

EVALUACION DE UNA SONDA FDR PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO Y PARA EL CONTROL DE RIEGOS EN OLIVAR

J. Hidalgo¹, M. Pastor² y J.C Hidalgo¹

¹ Servicio de Asesoramiento al Regante. Caja Rural de Jaén.

² Dpto. Suelos y Riegos. CIFA Córdoba. DGIFA. CAP Junta de Andalucía.

RESUMEN. La metodología del balance de agua es la utilizada para la programación de riegos. Para evaluar dicha metodología el método más directo sería determinar la evolución temporal del contenido de agua en el suelo.

Existen diferentes métodos de medida de humedad del suelo y cada uno plantea una serie de ventajas e inconvenientes. En el presente trabajo se ha utilizado una sonda denominada Diviner 2000 (Sentek Pty, Australia). Su funcionamiento se basa en estimar la constante dieléctrica del suelo (k_a) a través de la capacitancia.

Se ha calibrado localmente la sonda para un suelo típico de olivar. También se ha realizado un estudio de la variación espacial del contenido de agua en el suelo y se ha utilizado la sonda para controlar el riego localizado en un ensayo donde se utilizan dos métodos de aplicación de agua.

ABSTRACT. The methodology of the water balance is normally used in the irrigation scheduling. The most direct method to evaluate that methodology would be determinate the temporal evolution of the moisture in soil.

There are different methods to measure the moisture in soil and each one has several advantages and difficulties.

In this work a FDR probe, called Diviner 2000 (Sentek Pty, Australia), was used. Its working is based in the estimation of the dielectric constant of the soil (k_a) through the capacitance.

The probe was locally calibrated for a typical olivar soil. The spatial distribution of moisture in soil was also studied, and the probe was used in order to control the localized high-frequency irrigation in an experiment where two methods of water application were compared.

mayor dificultad radica en elegir los puntos más representativos para ubicar los sensores de medida (Feres, 1997). Como ejemplo podemos citar los resultados de los trabajos de Ferreira et al (1996, 1997) en peral, donde mediante medidas de sonda de neutrones y TDR se evaluaba en un 10% del agua disponible en el suelo, mientras que la transpiración sólo se reducía un 35%, lo que no es fácil de comprender si no pensamos en que la estimación del contenido de agua en el suelo ha sido errónea. Se necesitaría un gran número de medidas en cada parcela para poder aproximar con cierta exactitud el contenido real de agua en el suelo, lo que permitiría realizar el balance real de agua en el suelo.

Existen diferentes métodos de medida de humedad del suelo: gravimetría, sonda de neutrones, sonda TDR y sonda FDR, entre otros. Cada método plantea una serie de ventajas e inconvenientes.

La gravimetría es un método sencillo y muy fiable, sin embargo su mayor inconveniente radica en que se trata de un método destructivo, con lo que no se puede realizar un seguimiento exhaustivo a lo largo del tiempo. Entre los métodos no destructivos los más utilizados son sonda de neutrones y Time Domain Reflectometry (TDR) (Green 1992). La sonda de neutrones permite hacer un seguimiento a lo largo del tiempo con unos muy buenos resultados, aunque exige una calibración local de la sonda.

Otros métodos se basan en la correlación existente entre la constante dieléctrica del medio (k_a) y la humedad del suelo, en campos electromagnéticos con diferentes frecuencias (Smith-Rose, 1933). En los últimos 30 años se han desarrollado dos métodos de medida: TDR y capacitancia basados en esta relación (Hoeskstra y Delaney, 1974; Wobschall, 1978; Topp et al, 1980; Dean et al, 1987; Hook et al, 1992; Watson et al, 1995; Nadler y Lapid, 1996).

Ambos métodos para estimar el contenido de agua en el suelo utilizan la medida de la constante dieléctrica (K_a) del suelo que rodea a los sensores, que es una característica intrínseca de la mezcla suelo-agua-aire. La constante dieléctrica del agua pura (K_w) a 20°C y presión atmosférica es 80.4; para el suelo seco está comprendida entre 3 a 7 y para el aire es igual a 1. La K_w es inversamente proporcional a la temperatura (West, 1980).

Desde el punto de vista electromagnético, un suelo se

1. Introducción

En programación de riegos la metodología basada en el balance de agua es la utilizada tradicionalmente en la mayoría de los cultivos, pero requiere una calibración local. Para evaluar dicha metodología el método más directo sería determinar la evolución temporal del contenido de agua en el suelo, pero ello entraña una gran dificultad.

A la hora de estimar el contenido de agua en el suelo la

caracteriza por 4 componentes: aire, fase sólida, agua no disponible y agua disponible (Hallikainen et al, 1985). Además la presencia de sales en el suelo influye directamente sobre su comportamiento dieléctrico.

La constante dieléctrica del suelo puede ser también estimada a través de la medida de la capacitancia (sistema FDR). El sistema Enviroscan (Sentek PTY, Australia) consiste en sondas multisensores que determinan el contenido de agua en suelo mediante la medida de la capacitancia, donde cada sensor actúa como parte de un capacitor en el cual los dipolos permanentes de las moléculas de agua en un medio dieléctrico se polarizan y alinean en un campo eléctrico. Para contribuir a la constante dieléctrica, los dipolos eléctricos, de cualquier naturaleza, deben responder a la frecuencia del campo eléctrico. La libertad de los dipolos para responder es determinada por las fuerzas locales de unión a nivel molecular, de forma que la respuesta global es resultado de la inercia molecular, las fuerzas de unión y la frecuencia del campo eléctrico. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica y, en consecuencia, la estimación del contenido de agua del suelo (Dean et al, 1987). La mencionada empresa australiana también ha desarrollado una sonda móvil con un único sensor que actúa de idéntica forma (Diviner 2000), y que permite un mayor número de puntos medidos con un coste de inversión mucho más adsequible para el usuario.

El sistema FDR plantea una serie de inconvenientes. El más patente es el escaso volumen de suelo al que se refieren las determinaciones de la capacitancia, lo que obliga a una perfecta y costosa instalación del tubo de acceso a sonda, requiriendo además que en dicha fracción de suelo no haya materiales extraños como piedras o raíces, y que no exista separación entre el tubo y el suelo, ya que la interfase aire influye sobre la calidad de la medida. La existencia de grietas en el suelo también plantea problemas, principalmente en las medidas superficiales.

La sonda FDR es suministrada con una calibración estándar realizada en suelos ligeros de Australia, por lo que el mismo fabricante recomienda realizar una calibración local para cada suelo, puesto que si no se hace los valores obtenidos son relativos y su utilidad se reduce a observar la evolución en el tiempo de la humedad del suelo, pero sin poder cuantificarla.

El presente trabajo se ha planteado para conocer las posibles utilidades de una sonda FDR (modelo Diviner 2000). Los objetivos pretendidos han sido los siguientes: calibración de la sonda FDR (Diviner 2000) para un suelo típico de olivar de la comarca de La Loma (Jaén), en la que se encuentra concentrada una superficie importante del olivar regado en la provincia; estudio de la variación espacial del contenido de agua en el suelo; y control de riego localizado utilizando este tipo de sonda.

2. Material y métodos

La parcela donde se realizó la calibración de la sonda se

encuentra en la finca Pichilín, en el t.m. de Villacarrillo (Jaén). Se trata de un suelo clasificado como Cambisol vértico (FAO/UNESCO, 1999), con una profundidad media de 110 cm. Los contenidos medios en arcilla, limo y arena son 52, 41 y 7% respectivamente, con un contenido en carbonato cálcico del 35%. El suelo es muy uniforme en toda la superficie y la pendiente es prácticamente nula. El suelo soporta un olivar adulto de riego con un marco de plantación de 7 x 7 m y una alta producción. En la parcela se lleva a cabo un ensayo de dosis de riego desde el año 1995, donde desde el año 1999 hay instalados tubos de acceso a sonda Diviner 2000 en una superficie total de una hectárea.

Para realizar la calibración de la sonda Diviner en otoño del año 2000 se instalaron específicamente 13 tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro de acceso en una superficie total de unos 20 m². Los tubos se mantuvieron todo el invierno en campo, con objeto de lograr el contacto íntimo entre el suelo y la pared del tubo, circunstancia que se vio favorecida por las lluvias invernales. Las primeras muestras se tomaron en el mes de abril, con el contenido de agua en el suelo próximo a su capacidad de campo, continuando periódicamente las medidas hasta final del verano (suelo con humedad próxima a PMP), abarcando por tanto las medidas un amplio rango de humedad de suelo.

La calibración se realizó utilizando un procedimiento similar al descrito por el fabricante (Sentek, 1999) y que ha sido utilizado en trabajos del mismo tipo, tomando 3 muestras inalteradas junto al tubo de acceso para cada profundidad. Para cada tubo se controlaron las profundidades de 10, 20 y 30 cm, haciendo medidas con la sonda Diviner 2000 inmediatamente antes de tomar las muestras inalteradas de suelo. Estas se extrajeron utilizando cilindros de acero inoxidable con espesor suficiente como para no deformarse en la toma de muestras. Las dimensiones aproximadas de los cilindros fueron 5 cm de altura media y 5.5 cm de diámetro medio, estando cada uno de ellos perfectamente identificado con sus correspondientes medidas exactas.

Las muestras inalteradas de suelo se introdujeron en un recipiente de vidrio con cierre hermético, trasladándose rápidamente al laboratorio para obtener su peso húmedo. Posteriormente se desecaron en estufa a 105 °C hasta peso constante. Con los valores de peso húmedo y peso seco se obtuvo el valor de humedad gravimétrica de la muestra, que multiplicando por la densidad aparente, obtenida previamente una vez conocido el volumen de suelo muestreado, permitió conocer la humedad volumétrica. Las expresiones de calibración utilizadas por el fabricante expresan la humedad volumétrica en tanto por ciento, por lo que así aparecen reflejados los datos obtenidos en el presente trabajo.

La sonda Diviner 2000 calcula el valor de humedad del suelo en función de una relación existente entre la humedad y la frecuencia normalizada (SF).

$$SF = (F_A - F_S) / (F_A - F_W) \quad (1)$$

donde F_A es el número de cuentas en un tubo de acceso suspendido en el aire, F_W es el número de cuentas en un

tubo de acceso sumergido en agua y F_S en un tubo de acceso instalado en el suelo.

Los valores de F_A y F_W se fijan al comienzo de la vida del aparato y salvo averías o variaciones grandes en las condiciones climáticas (invierno-verano) se mantienen para todas las medidas. Para la sonda utilizada en los experimentos los valores de F_A y F_W fueron respectivamente 163334 y 118992.

Para el estudio de variación espacial del contenido de agua en el suelo se utilizaron los 6 tubos de acceso a sonda instalados en el tratamiento de secano de la misma parcela donde se realizó la calibración de la sonda, cuyas características han sido descritas anteriormente. Se han elegido únicamente los tubos instalados en el tratamiento de secano para eliminar la posible influencia del agua aportada en el riego de los diferentes tratamientos del ensayo. Los tubos fueron instalados en el año 1999, aunque las medidas se contabilizan desde el mes de mayo del 2000, para evitar los posibles errores derivados del mal contacto entre suelo y tubo de acceso a sonda tras la instalación. La ubicación de los tubos es el centro de las calles y la superficie total de la parcela de ensayo es de una hectárea.

Para la evaluación de las posibilidades de la sonda Diviner 2000 para el control del riego localizado se instalaron tubos de acceso a sonda hasta una profundidad de 120 cm. Este estudio se realizó en el año 2002 en la localidad de Linares (Jaén) utilizando un experimento en campo en el que a un olivar adulto de la variedad ‘Picual’ se aplicaron una dosis de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ empleando dos sistemas de riego por goteo: riego superficial (S-15) y riego subterráneo (E-15).

En ambos sistemas se empleó una tubería de 17 mm con gotero integrado de $2.3 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ y distancia entre emisores de 1.0 m. En el sistema de riego superficial (S-15) las tuberías se situaron en la línea de plantación, mientras que en sistema subterráneo (E-15) se instalaron en el centro de las calles a una profundidad de 30 cm. Se empleó un diseño experimental con 3 repeticiones para cada sistema de riego. Se trabajó en un suelo profundo de textura franco-limosa clasificado como Cambisol calcárico según FAO/UNESCO (1999).

Para la estimación del contenido de agua en el suelo se instaló un tubo de acceso a sonda en cada subparcela, perpendicular a la tubería portagoteros a unos 15 cm de distancia del emisor. La profundidad de todos los tubos superó los 120 cm y la sonda efectuó medidas cada 10 cm de profundidad.

3. Resultados

Para la calibración de la sonda se utilizaron 102 muestras inalteradas válidas. La densidad aparente media obtenida fue de $1.286 \pm 0.068 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

En la Fig. 1 se muestra la relación existente entre la frecuencia normalizada (SF) y la humedad volumétrica medida expresada en tanto por ciento, unidades que permiten establecer comparaciones con las calibraciones realizadas por el fabricante.

Los ajustes obtenidos (Fig. 1) son relativamente buenos

para este tipo de trabajos, con coeficientes de determinación R^2 en torno a 0.8, tanto para el ajuste lineal como para el potencial. También es importante destacar que el rango de humedad volumétrica es muy amplio, como solicitan los fabricantes, con valores comprendidos entre 9 y 32%.

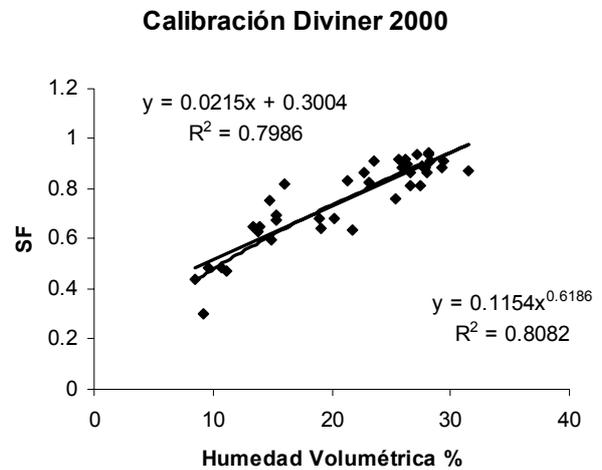


Fig. 1. Resultado de la regresión entre la humedad volumétrica obtenida empleando muestras inalteradas y la SF del sistema de medida Diviner 2000. Se han realizado dos tipos de ajustes estadísticos, uno en forma lineal y otro potencial, mostrándose sus respectivos coeficientes de determinación.

En la Tabla 1 se comparan nuestros resultados de la calibración del sensor Diviner 2000 (Jaén-España) con los valores existentes en otros lugares de Estados Unidos y Australia, indicando porcentaje de arena, limo y arcilla de los suelos con los que se trabajó en cada caso, datos obtenidos de Paltineanu y Starr (1997).

Tabla 2. Comparación en los valores de A, B y C de la exponencial $SF = A \theta_v^B + C$, así como los valores de R^2 y del número de muestras, en los distintos estudios de calibración del sistema de medida FDR, incluyendo los porcentajes de las fracciones de arena, limo y arcilla de los suelos.

Localizac.	Arn (%)	Lim (%)	Arc (%)	A	B	C	r^2	n
Beltsville (USA)	35	56	9	.490	2.167	0	0.992	15
Fresno (USA)	100	0	0	.522	2.046	0	0.932	38
Adelaida (Australia)	82.3	7.7	10.0	.500	2.231	0	0.979	24
Warren y Trangie (Australia)	(1)	(1)	(1)	.0254	1	-0.125 0.251	0.580	-
Jaén (España)	7.0	40.9	52.1	.0215	1	0.30	0.799	10 2

(1) En este trabajo no se aportan datos texturales, aunque los autores definen el suelo como arcilloso con grietas.

(2) Rango de valores para el coeficiente C que aportan los autores en función de la profundidad de medida.

En la Tabla 2 podemos ver que la textura de casi todos los suelos utilizados en la mayoría de las calibraciones es

totalmente diferente a la de nuestras condiciones de trabajo, tratándose de suelos arenosos, situación en la que se obtienen unos coeficientes de determinación muy altos.

En las diferentes calibraciones tan sólo un tipo de suelo puede ser parecido al que nosotros hemos trabajado. Dicho suelo está localizado en Australia, y los autores denominan como arcilloso con grietas y del que no aportan datos texturales. En este caso los coeficientes A y C de la recta de regresión que los autores obtienen son muy parecidos a los obtenidos en nuestras condiciones, pero con un coeficiente de determinación mucho más bajo que el obtenido en nuestro caso. Tampoco aportan los autores el número de muestras empleadas en la calibración de la sonda.

Una vez obtenida la función de calibración el siguiente paso fue comprobar en campo los valores de humedad obtenidos y ver la variabilidad espacial existente entre puntos con condiciones edáficas parecidas.

Durante el año 2000 se tomaron medidas en 21 fechas diferentes a lo largo del año en 6 tubos de acceso ubicados en el tratamiento de secano en la parcela experimental. En la Fig. 2 se representan los valores medios de humedad del suelo junto con sus correspondientes desviaciones típicas, expresados en milímetros, antes y después de la transformación que sufren los valores al aplicarle los coeficientes obtenidos de la calibración. Los valores obtenidos se refieren a la suma de las lecturas de la sonda hasta 100 cm de profundidad. En la línea con trazo continuo se representa la evolución de la humedad media del suelo utilizando los coeficientes predeterminados que posee el software que adjunta por defecto el fabricante de la sonda y en la línea con trazo discontinuo cuando se utilizan los coeficientes obtenidos una vez se ha realizado la calibración del sensor.

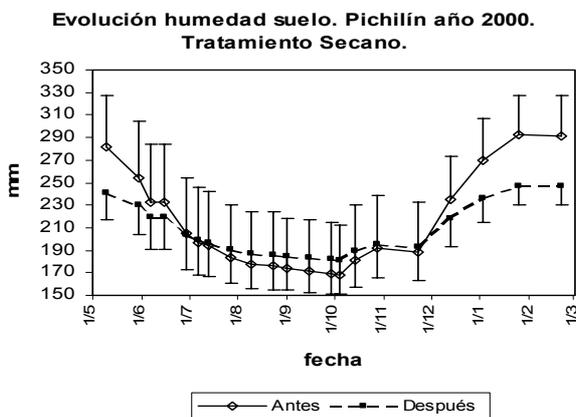


Fig. 2. Evolución a lo largo del año 2000 de la humedad del suelo expresada en mm, para la profundidad de 0-100 cm antes de la calibración (línea continua) y después de la calibración (línea discontinua en el tratamiento de secano en la Finca Pichilín (Villacarrillo, Jaén). Cada uno de los valores representa la media de 6 observaciones. Las barras representan la desviación estándar.

Como se observa en la Fig. 2, existe una gran variabilidad entre las diferentes medidas realizadas en los seis puntos de observación, aunque la variación espacial de la textura que hay en el suelo es escasa (datos no presentados), por tratarse de un suelo muy homogéneo. Aunque en el suelo existen

grietas en verano, no pensamos que en este caso sean éstas las responsables de la elevada variabilidad que hay en las medidas, por lo que las diferencias existentes pueden ser debidas a la instalación de los tubos y al escaso rango de medida de volumen de suelo en que la sonda realiza las medidas.

Se puede ver también que en el rango de bajo contenido de agua en el suelo, los valores obtenidos son muy parecidos cuando se emplean las dos calibraciones (propia vs fabricante). Sin embargo, cuando la humedad del suelo es alta, el valor del contenido de agua en el suelo se reduce de forma apreciable cuando se aplica la calibración local. También se observa que la variabilidad se reduce de forma apreciable cuando se aplica la calibración local de la sonda.

Pensamos igualmente que el número de 6 medidas es totalmente insuficiente para caracterizar el contenido de agua en el suelo a nivel de parcela. Creemos que sería necesario realizar un trabajo más extenso en el que se concluyera con el número de puntos de observación necesarios, especialmente en condiciones de suelo húmedo, situación en la que la variabilidad es máxima.

Según los datos aportados no nos atrevemos a aconsejar la sonda para obtener valores reales de humedad en el suelo, por lo que este instrumento no muestra la fiabilidad suficiente como para realizar balances precisos de agua en el suelo.

Sí que podría ser útil la sonda para el control de riegos (evolución del contenido de agua en el bulbo, volumen de suelo mojado, lugar de máxima extracción por las raíces del cultivo, localización del frente húmedo tras las lluvias, etc). Tratando de evaluar esta hipótesis, en el año 2002 se utilizó la sonda para controlar los niveles de humedad del suelo a diferentes profundidades en el ensayo de Linares en el que se comparan los sistemas de riego superficial y subterráneo.

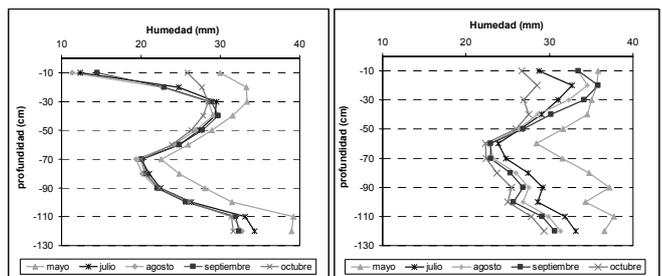


Fig. 3. Evolución temporal de la humedad del suelo en un perfil transversal hasta la profundidad de 120 cm medido con la sonda Diviner 2000 en diferentes épocas del año a una distancia de 15 cm de los goteros para los tratamientos riego superficial (izquierda) y riego subterráneo (derecha) con dosis $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

En la Fig. 3 se comparan los valores de humedad a diferentes profundidades en distintas épocas del año para el tratamiento con riego superficial y para el riego subterráneo, que reciben la misma dosis anual de agua y con idéntica distribución a lo largo de la campaña. Los datos se refieren medidas realizadas los últimos días de cada mes, en la época de riego mayo - octubre del año 2002.

Como podemos ver en la mencionada Fig. 3, la distribución del agua en ambos tratamientos es muy diferente. El punto donde se aporta el agua condiciona la humedad del suelo en profundidad. En el riego superficial (S-15) observamos el mayor contenido de agua a la profundidad de 10 cm, mientras que en el subterráneo (E-15) se sitúa a 30-40 cm coincidiendo con la localización del gotero. Una primera conclusión que se puede obtener de las gráficas es que la evaporación en el riego superficial debe ser mayor que en el subterráneo, impresión que queda avalada por el hecho de que en este último sistema la superficie de suelo se mantiene seca durante el verano (sin lluvias). Ello se ha traducido (Pastor et al, 2003) en una mejora de la eficiencia productiva en riego subterráneo por cada metro cúbico de agua aplicado.

Igualmente existen diferencias entre sistemas de riego en el modo de agotamiento del perfil a lo largo año. En riego subterráneo (Fig. 3-derecha) las extracciones de agua se producen fundamentalmente en la zona humedecida por los goteros (20-60 cm), lo que se intuye por las escasas diferencias del contenido de agua en el suelo existentes a lo largo del año en diferentes profundidades. Tras un descenso de humedad entre final de mayo y final de junio, se mantienen valores parecidos hasta octubre, a pesar de que la dosis aplicada es manifiestamente deficitaria (Pastor et al, 2003). Sin embargo en riego superficial (Fig. 3-izquierda), donde las mayores extracciones se producen en la zona 0-40 cm de profundidad, se produce un paulatino descenso del contenido de agua en el suelo para el periodo mayo-octubre. Este hecho nos sugiere que en riego superficial la evaporación del agua de riego desde la superficie parece reduce las disponibilidades totales de agua para el cultivo, que para cubrir sus necesidades tiene que extraer una mayor cantidad de agua acumulada en el perfil durante la estación lluviosa.

Por último indicar que se observa que en este caso (riego deficitario) no se producen pérdidas de agua en profundidad, lo que indica que el riego (dotación y frecuencia) se está aplicando correctamente. Si en las capas profundas el suelo se fuese humedeciendo progresivamente habría que pensar en aumentar el número de emisores por olivo, así como la frecuencia de riegos.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la sonda Diviner 2000 son similares a los que se tuvieron en suelos arcillosos con grietas de Australia. El coeficiente de determinación R^2 obtenido es de 0.8, un valor razonablemente alto para este tipo de trabajos, que es superior al que se obtuvo en Australia.

Los valores medios de contenido de agua en el suelo después de aplicar los coeficientes de la calibración obtenidos pueden corresponder con los conseguidos gravimétricamente en ese tipo de suelos.

A la hora de caracterizar el contenido de agua en el suelo de una parcela mediante medidas en campo con sonda FDR, se requeriría un número suficientemente alto de puntos de

observación, número que queda pendiente de determinar en futuros trabajos de investigación.

Esta elevada variabilidad puede ser debida al escaso volumen de suelo medido por la sonda, donde cualquier anomalía como pequeñas piedras, separación entre el suelo y el tubo de acceso, pequeñas raíces o pequeñas grietas pueden tener una gran influencia en el resultado de la medida final de el contenido de agua del suelo.

Si se consideran las medidas de humedad realizadas en cada uno de los tubos de forma aislada, los valores que se obtienen son poco fiables en términos de humedad real existente en el suelo. No obstante, después de realizar medidas a lo largo de un año se puede asegurar que los valores relativos que se obtienen si son coherentes con la evolución real de un suelo, por lo que la gráfica que se tiene puede considerarse apta, si no se tiene en cuenta los valores absolutos de humedad que proporciona la sonda.

La sonda ha resultado bastante eficaz en el control del riego, permitiendo detectar posibles pérdidas por evaporación superficial y percolación profunda. Funcionalmente el empleo de este tipo de sondas parece más efectivo que el empleo de los tensiómetros, fundamentalmente porque la sonda proporciona medidas continuas a lo largo del perfil (1 medida cada 10 cm), no existiendo los problemas de vaciado de los tensiómetros cuando se seca el suelo.

Referencias

- Dean, T.J. Bell, J.P. Baty, A.J., 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Senso design and performance. *J. Hydrol.* (Amsterdam) 93:67-78.
- FAO/UNESCO, 1999. World Reference Base for Soil Resources. Roma.
- Fereres, E., 1997. Irrigation scheduling of horticultural crops. Proc 2nd Int. Sym. On Irrigation of Hort. Crops. Ed K. S. Chartzoulakis. *Act Horticulturae* 449 (1), 253-258.
- Ferreira, I., Valancogne, C., Daudet, F.A., Amèglio, T., Pachedo, A.C., Michaelsen, J., 1996. Evapotranspiration and Crop-Water Relations in a Peach Orchard. In *Transactions of the ASAE and Applied Engineering in Agriculture*. Proceedings of the International Conference, November 3-6 1996, San Antonio, Texas 61-69.
- Ferreira, I., Pachedo, A.C., Michaelsen, J., Amèglio, T., Daudet, F.A., 1997. Water and Energy Balance and Water Stress Indicators in *Rpunus persica* orchard, in central Portugal. Proc 2nd Int. Sym. On Irrigation of Hort. Crops. Ed K. S. Chartzoulakis. *Acta Horticulturae* 449 (1), 379-384.
- Green, R.E., Topp, G.C., 1992 Survey of use of field methods for measuring soil hydraulic properties. P 281-288. G.C. Topp et al (ed). *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA. Madison. WI.
- Hallikainen, M.T., Ulaby, F.T., Dobson, M.C. El-Rayes, M.A., Wu, L.K., 1985. Microwave dielectric behavior of wet-soil. Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 26:2311-2316.
- Hoekstra, T.J., Delaney, A., 1974. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res* 79:1699-1708.
- Hook, H.R., Livingston, N.J., Sun, Z.J., Hook, P.B., 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1384-1391.
- Nadler, A., Lapid, Y., 1996. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. *Aust. J. Soil Res.* 34:361-368.
- Paltineanu, I.C., Starr, J.L., 1997. Real-time Soil Water Dynamics Using Multisensor Capacitance Probes: Laboratory Calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1576-1585.
- Pastor, M., Hidalgo, J., Hidalgo, J.C., Vidal, P., Vega, V., Segura, A.,

2003. Riego subterráneo en olivar: primeros resultados de un ensayo de larga duración. Actas XXI Congreso Nacional de Riegos. Mérida 6-8 Mayo de 2003.
- Sentek, 1999. Diviner 2000. User Guide Version 1.0. Sentek, Pty. Australia.
- Smith-Rose, R.L., 1933. The electrical properties of soils for alternating currents at radio frequencies. *Proc. R. Soc.* London 140:359.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. electromagnetic determination of soil water content using TDR. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
- Watson, K., Gatto, R., Weir, P., Buss, P., 1995. Moisture and salinity sensor and method of use. U.S. Patent 5418466. Date issued: 23 May.
- West, R.C., (ed) 1980. *Handbook of chemistry and physics*. 61st ed. CRC Press, Boca Raton. FL.
- Wobschall, D., 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 16:112-118.