

## LA MEDIDA DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE EL METODO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY): ESTADO DEL ARTE Y EJEMPLOS DE APLICACION

José MARTINEZ FERNANDEZ <sup>(1)</sup>, José Miguel SANCHEZ PEREZ <sup>(2)</sup> y L.H. CAMMERAAT<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geografía Física. Campus de la Merced Universidad de Murcia

<sup>(2)</sup> Centre d'études et de Recherches Eco-géographiques, CEREG - URA 95 CNRS,  
3 rue de l'Argonne, 67083 ESTRASBURGO CEDEX (Francia).

<sup>(3)</sup> Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde. Universiteit van Amsterdam

### RESUMEN

*En este trabajo se presenta la técnica de medida de la humedad del suelo con el método TDR (Time Domain Reflectometry), así como dos ejemplos prácticos de aplicación del método. Las ventajas e inconvenientes de la técnica son analizados en relación con las otras técnicas empleadas para la determinación de la humedad del suelo.*

*En este artículo se presentan dos tipos de aplicaciones de la técnica. Por un lado, la utilización conjunta de la técnica TDR y de medidas de tensión en el suelo en condiciones de humedad controlada puede permitir establecer la curva humedad-succión en el campo. Los datos obtenidos han sido comparados a las curvas experimentales establecidas en laboratorio. Por otro lado, la utilización de medidas TDR y de toma de muestras de la solución intersticial pueden permitir calcular el flujo de agua y de elementos en solución de manera relativamente simple. Las áreas de aplicación corresponden a dos medios bioclimáticos totalmente distintos y condiciones edáficas contrapuestas: País Vasco y SE español.*

*La técnica de medida de la humedad del suelo por TDR presenta varias ventajas con relación a las técnicas tradicionales, sobre todo rapidez y no alteración del suelo, pero su utilización implica una etapa de control a partir de los métodos tradicionales. La relación entre la capacitancia del suelo y el contenido en humedad establecida por Topp et al, (1980) no parece ser universal y su validación debe realizarse para cada tipo de suelo. Los sistemas que se comercializan actualmente permiten modificar los términos de la ecuación, lo que implica la calibración previa del aparato en el campo.*

### INTRODUCCION

La determinación del contenido en agua del suelo es fundamental en todo estudio y caracterización hidrodinámica del suelo (capacidad de retención, infiltración, etc.), modelización hidrológica y estudios relativos al sistema suelo - planta - atmósfera. En la mayoría de estos trabajos es necesario disponer de abundantes medidas, espaciadas en el tiempo y realizadas en un mismo punto.

La técnica estándar de determinación de la humedad del suelo por gravimetría (determinación del contenido en agua en el suelo mediante la medida de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco a 105°C, en relación con el volumen muestreado) presenta el inconveniente de ser destructiva y, por lo tanto, no puede repetirse en un mismo punto.

Otras técnicas más modernas consisten en medir la humedad del suelo mediante moderación neutrónica (sonda de neutrones) y atenuación de ondas gamma. Estos métodos, pese a no ser destructivos, si exceptuamos la etapa de instalación de los tubos de acceso, presentan el inconveniente de estar fuertemente influenciados por la distribución al azar de la radiación. Por otro lado el volumen muestreado está directamente relacionado con el contenido en agua del suelo y su utilización no es posible en los primeros 15 cm del suelo. Por otro lado al tratarse de métodos que utilizan una fuente radioactiva de baja intensidad necesitan un gran número de precauciones durante su uso, y en gran número de países su utilización está reglamentada. Además, estas técnicas necesitan un calibrado propio para cada tipo de suelo en el punto de medida.

Otro grupo de técnicas consiste en el establecimiento de la curva de retención humedad-tensión en el laboratorio y de la medida en el campo de la tensión mediante la utilización de tensiómetros. Esta técnica presenta dos inconvenientes mayores, por un lado la determinación de la curva de retención presenta un trabajo considerable y no siempre se cuenta con los aparatos necesarios; por otro lado, las medidas de tensión no tienen en cuenta el fenómeno de histéresis (a un mismo valor de tensión le corresponden dos contenidos en humedad, en función de que el suelo se esté secando o humedeciendo), lo que introduce un error importante a la hora de establecer balances hídricos del suelo.

En la mayor parte de los estudios relativos a la caracterización hidrodinámica de los suelos y formaciones superficiales, es común que se utilicen varias de estas técnicas simultáneamente lo que permite controlar, al menos en parte, la validez de los resultados obtenidos.

En estudios recientes se ha demostrado que la humedad del suelo puede ser medida utilizando las propiedades de las ondas electromagnéticas, mediante la medida de la constante dieléctrica del suelo. Los primeros estudios relativos a la medida de la constante dieléctrica del suelo remontan a una decena de años, habiéndose realizado una parte importante de estos trabajos en Canadá (Hoekstra, Delaney, 1974; Davis, Annan, 1977; Bhagat, Kadaba, 1977; Topp et al, 1980, 1982a, 1982b, 1983, 1984; Topp, Davis, 1981, 1982, 1985).

#### EL METODO TDR (Time Domain Reflectometry): CONSIDERACIONES TEORICAS

En este trabajo no se expone el desarrollo matemático del principio físico que relaciona la constante dieléctrica del suelo con la humedad, desarrollo que por otra parte ha sido objeto de un gran número de publicaciones científicas (Topp et al, 1980; Dalton and Van Genutchen, 1986; Ledieu et al, 1986).

El principio del método se basa en la determinación de la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un material. La medida de la constante dieléctrica del suelo depende de la frecuencia de emisión de la señal electromagnética. La frecuencia que proporciona las mejores respuestas se sitúa en el intervalo 50 Mhz - 10 GHz (Roth et al, 1990). Para valores próximos a 50 Mhz la constante dieléctrica del agua del suelo

depende fuertemente del tipo de sol (Smith-Rose, 1935) y a valores próximos a 10GHz la medida está influenciada por la relajación de las moléculas de agua (Hoekstra, Delaney, 1974). Por tanto, el rango de frecuencias utilizado se sitúa entre 100 MHz y 4GHz, campo en el que, por otro lado, el efecto asociado a la vibración y a la rotación de las moléculas de agua es despreciable (Ledieu et al. 1986; Ledieu y Dautrebande, 1987).

A 1 GHz la constante dieléctrica del agua es de 80.36, mientras que la del suelo mineral varía entre 3 y 5. El valor de esta constante para el aire es 1. Estas grandes diferencias entre la constante del agua y la del suelo, hace posible que pueda establecerse una relación entre la medida y el contenido en agua del suelo sin que su composición química y su textura intervengan en ella.

La determinación de la constante dieléctrica en el campo se realiza mediante una sonda introducida en el suelo y un aparato que emite ondas electromagnéticas y analiza las ondas reflejadas (Topp et al. 1980). Los tipos de sonda existentes son variados según el tipo de aplicación. Existen varias tipos de sondas en función del número de varillas de que disponen (dos, tres o cuatro puntas). Las varillas son la parte del sensor que se introduce en el suelo, son de acero inoxidable y su diámetro, longitud y separación son variables según el tamaño de la sonda (1,5 mm para varillas de 50 mm de longitud y 10 mm de separación; 3,5 mm para las de 100 mm de longitud y 20 mm de separación; 8 mm para varillas de 160 mm de longitud por 35 mm de separación, etc.). La relación entre la longitud de la sonda, su diámetro y separación ha sido estudiada por Zegelin et al. (1989). Las sondas con tres varillas parecen dar mejores resultados que aquellas que tienen dos.

Las sondas se conectan al aparato de medida mediante un cable coaxial de impedancia constante (50 ohms) con el objeto de impedir cualquier pérdida por reflexión entre el aparato y la sonda. En el interior de la sonda cada varilla está soldada a un diodo y el conjunto está inmerso en una masa de resina. El aparato de medida (*cabletester*) está compuesto por un generador de impulsión y un receptor de la reflexión, o de un osciloscopio que permite visusalizar la reflexión.

#### I. APLICACION DE LA TECNICA AL ESTUDIO DE FLUJOS HIDRICOS EN MEDIOS HUMEDOS EN EL PAIS VASCO

En la zona del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz se procedió a la implantación de dos parcelas experimentales destinadas al estudio de la influencia de la zona no saturada sobre la contaminación de las aguas subterráneas (Sánchez-Pérez et al. 1994).

Una parcela se instaló en enero de 1993 en un campo destinado al cultivo de la patata en la Granja Experimental para la mejora de la Patata de Arkaute. Una segunda parcela se implantó en febrero de 1993 en un terreno privado (Jungitu) en una zona en la que no está previsto ningún tipo de cultivo. Cada parcela se equipó con un dispositivo experimental que consta de 5 tomamuestras de succión y 5 sensores de humedad tipo TDR (TRIME,

Imko) instalados a diferentes profundidades (15, 35, 55, 75 y 95 cm de profundidad).

Las medidas de humedad se realizaron mediante el sistema TDR con sensores de dos puntas (varillas) de 10 cm de longitud, implantados en el suelo en vertical en el interior de tubos de PVC de 5 cm de diámetro y de longitud variable. Cada medida de humedad se realizó tres veces en un mismo punto. En las primeras etapas se realizaron medidas de humedad por métodos gravimétricos para controlar la validez de las medidas TDR.

La parcela experimental de Arkaute se equipó en el mes de julio de 1993 con un dispositivo de riego automático por goteo. El dispositivo estaba controlado por un tensiómetro situado a 35 cm de profundidad, con una alarma de riego a 50 cbars de tensión. Durante el periodo de julio a octubre el dispositivo se completó con la instalación de tres tensiómetros a 15, 35 y 55 cm de profundidad. Durante estos tres meses se realizaron medidas diarias de tensión, humedad y volúmenes de agua de riego y de datos climáticos: viento, temperatura, humedad, precipitación, presión, irradiación y evaporación. Por otro lado, el suelo de la parcela ha sido objeto de un estudio de caracterización hidrodinámica de los diferentes horizontes del suelo. Se realizó una fosa de 2 m<sup>2</sup> de superficie y 1,5 m de profundidad, en la que se tomaron muestras de suelo no alteradas en cilindros de aluminio de 5 cm de altura y 8 cm de diámetro. Se tomaron tres muestras de suelo a 6 niveles diferentes.

Las medidas establecidas a partir de los métodos gravimétricos y TDR no presentaban diferencias significativas, lo que permitió conservar la ecuación de la sonda, calibrada para un suelo de tipo mineral. El sistema utilizado permite calibrar cada sonda por separado mediante un programa informático. En una primera etapa se estudió la influencia de la sonda sobre la medida de la humedad. En la figura 1 se ha representado la relación entre la humedad establecida con dos sondas idénticas, calibradas con la misma ecuación pero con un cable de longitud diferente (una con cable de longitud standar, 1,2 m y otra con un cable de 2 m). El error asociado al proceso de fabricación de las sondas y a la longitud del cable es inferior al 1%.

La implantación de sensores TDR a 5 profundidades ha permitido seguir el frente de humedad en relación con los aportes de agua al suelo (lluvia o riego) y cuantificar las cantidades de agua que circulan hacia la zona no saturada y/o hacia la atmósfera.

La realización en paralelo de medidas de humedad y de medidas de tensión en el suelo, ha posibilitado la determinación de la curva humedad-succión en la zona superficial del suelo (Figura 2). Los datos obtenidos en el campo serán controlados posteriormente con las curvas establecidas en el laboratorio.

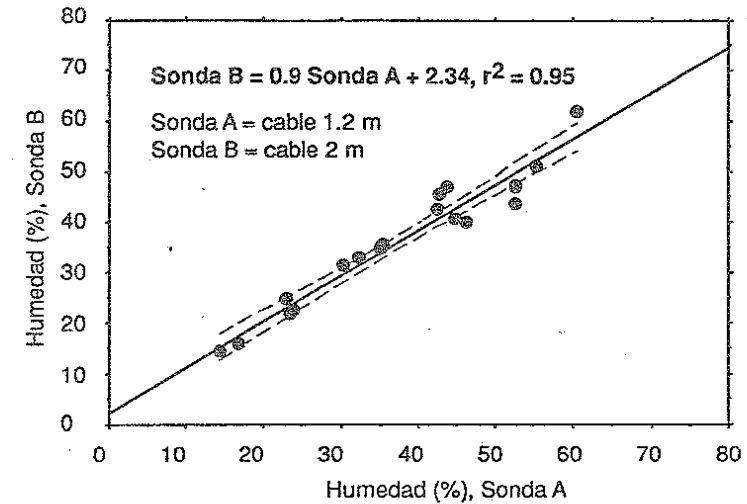


Figura 1. Correlación entre la medida de humedad realizada con sondas TDR de longitud diferente (Sistema TDR, Imko).

En el caso de los horizontes más profundos del suelo, el establecimiento de la curva humedad-succión no puede realizarse ya que la gama de tensiones que pueden existir en el suelo no permiten su construcción, como consecuencia de la presencia del nivel freático en las proximidades de la superficie topográfica. Por esta razón, las técnicas de laboratorio son imprescindibles para la caracterización hidrodinámica de los suelos y de las formaciones superficiales.

## II. APLICACION AL ESTUDIO DE LA DINAMICA HIDRICA DE MEDIOS SEMIARIDOS DEL SE ESPAÑOL

Actualmente existe una gran variedad de aparatos que utilizan el sistema TDR. En el caso de las experiencias descritas en este apartado, el contenido de humedad del suelo fue analizado usando un sistema de medida TDR automatizado descrito por Heimovaara y Bouten (1990). Se utiliza un *cabletester* Tektronix 1502B conectado a un sistema multicable que hace posible la utilización de 144 sensores a la vez. En la experiencia solamente se emplearon 18 sensores simultáneamente.

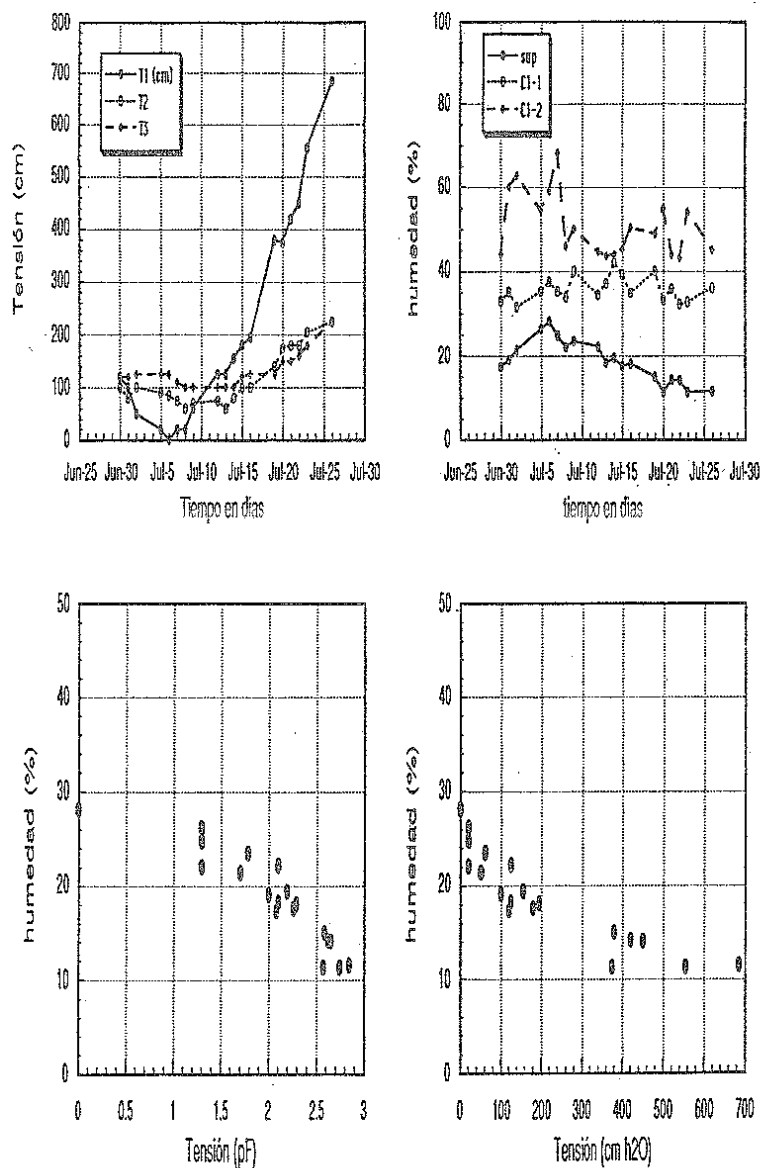


Figura 2. Dos ejemplos de determinación de las relaciones humedad - succión en la zona superficial del suelo, mediante el empleo conjunto de sondas TDR y tensiómetros.

El *cabletester* está conectado a un programa de ordenador que interroga los sensores y almacena los gráficos de las ondas recibidas. Un segundo programa se utiliza para analizar automáticamente las formas de las ondas y calcular el contenido de humedad y la conductividad eléctrica de la solución del suelo. Los sensores utilizados constan de tres varillas de 10 cm de longitud, similares a los descritos por Heimovaara (1993).

También es posible utilizar el sistema descrito de forma manual, conectando directamente el *cabletester* a un ordenador portátil. El programa interroga y almacena los gráficos de las ondas en ficheros. En este caso, cuando se utiliza más de un sensor, es necesario hacer la conexión y desconexión de cada uno de ellos manualmente. Esta metodología puede ser aplicada durante la realización de experiencias de simulación de lluvia, mapas de distribución de humedad del suelo o mediciones consecutivas a lo largo de transectos.

La presencia de fragmentos de roca en el suelo puede afectar a las medidas realizadas con TDR, ya que dichos fragmentos, o no contienen agua, o tienen menos que el suelo. Sin embargo, el sistema TDR ha dado buenos resultados en suelos de textura gruesa, siempre que se hagan correcciones en función de la pedregosidad (Drungil et al. 1989).

El objetivo de esta experiencia fue estudiar las diferencias en infiltración y comportamiento de la humedad del suelo bajo diferentes usos del suelo y vegetación en un medio semi-árido, en relación con procesos de degradación (Thornes, Brandt 1993).

Se seleccionaron dos áreas dentro del Campo Experimental de El Ardal (López Bermúdez et al. 1991), una en un campo de cultivo abandonado hace unos 10 años aproximadamente, y otra en una ladera cubierta de matorral mediterráneo. Las medidas de humedad del suelo se hicieron bajo superficies con piedras, desnudas y bajo vegetación (*Rosmarinus off.* y *Thymus vulg.*). Las características superficiales y las descripciones de los suelos de las dos áreas experimentales, en relación con la experiencia se pueden hallar en Bergkamp et al. (1993).

El dispositivo experimental en los dos casos consta de los siguientes elementos: una parcela cerrada de 10x2 m, sobre la que se instaló un simulador de lluvia, que permitió la utilización de una intensidad media de 70 mm.h<sup>-1</sup> (precipitación con periodo de recurrencia de 15 años) durante 30 minutos. El simulador tipo *sprinkler* consta de 8 aspersores y una altura de caída de agua de 3,5 m. Durante el experimento se utilizó agua destilada (CE<sub>25</sub> de 10μS.cm<sup>-1</sup>) para evitar cualquier tipo de dispersión o floculación debida a concentraciones artificiales de electrolitos (Bryan et al. 1984). En la parte inferior de la parcela se instaló un mecanismo de medida de la escorrentía y un colector de sedimentos.

Las sondas TDR fueron introducidas en el suelo horizontalmente, mediante la excavación de un pequeño hoyo, a cuatro profundidades, -2, -7.5, -15 y -25 cm. El efecto perturbador de la excavación fue minimizado mediante la inserción de las sondas directamente en el área de flujo lateral inalterado. En total se utilizaron 18 sondas en 6 puntos de medida, en los que también se instalaron tensiómetros de forma paralela. Una vez terminada la instalación

de todos los sensores en cada uno de los puntos, el hoyo fue tapado cuidadosamente, colocando las piedras en su posición inicial de acuerdo con un mapa de la superficie previamente dibujado.

Los resultados fueron muy satisfactorios, pudiendo medir la evolución de la humedad en los puntos de medida, tanto en la fase de humedecimiento como en la de desecación (Figura 3), algo muy interesante cuando no se conoce el alcance de la histéresis en un suelo determinado. El uso de tensiómetros presenta un límite de utilización en torno a pF 2.9-3.0, aunque resulta suficiente para el tipo de experiencia diseñada.

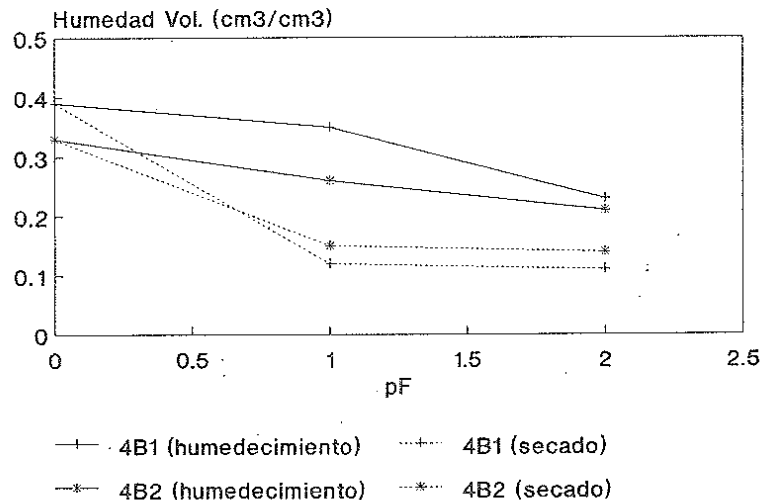


Figura 3. Distinta evolución de dos muestras de suelo en las fases de humedecimiento y desecación (histéresis), medida mediante la utilización conjunta del sistema TDR y tensiómetros.

Para comprobar la bondad de la utilización del método, se recogieron muestras de suelo sin alterar su estructura, para la determinación de las curvas de retención de agua en laboratorio mediante el método del recipiente de tensión hídrica (Martínez Fernández, 1990), y su posterior comparación con las obtenidas *in situ* mediante la utilización conjunta de TDR y

tensiómetros. Los resultados de la relación humedad-succión obtenidos mediante ambas técnicas (Cuadro 1) muestran una gran similitud. La gran ventaja del método TDR frente a las técnicas de laboratorio, es su mayor rapidez y la posibilidad de trabajar bajo condiciones naturales.

Cuadro 1. Comparación del contenido de humedad volumétrica a distintos valores de pF, determinados en el campo mediante TDR y tensiómetros, y en el laboratorio

Muestra	Prof(cm)	Sat. Campo *	Sat. Lab. **	pF 1 Lab. Campo *	pF 1 Lab. *	pF 2 Campo *	pF 2 Lab. *
3B1	2	0.45	0.46	0.36	0.44	0.22	0.27
3B2	15	0.41	0.40	0.35	0.42	0.29	0.29
3R1	2	0.45	-	0.31	-	0.31	-
3R2	7.5	0.47	0.42	0.40	0.29	0.39	0.25
3R3	15	0.48	0.37	0.48	0.30	0.18	0.23
4B1	7.5	0.39	0.43	0.35	0.41	0.23	0.23
4B2	25	0.33	-	0.26	-	0.21	-
4R1	15	0.45	0.44	0.32	0.32	0.22	0.28
4R2	25	0.46	0.45	0.35	0.36	0.28	0.32

\* Humedad volumétrica (cm<sup>3</sup>. cm<sup>-3</sup>)

Estas experiencias, llevadas a cabo mediante dispositivos de medida y objetivos metodológicos similares, fueron repetidas posteriormente en diferentes áreas de Belmonte (Cuenca) (Bergkamp et al. 1993) y Benidorm (Alicante) (Boix Fayos, 1993), con resultados igualmente satisfactorios.

La combinación de medidas de humedad del suelo mediante TDR y tensiómetros en un mismo punto, permite la determinación *in situ* de las curvas de retención de agua. Esta metodología tiene ventajas frente a otras mucho más destructivas que no permiten medidas en continuo o contienen más fuentes de error. En suelos con problemas operativos adicionales, como es el caso de los que tienen un abundante contenido de piedras, algo muy común en los medios semi-áridos, esta metodología es una buena alternativa frente a otras técnicas, ya sean de campo o de laboratorio. La posibilidad de medir humedad del suelo y tensión hídrica en condiciones naturales semi-controladas, proporciona datos e información muy valiosa para el estudio de las propiedades y el comportamiento hidrodinámico de los suelos.

## CONCLUSIONES

En las experiencias reseñadas, llevadas a cabo en medios muy distintos y con objetivos diferentes, la utilización del sistema TDR para el estudio de la humedad del suelo ha dado buenos resultados. Las aplicaciones pueden ser muy variadas, pero en el caso concreto de su utilización conjunta con tensiómetros permite determinar de manera satisfactoria la curva de retención de agua del suelo en condiciones naturales. Los resultados han sido comparados con los obtenidos en laboratorio, presentando una gran similitud.

El sistema TDR comercializado por IMKO presenta la ventaja de calcular el contenido en agua del suelo directamente a partir de la respuesta de la señal reflejada, sin necesidad de realizar el cálculo manual a partir del registro de la reflexión. Por otro lado, esta señal puede registrarse si se desea. Otra particularidad del sistema es la posibilidad de modificar los parámetros de la ecuación de Topp et al. (1980) para cada sonda en función de las características del material, lo que permite reducir errores.

El modelo de Tektronix permite la utilización conjunta y simultánea de un gran número de sondas, pudiendo hacerse medidas en continuo en muchos puntos o perfiles. Permite medir al mismo tiempo la conductividad eléctrica del suelo y su utilización con el *software* adecuado facilita la adquisición, almacenamiento y análisis de los datos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los organismos y entidades que han financiado los proyectos en los que se inscriben las experiencias citadas. La llevada a cabo en Vitoria ha sido financiada por la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (Referencia 121.310-E 119/91). El trabajo realizado en Murcia forma parte del proyecto MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) financiado por la CE (contrato EPOC-CT90-0014-SMA).

#### BIBLIOGRAFIA

- BERGKAMP, G., CAMMERAAT, L.H., BOER, M., MARTINEZ-FERNANDEZ, J., IMESON, A.C., LOPEZ-BERMUDEZ, F., MULLIGAN, M., VAN MULLIGEN, E., STATHAM, S., VAN WESEMAEL, B. (1993). Water movement and vegetation patterns on shrubland and abandoned fields in desertification threatened areas: results of large rainfall simulation experiments in Spain. *Journal of Applied Ecology*. En prensa.
- BHAGAT, P.K., KADABA, P.K. (1977). Relaxation models for moist soils suitable at microwave frequency. *Mat. Science and Engineering* 28: 47-51.
- BOIX FAYOS, C. (1993). Summary of research resulting from the Alicante ERMES field site. *ERMES Interim Report*. 3.
- BRYAN, R.B., IMESON, A.C., CAMPBELL, I.A. (1984). Solute release and sediment entrainment on micro catchment in the Dinosaur Park badlands, Alberta. *Canadian Journal of Hydrology* 71: 79-106.
- DALTON, F.N., VAN GENUTCHTEN, M.Th. (1986). The time-domain reflectometry for measuring soil water content and salinity. *Geoderma* 38: 237-250.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1977). Electromagnetic detection of soil moisture: Progress report. *Canadian J. Remote Sensing* 3: 76-86.
- DRUNGIL, C.E.C., ABT, K., GISH, T.J. (1989). Soil moisture determination in gravelly soils with Time Domain Reflectometry. *Transactions ASAE* 32: 177-180.
- HEIMOVAARA, T.J. (1993). Practical and theoretical considerations for the design and application of triple wire TDR probes. *Soil Sci. Soc. of America J.* (en prensa).

- HEIMOVAARA, T.J., BOUTEN, W. (1990). A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water content. *Water Resources Research* 26: 2311-2316.
- HOEKSTRA, P., DELANEY, A. (1974). Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. *J. of Geophysical Res.* 79 (11): 1669-1768.
- LEDIEU, J., DAUTREBANDE, S. (1987). Mesure de l'humidité des sols par réflectométrie temporelle (TDR). *Bull. Groupe Français Humidité Neutronique* 22: 13-30.
- LEDIEU, J., DE RIDDER, P., DE CLERK, P., DAUTREBANDE, S. (1986). A method of measuring soil water by time-domain reflectometry. *J. of Hydrology* 88: 319-328.
- LOPEZ BERMUDEZ, F., ROMERO DIAZ, M.A., MARTINEZ FERNANDEZ, J. (1991). Soil erosion in a semi-arid Mediterranean environment. El Ardal Experimental Field (Murcia, Spain). *Soil Erosion Studies in Spain*. Geofoma Eds. pp 137-152.
- MARTINEZ FERNANDEZ, J. (1990). Estudio de las características hidrodinámicas de los suelos: el método del recipiente de tensión hídrica. *I Reunión Nac. de Geomorfología*. SEG. Teruel. pp: 699-708.
- ROTH, K., SCHULIN, R., FLUHLER, H., ATTINGER, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Res.* 26 (10): 2267-2273.
- SANCHEZ-PEREZ, J.M., ANTIGUEDAD, I., ARRATE, I., RUIZ PEREZ, M., MORELL, I. (1994). La zona no saturada y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas en el acuífero de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). *Investigación en Zona No saturada*. Ed. I. Morell. pp:
- SMITH-ROSE, R.L. (1935). The electric properties of soil at frequencies up to 100 MHz. *Proc. Phys. Soc. London* 47. 923.
- THORNES, J.B., BRANDT, J. (1993). *Mediterranean desertification and land-use*. J. Wiley. London (En prensa).
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. (1981). Detecting infiltration of water through the soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma* 26: 13-23.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. (1982). Measurement of soil water content using time domain reflectometry. *Canadian Hydrology Symposium*. Nat. Research Council of Canada. Ottawa. pp: 269-287.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. (1985). Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 19-24
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission. *Water Resources Res.* 16: 574-582
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1982a). Electromagnetic determination of soil water content using TDR. I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 672-676
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1982b). Electromagnetic determination of soil water content using TDR. II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 676-678
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., CHINNICK, J.H. (1983). Using TDR water content measurement for infiltration studies. *Advances in infiltration. ASAE Publication*. 11-83: 231-240
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., BAILEY, W.G., ZEBCHUK, W.D. (1984). The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Canadian J. Soil Sci.* 19: 313-321
- ZEGELIN, S.J., WHITE, I., JENKINS, D.R. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Res.* 25 (11): 2367-2376