo
- m_s = masa de suelo seco; ambas fueron medidas con una balanza analítica de precisión.

En forma simultánea la atenuación se calculó usando la Expresión 3, midiendo con un osciloscopio la amplitud V_2 del pulso transmitido para las muestras húmedas y la amplitud V_1 una vez secas.

Se realizaron para cada suelo 5 series de medidas de aproximadamente 6 valores de humedad cada una, obteniéndose de esta forma una recta de regresión para cada suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan los valores obtenidos para la atenuación (A) de la onda (Expresión 3), en función de la humedad (H%) (Expresión 4), para 3 suelos de textura diferente.

Los datos experimentales se ajustaron por un modelo de regresión lineal. Se calcularon los intervalos de confianza del 95% para el valor medio (estimado) de la atenuación correspondiente a cada valor de humedad. Para un valor dado de humedad se estimó el intervalo de predicción del 95% para la atenuación.

En el Cuadro 2 se exhiben las ecuaciones de las rectas de regresión para cada tipo de suelo y los coeficientes de correlación correspondientes.

Se validó el método experimental haciendo uso de la predicción inversa cuyas rectas de ajuste figuran en el Cuadro 3. Las humedades de muestras elegidas al azar se estimaron a partir de las rectas de ajuste, para valores particulares de la atenuación. Para cada una se estableció el intervalo de confianza del 95 como:

$$H \pm t_{\alpha/2, n-2} S_H$$

donde:

- H = valor del estimador
- t = valor tabulado de la t de Student, calculado para $\alpha = 5\%$ y n-2 grados de libertad
- S_H = Desviación standard del estimador H.

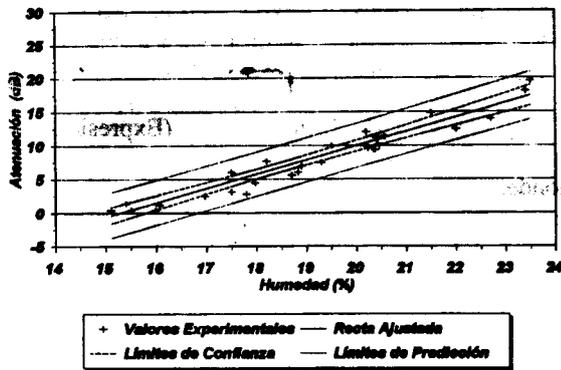


Fig. 2. Atenuación de una señal de microondas en un Suelo Franco.

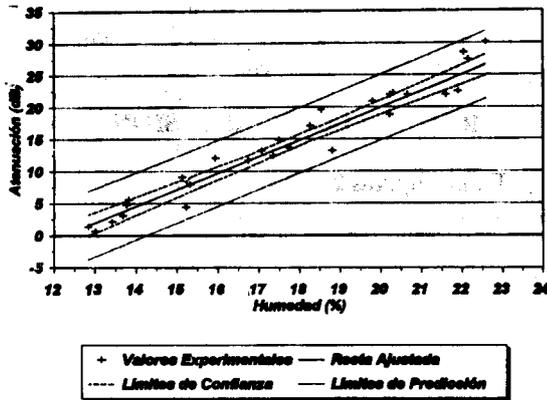


Fig. 3. Atenuación de una señal de microondas en un Suelo Arcilloso.

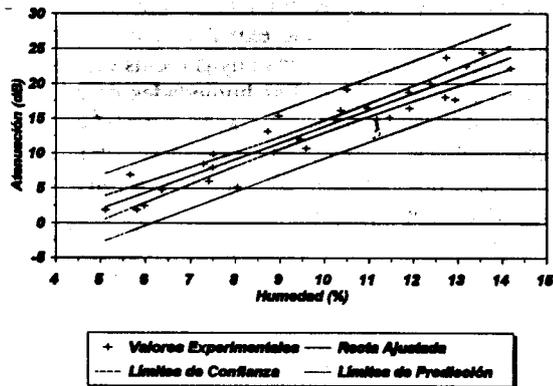


Fig. 4. Atenuación de una señal de microondas en un Suelo Franco-Arcilloso.

Cuadro 2. Rectas de regresión y coeficientes de correlación.

Suelo 1	A=2,1177 H-32,3544	r=0,91
Suelo 2	A=2,5659 H-31,3702	r=0,92
Suelo 3	A=2,4425 H-10,9282	r=0,93

Cuadro 3. Rectas de predicción inversa.

Suelo 1	H=0,4722 A+15,3197
Suelo 2	H=0,3897 A+12,2265
Suelo 3	H=0,4094 A+4,4741

Este último estadígrafo se calculó por la siguiente expresión (Neter *et al.*, 1985):

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum (H_i - \bar{H})^2}{n-2} \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(H - \bar{H})^2}{\sum (H_i - \bar{H})^2} \right]}$$

donde:

- n = número de observaciones
- \bar{H} = valor estimado
- H = valor medio
- b = pendiente de las rectas que aparecen en el Cuadro 2

Los resultados obtenidos figuran en el Cuadro 4. Para esas mismas muestras se calculó la humedad por el método gravimétrico (Expresión 4) y su indeterminación experimental teniendo en cuenta las indeterminaciones en las medidas de la masa de agua en el suelo húmedo y la masa de suelo seco (Cuadro 4). Comparando los valores de humedad para las mismas muestras, obtenidas por ambos métodos (Cuadro 4) se observa que si bien el error relativo en el método gravimétrico es menor que el correspondiente al método de microondas, los valores absolutos de humedad coinciden aproximadamente dentro de los intervalos de indeterminación.

Cuadro 4. Intervalos de indeterminación.

Suelo	Método de microondas	Método gravimétrico
1	H= (19,34 ± 1,70) %	H = (19,51 ± 0,04) %
2	H= (19,54 ± 2,00) %	H = (18,90 ± 0,04) %
3	H= (10,77 ± 1,40) %	H = (11,03 ± 0,04) %

Por lo tanto el método desarrollado resulta eficiente para la implementación de un futuro sistema automático de riego que se habilite cuando los porcentajes de humedad detectados estén cercanos, en los ámbitos de humedad definidos, a la capacidad de campo, para que los cultivos no sufran estrés hídrico.

RESUMEN

Se utilizó una técnica de atenuación de una señal de microondas para la medición del contenido hídrico de distintos tipos de suelos. Se utilizaron muestras de 3 suelos de diferente textura y contenido de materia orgánica. Para cada una se midió la atenuación de la señal electromagnética transmitida para distintos valores de humedad de suelo. Se ajustaron los valores por modelos de regresión lineal, y se calculó el intervalo de confianza de una predicción al 95% para la atenuación. De la comparación entre los valores de humedad obtenidos con este método y con el gravimétrico surge que si bien el primero tiene mayor error relativo, presenta ventajas en cuanto a su rapidez y posibilidad de estimar el contenido hídrico a tiempo real, *in situ*. Esto resultaría útil para implementar un sistema automático de riego que se deshabilite cuando los porcentajes de humedad detectados estén cercanos a la capacidad de campo y así, evitar el estrés hídrico.

AGRADECIMIENTO

A Diego Cosentino, de la Cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía de la UBA por su asistencia en la selección de muestras y la determinación textural. A Ernesto López, Director del Departamento de Física del Instituto Nacional Superior del Profesorado por el préstamo del equipo de microondas utilizado.

LITERATURA CITADA

- DOSCHER, C.; GAHLERT, W. 1994. Microwellen-Resonator-technik-Einneues Prinzip zur Wassergehaltsbestimmung für die Zuckerindustrie. Sonderdruck aus Band 119: 375-378.
- HERRMANN, J. 1993. Construção de um equipamento para medida de umidade do solo a través de técnica de microondas. Disertación presentada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingeniería de San Carlos. USP. Brasil.
- PAGE, A.L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. 1982. Methods of soil analysis. Part. 2. 2 ed. Madison, Wisconsin, ASA. p. 1159.
- KLUTE, A. 1986. Methods of soil analysis. Part I. 2 ed. Agron. Monogr. 9. Madison, Wisconsin, ASA and SSSA.
- KRASZEWSKI, A. 1991. Microwave aquametry-needs and perspectives. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 39(5):828-835.
- KRASZEWSKI, A.; NELSON, S. O. 1992. Wheat moisture content and bulk density determination by microwave parameters measurements. Canadian Agricultural Engineering 34(4):327-335.
- KRASZEWSKI, A.; NELSON, S. O. 1993. Moisture content determination in single peanut kernels with a microwave resonator. Peanut Science 20:27-31.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. 1985. Applied linear statistical models. Irwin, Illinois. 172-174.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement of coaxial transmission lines. Water Resources Research. 16(3):574-582.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. Soil Science Society of America Journal 49:19-24.
- TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W.; ZEGELIN, S. 1988. Determination of electrical conductivity using time-domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. Water Resources Research 24:939-944.
- ZEGELIN, S.J.; WHITE, I. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time-domain reflectometry. Water Resources Research 25(11):2367-2376.