

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL Y MUESTREO DE LA ZONA NO SATURADA

SANCHEZ-PEREZ, J. M.

Centre d'Études et de Recherches Eco-Géographiques.

CEREG - URA 95 CNRS.

3 rue de l'Argonne, 67083, Estrasburgo Cedex (Francia).

Resumen

En este trabajo se presentan las tecnologías desarrolladas en los últimos años para el control y estudio de la zona no saturada. Se analizan los avances tecnológicos relacionados con la medida directa de la humedad del suelo, con la automatización de las medidas y con el muestreo del agua del suelo con técnicas poco contaminantes.

La técnica de medida de la humedad del suelo mediante sistemas TDR parece haberse generalizado. Éste método presenta varias ventajas con relación a las técnicas tradicionales, pero su utilización implica una etapa de control a partir de métodos clásicos. La relación entre la constante dieléctrica 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. Las medidas de tensión con tensiómetros analógicos parece no presentar muchos problemas cuando se trabaja en condiciones de humedad inferiores a pF 2.9 (80 cbar). En medios áridos este tipo de sistemas no es aconsejable siendo más interesante utilizar sistemas de medida directa de la humedad tipo TDR.

Los métodos para determinar la conductividad hidráulica mediante ensayos de infiltración in situ parecen haberse consolidado. El método denominado TRIMS (Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions) permite caracterizar sin grandes problemas la parte superficial del suelo.

Los sistemas de muestreo de la solución intersticial del suelo mediante cápsulas en teflón presentan muchos menos inconvenientes que los sistemas clásicos equipados con cerámicas porosas. No obstante, según el tipo de seguimiento que se pretenda realizar, los tomamuestras equipados con cerámicas pueden ser muy eficaces para el control y seguimiento de la contaminación en la zona no saturada.

Introducción

La determinación del contenido en agua del suelo y de su composición es fundamental en todo estudio relativo a la caracterización hidrodinámica del suelo (capacidad de retención, infiltración, etc.), a la modelización hidrológica, a los estudios relativos al sistema suelo-planta y a la circulación de contaminantes en la zona no saturada. En la mayoría de estos trabajos es necesario disponer de medidas espaciadas en el tiempo relativas a un mismo punto.

En los últimos años las técnicas destinadas al estudio de la zona no saturada del suelo han sufrido importantes modificaciones, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a mejorar los dispositivos de

muestreo y la caracterización hídrica de los suelos.

En un artículo anterior (Sánchez-Pérez, 1994) se pasó revisión a las diferentes técnicas destinadas al muestreo de la zona no saturada del suelo, bien para su caracterización hidrodinámica o granulométrica o para la extracción de la solución intersticial del mismo. En ese artículo se pusieron de manifiesto los inconvenientes que presentan estas técnicas al ser destructivas (una vez realizada la medida en un punto no puede volver a realizarse en el mismo punto ya que la muestra se ha llevado al laboratorio). Actualmente se han desarrollado otro tipo de técnicas que permiten realizar la caracterización hidrodinámica e hidroquímica de la zona no saturada en condiciones de campo.

Así, en el caso de las soluciones del suelo se puede realizar un seguimiento de la composición química de las mismas en un mismo punto, limitando los errores generados por los muestreos de tipo destructivo. Las técnicas de extracción de las soluciones del suelo han sido mejoradas, fundamentalmente a partir del uso de materiales alternativos menos contaminantes, que las clásicas cerámicas porosas.

En lo relativo a las técnicas de caracterización hídrica de los suelos y formaciones superficiales, se han desarrollado también técnicas alternativas que permiten realizar esta caracterización directamente en el terrero. Dentro de éstas se pueden reseñar la medida de la humedad del suelo por métodos TDR y la caracterización de la conductividad hidráulica mediante infiltrómetros de discos (tipo TRIMS).

En este artículo presentamos estas nuevas metodologías, las ventajas e inconvenientes de cada sistema y hacemos una puesta a punto bibliográfica de las diferentes tecnologías presentadas de manera que el lector que desee más información pueda conseguirla fácilmente.

Metodologías para la caracterización hídrica de los suelos

Los mayores logros obtenidos son los relativos a la medida de la humedad del suelo con técnicas que permiten obtener directamente el contenido de agua de los mismos. Estos métodos basados en la capacidad del suelo para hacer circular un pulso eléctrico se denominan TDR (Time Domain Reflectometry). Las técnicas de medida de la tensión del suelo han evolucionado en paralelo, del sistema clásico de tensiómetros con los que solo podían hacerse medidas puntuales se ha pasado a sistemas analógicos que permiten seguir en continuo la evolución de la tensión en el suelo. En lo relativo a la caracterización de la infiltración la utilización de infiltrómetros de multianillos a carga variable parece generalizarse actualmente.

Medida de la humedad mediante TDR

En un trabajo anterior (Martínez-Fernández *et al.*, 1994) se hacía una

revisión de las diferentes técnicas utilizadas para la medida de la humedad del suelo y se presentaban las consideraciones teóricas del método TDR, así como varios ejemplos de aplicación de esta técnica en medios húmedos y semiáridos españoles.

El método TDR: algunas consideraciones teóricas

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 se remontan a una decena de años, habiéndose realizado un parte importante de estos trabajos en Canadá (Bhagat y Kadaba, 1977, Davis y Annan, 1977, Hoekstra y Delaney, 1974, 1979; Topp *et al.*, 1980, 1982a, 1982b, 1983, 1984, Topp y Davis, 1981, 1985a).

Las publicaciones científicas relativas a este método de medida de la humedad del suelo son muy numerosas, lo que muestra la actualidad del método y su continua evolución. En estos trabajos se hace referencia fundamentalmente a las consideraciones teóricas del método como la frecuencia óptima de la onda (Topp *et al.*, 1980; Dalton *et al.*, 1982; Dalton y Van Genuchten, 1986; Ledieu *et al.*, 1986, Ledieu y Dautrebande, 1987; Campbell, 1990; Knight, 1992; Heimovaara, 1994; Heimovaara *et al.*, 1994), o sobre el tipo de sonda (Zegelin *et al.*, 1989; Heimovaara, 1993; Petersen *et al.*, 1995; Whalley, 1993; Selker *et al.*, 1993).

En otros trabajos se hace referencia a los problemas de calibración en condiciones de laboratorio (Nadler *et al.*, 1991; Dasberg y Hopmans, 1992; Roth *et al.*, 1990, 1992; Dirksen y Dasberg, 1993; Heimovaara *et al.*, 1993, Kelly *et al.*, 1995), o de campo (Topp y Davis, 1985b; Dasberg y Dalton, 1985; Hayhoe y Bailey, 1985; Martinez *et al.*, 1994; Gray y Spies, 1995; Nielsen *et al.*, 1995, Amato y Ritchie, 1995, Gregory *et al.*, 1995).

Otros trabajos tratan sobre la automatización de las medidas (Topp y Culley, 1989; Heimovaara y Bouten, 1990; Baker y Allmaras, 1990; Herkelrath *et al.*, 1991), la aplicación para la determinación de la conductividad hidráulica del suelo (Ryden, 1986; Parkin *et al.*, 1995), la infiltración (Topp *et al.*, 1983), la evaporación (Plauborg, 1995), la variabilidad espacial de la humedad del suelo (Van Wesenbeeck y Kachanoski, 1988; Zhai *et al.*, 1990), la medida de la salinidad del suelo (Dalton y Van Genuchten, 1986; Elrick *et al.*, 1992; Kachanoski *et al.*, 1992), o la evaluación de la circulación de soluciones (Sánchez-Pérez *et al.*, 1994; Vanclouster *et al.*, 1995).

En base a los datos aportados en estos trabajos se han fabricado varios sistemas comercializados actualmente que utilizan frecuencias hasta 2,5 Ghz y sondas de dos o tres varillas (fig. 1). Los sistemas más generalizados son el sistema TEKTRONIC (holandés), el TRASE (americano) y el sistema TRIME (alemán). Los tres sistemas permiten el uso de sondas de dos o más puntas así como la calibración del aparato mediante la

utilización de la ecuación propuesta por Topp *et al.* (1980) o por otro tipo de calibración.

TDR: Nuevos sistemas

Dentro de la últimas novedades aportadas a estos sistemas, podemos reseñar la existencia de una sonda diferente a las sondas clásicas con varillas, que presenta la particularidad de poder ser utilizada para la medida de todo el perfil. Se trata de la sonda tipo tubo (Tube probe) fabricada por los diseñadores del sistema TRIME (figura 1). Este tipo de sonda está actualmente en una etapa de calibración y según nuestra experiencia, si se respetan las instrucciones del constructor relativas a la instalación de los tubos de acceso, funcionan correctamente. No obstante, en zonas con un fuerte contenido en humedad la sonda parece dar problemas.

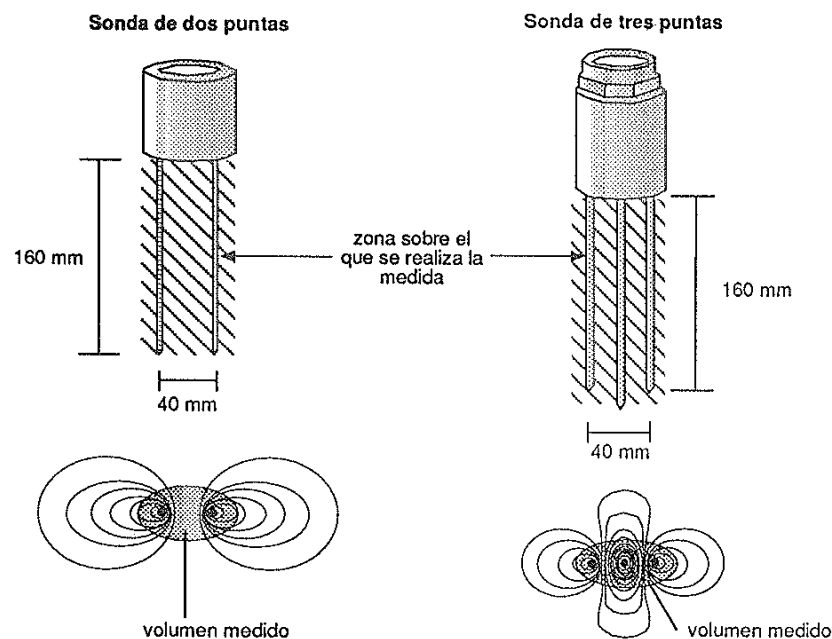


Figura 1. Sondas TDR de dos y tres puntas (Modelo Imko). Se indican la distribución adimensional del campo eléctrico y la zona sobre la que se realiza la medida (Proyección en un plano perpendicular a las varillas).

Ventaja e inconveniente del método

Este tipo de sistemas permite obtener directamente en sólo unos segundos la medida de la humedad del suelo. Los sistemas equipados con sondas de varillas son difícilmente utilizables para medir la humedad a diferentes profundidades sin perturbar el perfil del suelo, pero muy útiles para realizar medidas en superficie.

El sistema con la sonda tipo tubo presenta la ventaja de poder ser utilizado en todo el perfil, lo que permite obtener datos similares a los

obtenidos con las clásicas sondas de neutrones. El inconveniente mayor de este sistema es que no puede ser utilizado para la medida en continuo de la humedad del suelo, limitándose este tipo de medidas exclusivamente a las sondas clásicas de dos o tres puntas.

Otro problema, generalizable a todo tipo de sondas, es que la ecuación de calibración propuesta por Topp *et al.* (1980), que es utilizada en casi todos los sistemas, no es aplicable a cualquier tipo de suelo. En el caso de suelos con un fuerte contenido en materia orgánica los resultados obtenidos con este tipo de calibración son muy diferentes de los obtenidos con métodos alternativos (métodos gravimétricos).

Medida de la tensión del suelo

La medida de la tensión del suelo se realiza clásicamente mediante tensiómetros de mercurio. Este tipo de tensiómetros presenta el inconveniente de aportar exclusivamente medidas por lectura directa. Un progreso importante a la hora de medir la tensión del suelo es la automatización de la medida mediante el uso de tensiómetros analógicos conectados a una central. Existen dos modelos actualmente, uno que transforma la medida de tensión mediante un sensor de presión situado en el extremo del tensiómetro y un segundo sistema hermético con sensor integrado (figura 2). En el caso del primer sistema éste puede llenarse de agua fácilmente en el campo. El segundo sistema se utiliza para realizar medidas en profundidad de manera a evitar una fuerte tensión, lo que produciría la entrada de aire que habría que eliminar en el laboratorio.

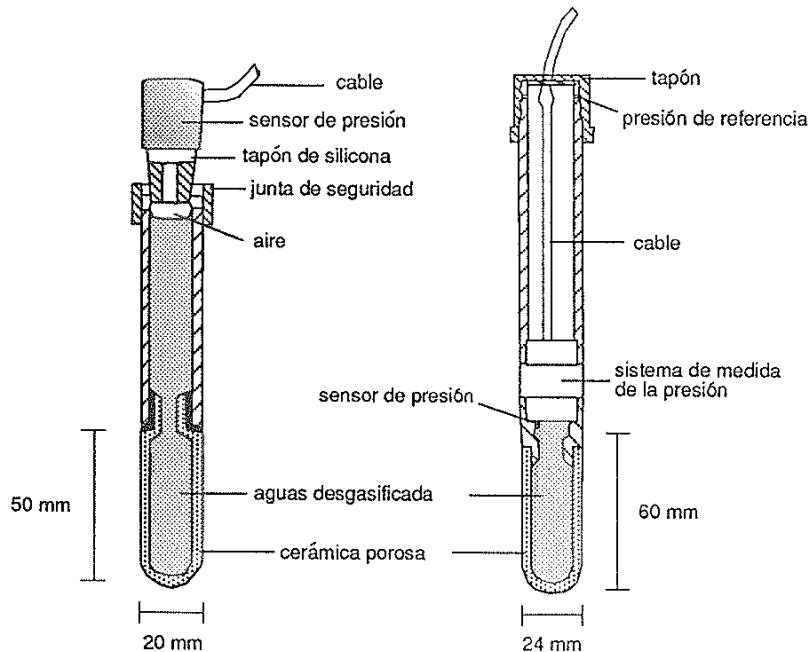


Figura 2. Tensiómetros analógicos: (a) con sensor de presión sobre columna de agua (Modelo T3, Eijkelkamp), (b) con sensor integrado (modelo T5, Eijkelkamp).

Ventaja e inconveniente del método

El uso de este tipo de tensiómetros se está generalizando en los estudios relativos a la circulación y modelización del agua en el sistema suelo-planta, como complemento de la medida de la humedad. El inconveniente de este tipo de material es que no permite obtener directamente la humedad del suelo, siendo necesario tener datos relativos a la curva de humedad-succión característica de cada nivel del suelo. Otro inconveniente de este tipo de sistemas es que no puede ser utilizado en suelo secos, ya que la tensión máxima que pueden medir se sitúa en torno a los 3 bares. En el momento en que la succión del suelo alcanza este valor límite el sistema tensiómetro-suelo se desequilibra.

La utilización conjunta de la medida de humedad TDR y de medidas de tensión en el suelo permite establecer la curva humedad-succión en el campo.

Medida de la conductividad hidráulica en condiciones no saturadas

Hasta hace unos años la medida de la conductividad hidráulica en condiciones no saturadas presentaba el problema de no poder realizarse fácilmente en el campo. Actualmente el desarrollo de nuevas técnicas basadas en los ensayos de infiltración mediante infiltrómetros de anillos permite realizar esta medida *in situ*. Se trata del conductímetro hidráulico de discos (TRIMS = Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions).

Este sistema ideado por Clothier y White (1981) y Perroux y White (1988) es un infiltrómetro que permite realizar medidas de infiltración en condiciones de carga negativa mantenida constante sobre una zona de forma circular (Vauclin y Chopart, 1992). Este método permite determinar la curva conductividad hidráulica-succión hasta una succión de 100 cm.

Algunas consideraciones teóricas

El ensayo de infiltración se realiza a partir de la medida de la lámina de agua infiltrada en función del tiempo hasta alcanzar un régimen permanente caracterizado por una variación del nivel de agua constante en un mismo periodo de tiempo. Los métodos de análisis de los datos han sido el objeto de varias publicaciones (Scotter *et al.*, 1982; White y Sully, 1987; Smetten *et al.*, 1994; Haverkamp *et al.*, 1994).

Ventaja e inconveniente del método TRIMS

Este método de determinación de la conductividad hidráulica en condiciones de no saturación, permite a su vez determinar la conductividad a saturación y la absorción capilar. Una limitación del método es que éste sólo puede aplicarse fácilmente en la parte superficial del suelo o en los primeros 20 o 30 cm, ya que es necesario posicionar todo el sistema directamente encima del suelo a caracterizar.

Metodologías para la extracción de la solución intersticial del suelo

Las diferentes técnicas utilizadas habitualmente para el estudio de la composición química de la solución intersticial del suelo pueden resumirse en tres: los métodos destructivos, que consisten en muestrear el suelo en el campo y extraer la solución intersticial en laboratorio; los métodos basados en la utilización de lisímetros, que permiten recoger el agua que circula en el suelo por gravedad; y los muestreadores de succión que permiten el muestreo de la solución intersticial del suelo en condiciones de depresión controladas (Sánchez-Pérez, 1994).

En este artículo sólo trataremos los métodos de extracción de las soluciones del suelo mediante tomamuestras. Las técnicas destinadas al muestreo de las soluciones sin modificar la estructura de los suelos han evolucionado en paralelo a las de la medida de la humedad de los mismos. De las clásicas cerámicas porosas se ha pasado a sistemas menos contaminantes como las cápsulas de teflón u otro tipo de materiales (figura 3).

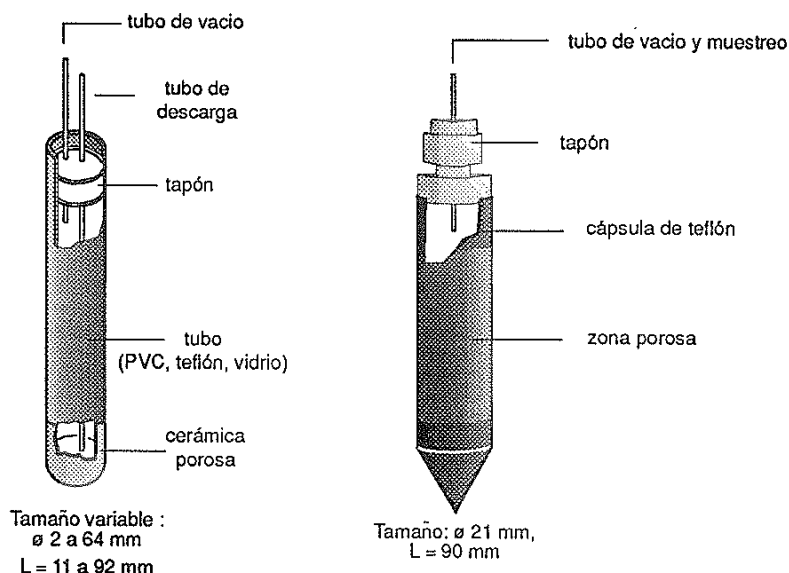


Figura 3. Muestreadores de agua del suelo: (a) sistema de tomamuestras equipado con cerámica porosa, (b) cápsula de teflón (Modelo Prenart).

Cerámicas porosas

La evolución histórica del uso de tomamuestras de succión equipados con cerámicas porosas y los diferentes tipos existentes se presentó en un artículo anterior (Sánchez-Pérez, 1994). En este apartado sólo presentaremos las novedades que han aparecido en los últimos años; no obstante, he considerado oportuno recopilar los artículos más significativos relativos al uso de cerámicas porosas.

Los trabajos referenciados en la bibliografía pueden agruparse en dos grandes grupos. Los trabajos que hacen referencia a las perturbaciones de orden físico: la depresión que se tiene que aplicar (Chow, 1977; Morrison y Lowery, 1990; Webster *et al.*, 1993), el tipo de agua muestreada (Saragoni, *et al.*, 1990; Magrid y Christensen, 1993), la zona de influencia de la cerámica y la representatividad de las muestras extraídas (Van der Ploeg y Beese, 1977; Talsma *et al.*, 1979; Barbarick *et al.*, 1979, Silworth y Grigal, 1981; Narasimhan y Dreiss, 1986; Grossmann y Udluft, 1991), el tiempo de muestreo (Tokunaga, 1992, Lord y Shepherd, 1993), la perturbación del suelo y la modificación de la conductividad hidráulica de la cerámica con el paso del tiempo como consecuencia del colmatado de los poros (Cheverry, 1983).

El otro tipo de trabajos, más numerosos, es el relativo a las perturbaciones de orden químico. En estos trabajos se pone de manifiesto cómo la depresión utilizada puede condicionar la composición química del agua muestreada (Narasimhan y Dreiss, 1986; Grossmann y Udluft, 1991; Jones y Edwards, 1993; Dahlgreen, 1993). Dentro de los aspectos relacionados con la liberación de iones, existe una cierta unanimidad en todos los trabajos en lo relativo a la contaminación de las primeras muestras obtenidas, bien durante las etapas de lavado en el laboratorio (Grover y Lamborn, 1970; Harris y Hansen, 1975; Albets *et al.*, 1977) o en el campo, con lo que se aconseja que se desechen las primeras muestras de agua recogidas con estos sistemas (Starr, 1985; Litaor, 1988; Grossmann y Udluft, 1991; Beier y Hansen, 1992; Lord y Shepard, 1993; Wester *et al.*, 1993). Otro tipo de problema de orden químico es el relativo a los fenómenos de absorción/desorción de iones (Grover y Lamborn, 1970; Hansen y Harris, 1975); Estos se localizan en la superficie de la cerámica (Perrin-Ganier *et al.*, 1993), afectan sobre todo a los fosfatos (Hansen y Harris, 1975) y son más importantes cuando las concentraciones en este elemento son bajas (Levin y Jackson, 1977; Nagpal, 1982).

La instalación de las cerámicas en el suelo produce una perturbación de la fase gaseosa del suelo que tiende a equilibrarse con la fase gaseosa atmosférica, que puede producir la precipitación o transformación de la composición del agua muestreada y un aumento del pH (Jones y Edwards, 1993).

Las posibilidades de utilización desde el punto de vista químico son reducidas. El análisis de metales (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn) no parece aconsejable (Hansen y Harris, 1975; Creasey y Dreiss, 1988). Las concentraciones en cationes (fosfatos, calcio, sodio, potasio, magnesio, amonio) de las soluciones muestreadas parecen estar fuertemente condicionadas por la composición química de las cerámicas (Wagner, 1962; Bottcher *et al.*, 1984; Starr 1985; Bernhard y Schenck; 1986, Debyle *et al.*, 1988).

En lo que respecta a la medida de nitritos y nitratos parece existir una cierta unanimidad; estos elementos no están afectados por el sistema de muestreo (Nagpal, 1992). En lo que respecta a los cloruros el empleo de cerámicas sería favorable (Talsma *et al.*, 1979; Barbee y Brown, 1986; Magid y Christensen, 1993; Webster *et al.*, 1993). El uso de cerámicas para el estudio de sulfatos (Raunlund y Rasmussen, 1989; Magrid y Christensen, 1993) y de pesticidas (Perrin-Ganier *et al.*, 1994) parece ser también favorable.

En base a los datos presentados en la bibliografía podemos concluir que este tipo de muestreadores se instalan en general en posición vertical, aplicando una depresión variable entre 0,3 y 0,8 bar, lo que permite muestrear el agua situada en una esfera de 30 a 50 cm alrededor de la cerámica, durante varios días (en general dos semanas). Los parámetros que no presentan problemas son la conductividad eléctrica, el pH, el oxígeno disuelto, los nitratos, nitritos y cloruros, y en menor medida los sulfatos y pesticidas. No obstante, son numerosos los trabajos en los que se ha utilizado este tipo de materiales para el muestreo de cationes (calcio, sodio, potasio, magnesio, amoníaco y fosfato) y metales.

Estos trabajos hacen referencia exclusivamente a las cerámicas comercializadas por la firma americana Soil Moisture. Actualmente varios equipos españoles utilizan cerámicas de fabricación española que también han sido el objeto de varios estudios relativos a la retención y contaminación de las soluciones muestreadas (Morell *et al.*, 1994; Sánchez-Pérez y Morell, 1994). En estos trabajos se aportan datos relativos a los procesos de contaminación y de retención de este tipo de cerámicas, llegando a conclusiones similares a las obtenidas con las cerámicas americanas.

Nuevos materiales

En los últimos años se ha avanzado considerablemente en los métodos de fabricación de las cerámicas porosas. Actualmente existen cerámicas con una fuerte conductividad hidráulica lo que limita los procesos de dilución durante el paso del agua intersticial del suelo a la cerámica.

Un nuevo tipo de fuerte conductividad hidráulica es el sistema Tensionic (SDEC, Francia), que además presenta la particularidad de poder muestrear la solución del suelo a la tensión a la que se encuentra en éste, lo que limita los procesos de retención y contaminación (Moutonnet *et al.*, 1989, 1993).

Cápsulas de teflón

Las cápsulas de teflón funcionan según las mismas consideraciones que los tomamuestras equipados con cerámica porosa. Este tipo de sistemas parece presentar muchos menos problemas a nivel de modificación de la composición química de las soluciones en lo que

respecta a varios elementos que plantean problemas con los muestreos con cerámicas porosas (amonio, potasio, fosfatos) o metales (McGuire, *et al.*, 1992). No obstante, parece existir una contaminación por sílice originada en el sistema de impermeabilización de los tubos de teflón utilizados en el muestreador (Maitre *et al.*, 1991).

Otros materiales

Además de las cerámicas porosas y las cápsulas de teflón se han desarrollado otro tipo de materiales como el polivinilo "Looped Hollow fiber samples" (Yanai *et al.*, 1993), polisulfone "CHOS polimer" (Jones y Edwards, 1993) o el acetato de celulosa (Jackson *et al.*, 1976) que parecen presentar pocos inconvenientes a nivel químico.

Otro sistema utilizado comúnmente es el sistema de lisímetros de tensión cero que permiten recoger el agua del suelo por gravedad (Haines *et al.*, 1982; Jemison y Fox, 1994).

Ventajas e inconvenientes

Los tomamuestras de succión presentan la ventaja de perturbar relativamente poco el medio, aunque presentan algunas limitaciones de usos a la hora de estudiar ciertos elementos químicos (sobre todo cationes). Las cápsulas de teflón o los otros materiales parecen más adaptadas para el seguimiento global de la composición, incluyendo los cationes. Una ventaja de las cerámicas porosas, si las comparamos con los otros dos sistemas, es que el volumen de agua recuperado es mayor. No obstante, este "problema" está en gran parte condicionado por las posibilidades analíticas de cada laboratorio.

Los materiales alternativos (fibras de polivinilo, polisulfone o acetato de celulosa) presentan el inconveniente de no estar completamente adaptados al trabajo en condiciones de campo y que los volúmenes de agua recuperados son muy reducidos (2-3 ml).

Referencias

- ALBERTS, E.E., BURWELL, R.E., SCHUMAN, G.E. (1977). Soil Nitrate-nitrogen determined by coring and solution extraction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 90-92.
- AMATO, M., RITCHIE, J.T. (1995). Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 325-329.
- BAKER, J.M., ALLMARAS, R.R. (1990). System for automating and multiplexing soil moisture by TDR. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1-6.
- BARBARICK, K.A., SABEY, B.R., KLUTE, A. (1979). Comparison of various methods of sampling soil water for determining ionic salts, sodium, and calcium content in soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 1053-1055.
- BARBEE, G.C., BROWN, K.W. (1986). Comparison between suction and free drainage soil solution samplers. *Soil Science*, 141 (2), 149-154.
- BEIER, C., HANSEN, K. (1992). Evaluation of porous cup soil-water samplers under

- controlled field conditions : comparison of ceramic and PTFE cups. *Journal of Soil Science*, 43, 261-271.
- BERNHARD, C., SCHENCK, C. (1986). Utilisation de bougies poreuses pour extraire la solution du sol dans le ried central d'Alsace de l'Ill en Alsace. *Bulletin du G.F.H.N.*, 20, 73-85.
- BHAGAT, P.K., KADABA, P.K. (1977). Relaxation models for moist soils suitable at microwave frequencies. *Materials Science and Engineering*, 28, 47-51.
- BOTTCHEER, A.B., MILLER, L.W., CAMPBELL, K.L. (1984). Phosphorus adsorption in various soil-water extraction cup materials : effect of acid wash. *Soil Science*, 137 (2), 239-244.
- 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.
- CHEVERRY, C. (1983). L'extraction de la "solution du sol" par le biais de bougies poreuses: Une synthèse bibliographique des problèmes méthodologiques posés par ces dispositifs. *Bulletin du Groupe français de humidité neutronique*, 14, 47-71.
- CHOW, T.L. (1977). A porous cup soil-water sampler with volume control. *Soil Science*, 124 (3), 173-176.
- CLOTHIER, B.E., WHITE, I. (1981). Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 241-245.
- CREASEY, C.L., DREISS, S.J. (1988). Porous cup samplers: cleaning procedures and potential sample bias from trace element contamination. *Soil Science*, 145(2), 93-101.
- DAHLGREN, R.A. (1993). Comparison of soil solution extraction procedures: effect on solute chemistry. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 24, 1783-1794.
- DALTON, F.N., HERKELRATH, W.N., RAWLINS, D.S., RHOADES, J.D. (1982). Time domain reflectometry : simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224, 989-990.
- DALTON, F.N., VAN GENUCHTEN, M. Th. (1986). The time-domain reflectometry for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38, 237-250.
- DASBERG, S., DALTON, F.N. (1985). TDR field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 293-297.
- DASBERG S., HOPMANS, J.W (1992). TDR calibration for uniformly and ununiformly wetted sandy and clayed loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1341-1345.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A.P.. (1977). Electromagnetic detection of soil moisture: Progress report I. *Canadian Journal Remote Sensing*, 3, 76-86.
- DEBYLE, N.V., HENNES, R.W., HART, G.E. (1988). Evaluation of ceramic cups for determining soil solution chemistry. *Soil Science*, 146, 30-36.
- DIRKSEN, C., DASBERG, S. (1993). Improved calibration of TDR soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 660-667.
- ELRICK, D.E., KACHANOSKI, R.G., PRINGLE, E.A., WARD, A.L. (1992). Parameter estimates of field solute transport models based on TDR measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 56, 1663-1666.
- GRAY, A.N., SPIES, T. A. (1995). Water content measurement in forest soils and decayed wood using time domain reflectometry. *Can. J. For. Res.*, 25, 376-385.
- GREGORY, P.J., POSS, R., EASTHAM, J., MICIN, S. (1995). Use of time domain reflectometry (TDR) to measure the water content of sandy soils. *Aust. J. Soil Res.*,

33, 265-276.

- GROSSMANN, J., UDLUFT, P. (1991). The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. *Journal of Soil Science*, 42, 83-93.
- GROVER, B.L., LAMBORN, R.E. (1970). Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low solute concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 706-708.
- HAINES, B.L., WAIDE, J.B., TODD, R.L. (1982). Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and zero-tension lysimeters: report of discrepancies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 658-661.
- HANSEN, E.A., HARRIS, A.R. (1975). Validity of soil-water samples collected with porous cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 528-536.
- HARRIS, A.R., HANSEN, E.A. (1975). A new ceramic cup soil-water sampler. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 157-158.
- HAVERKAMP, R., ROSS, P.J., SMETTEM, K.R.J., PARLANGE, J.Y. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30, 2931-2935.
- HAYHAE, H.N., BAILEY, W.G. (1985). Monitoring changes in total and unfrozen water content in seasonally frozen soil using TDR and neutron moderation techniques. *Water Resources Research*, 21 (8), 1077-1084.
- HEIMOVAARA, T.J. (1993). Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1410-1417.
- HEIMOVAARA, T.J. (1994). Frequency domain analysis of the time domain reflectometry waveforms. 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. *Water Resources Research*, 30 (2), 189-199.
- HEIMOVAARA, T.J., BOUTEN W.A (1990). Computer controlled 36-channel TDR system for monitoring soil water contents. *Water Resources Research*, 26 (2), 2311-2316.
- HEIMOVAARA, T.J., BOUTEN, W., VERSTRATEN, J.M. (1994). Frequency domain analysis of the time domain reflectometry waveforms. 2. A four-component complex dielectric mixing model for soils. *Water Resources Research*, 30 (2), 201-209.
- HEIMOVAARA, T.J., FREIJER, J.I., BOUTEN, W. (1993). The application of TDR in Laboratory Column Experiments. *Soil Technology.*, 6, 261-272.
- HERKELRATH, W.N., HAMBURG S.P., MURPHY F. (1991). Automatic real time monitoring of soil moisture in a remote field area with TDR. *Water Resources Research*, vol. 27 (5), 857-864.
- HOEKSTRA, P., DELANEY, A. (1974). Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 79(11), 1669-1768.
- JACKSON, D.R., BRINCKLEY, F.S., BONDIETTI, E.A. (1976). Extraction of soil water using cellulose - acetate hollow fibers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 327-329.
- JEMISON, J.M. FOX, R.H. (1994). Nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters. *J. Environ. Qual.*, 23, 337-343.
- JONES, D.L., EDWARDS, A.C. (1993). Evaluation of polysulfone hollow fibres and ceramic suction samplers as devices for the in situ extraction of soil solution. *Plant and Soil*, 150, 157-165.
- KACHANOSKI, R.G., PRINGLE, E., WARD, A. (1992). Field measurement of solute travel times using TDR. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 47-52.

- KELLY, S.F., SELKER, J.S., GREEN, J.L. (1995). Using soil moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 97-102.
- KNIGHT, J.H. (1992). Sensivity of TDR measurements to lateral variation in soil water content. *Water Resources Research*, 28, 2345-2352.
- LEDIEU, J., DAUTREBANDE, S. (1987). Measure de l'humidité des sols par réflectométrie temporelle (RDT). *Bulletin du Groupe Français de Humidité Neutronique*, 22, 13-30.
- LEDIEU, J., DE RIDDER, P., DE CLERCK, P., DAUTREBANDE, S. (1986). A method of measuring soil water by time-domain reflectometry. *Journal of hydrology*, 88, 319-328.
- LEVIN, M.J., JACKSON, D.R. (1977). A comparison of in situ extractors for sampling soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 535-536.
- LITAOR, M.I. (1988). Review of soil solution samplers. *Water Resources Research*, 24(5), 727-733.
- LORD, E.I., SHEPHERD, M.A. (1993). Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. *Journal of Soil Science*, 44, 435-449.
- MAGALHAES, A.M.T., CHALK, P.M. (1989). Interaction of methyl nitrite with the inorganic and organic fractions of soils. *Journal of Soil Science*, 40, 349-358.
- MAGID, J., CHRISTENSEN, N. (1993). Soil solution sampled with and without tension in arable and heathland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1463-1469.
- MAITRE, V., BOURRIE, G., CURMI, P. (1991). Contamination of collected soil water samples by the dissolution of the mineral constituents of porous P.T.F.E. cups. *Soil Science*, 152, 289-293.
- MARTINEZ-FERNANDEZ, J., SANCHEZ-PEREZ, J.M., CAMMERAAT, L.H. (1994). La medida de la humedad del suelo mediante el metodo TDR (time domain reflectometry). I. Morell (Ed): Investigación en zona no saturada, 17-27, Col.lecció Summa Ciències experimentals, Universitat Jaume I, ISBN: 84-8021-047-8.
- McGUIRE, P.E., LOWERY, B., HELMKE, P.A. (1992). Potential sampling error: trace metal adsorption on vacuum porous cup samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 74-82.
- MORELL, I., ESTELLER, V., DURAN, A. (1994). Efecto depurador de la zona no saturada sobre efluentes urbanos utilizados para riego. I. Morell (Ed): Investigación en zona no saturada, 77-98, Col.lecció Summa Ciències experimentals, Universitat Jaume I, ISBN: 84-8021-047-8.
- MORRISON, R.D., LOWERY, B. (1990). Effect of cup properties, sampler geometry, and vacuum on the sampling rate of porous cup samplers. *Soil Science*, 149(5), 308-316.
- MOUTONNET, P., PAGENEL, J.F., FARDEAU, J.C. (1993). Simultaneous field measurement of nitrate-nitrogen and matric pressure head. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1458-1462.
- NADLER, A., DASBERG, S., LAPID, I. (1991). Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 938-943.
- NAGPAL, N.K. (1982). Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water samplers for nutrient transport studies. *Can. J. Soil Sci.*, 62, 685-694.
- NARASIMHAN, T.N., DREISS, S.J. (1986). A numerical technique for modeling transient flow water to a soil water sampler. *Soil Science*, 141(3), 230-236.

- NIELSEN, D.C., LAGAE, H.J., ANDERSON, R.L. (1995). TDR measurements of surface soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 103-105.
- PARKIN, G.W., KACHANOSKI, R.G., ELRICK, D.E. (1995). Unsaturated hydraulic conductivity measured by time domain reflectometry under a rainfall simulating. *Water Resources Research*, 31(3), 447-454.
- PERRIN-GANIER, C., SCHIAVON, M., PORTAL, J.M., BABUT, M., BREUZIN, C. (1994). Alteration of pesticide content in the soil solution collected by a porous cup. *Chemosphere*, 29, 63-70.
- PERRIN-GANIER, C., SCHIAVON, M., PORTAL, J.M., BREUZIN, C., BABUT, M. (1993). Porous cups for pesticides monitoring in soil solution- laboratory tests. *Chemosphere*, 26, 2231-2239.
- PERROUX, K.M. y WHITE, I. (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1205-1215.
- PETERSEN, L.W., THOMSEN, A., MOLDRUP, P., JACOBSEN, O.H., ROLSTON, D.E. (1995). High-resolution time domain reflectometry: sensitivity dependency on probe-design. *Soil Science*, 159 (3), 149-154.
- PLAUBORG, F. (1995). Evaporation from bare soil in a temperate humid climate-measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 1-17.
- RAULUND, K., RASMUSSEN, L. (1989). Aluminium contamination and other changes of acid soil solution isolated by means of porcelain suction-cups. *Journal of Soil Science*, 40, 95-101.
- ROTH C.H., MALICKI M.A., PLAGGE R. (1992). Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurementaly TDR. *Journal of Soil Sci.*, 43, 1-13.
- ROTH, K., SCHULIN, R., FLUHLER, H., ATTINGER, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.*, 26(10), 2267-2273.
- RYDEN, B.E. (1986). Winter soil moisture regime monitored by TDR. *Geogr. Ann.*, 68 A (3), 175-184.
- SANCHEZ-PEREZ, J.M. (1994). Metodologia de muestreo de agua y suelo en medio no saturado. I. Morell (Ed): Investigación en zona no saturada, 1-7, Col.lecció Summa Ciències experimentals, Universitat Jaume I, ISBN : 84-8021-047-8..
- SANCHEZ PEREZ, J. M., MORELL, I. (1994). Precauciones de uso de los tomamuestras de succion equipados con porcelana porosa. Investigación en zona no saturada. I. Morell (Ed): Investigación en zona no saturada, 9-15, Col.lecció Summa Ciències experimentals, Universitat Jaume I, ISBN : 84-8021-047-8..
- SANCHEZ-PEREZ, J. M., ANTIGUEDAD I., ARRATE I., RUIZ M., MORELL I. (1994). La zona no saturada y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). I. Morell (Ed): Investigación en zona no saturada, 53-66, Col.lecció Summa Ciències experimentals, Universitat Jaume I, ISBN : 84-8021-047-8.
- SARAGONI, H., POSS, R., OLIVER, R. (1990). Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du Sud du Togo. *L'Agronomie Tropicale*, 45, 259-273.
- SCOTTER, D.R., CLOTHIER, B.E. y HARPER, E.R. (1982). Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. *Aust. J. Soil. Res.*, 20, 295-304.

- SELKER, J.S., GRAFF, L., STEENHUIS, T. (1993). Noninvasive TDR moisture measurement probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 934-936.
- SILKWORTH, D.R., GRIGAL, D.F. (1981). Field comparison of soil solution samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 440-442.
- SMETTEN, K.R.J., PARLANGE, J.Y., ROSS, P.J., HAVERKAMP, R. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. *Water Resources Research*, 30, 2925-2929.
- STARR, R.M. (1985). Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a finnish forest soil. *Soil Science*, 140, 453-461.
- TALSMA, T., HALLAM, P.M., MANSELL, R.S. (1979). Evaluation of porous cup soil water extractors: physical factors. *Aust. J. Soil Res*, 17, 417-422.
- TOKUNAGA, T. (1992). The pressure response of the soil water sampler and possibilities for simultaneous soil solution sampling and tensiometry. *Soil Science*, 154, 171-183.
- TOPP, G.C., CULLEY, J.L.B. (1989). Correcting soil volumetric water contents from a direct reading TDR instrument (IRAMS). *Canadian Journal Soil Sci.*, 69, 701-704.
- TOPP, G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission. *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.
- 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. (1985a). Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (RDT): a field evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 19-24.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. (1985b). Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. In: *Avances in irrigation*, 3, 107-127, Academic Press Ed.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1982a). Electromagnetic determination of soil water content using RDT. I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1982b). Electromagnetic determination of soil water content using RDT. II. Evaluation of installation and onfiguration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 672-678.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., BAILEY, W.G., ZEBCHUK, W.D. (1984). The measurement of soil water content using a portable RDT hand probe. *Can. J. Soil Sci.*, 19, 313-321.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., CHINNICK, J.H. (1983). Using TDR water content measurement for infiltration studies. In: *Advances in infiltration*, ASAE Publication 11-83, 231-240.
- VAN DER PLOEG, R.R., BEESE, F. (1977). Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 466-470.
- VAN WESENBEECK, I.J., KACHANOSKI, R.G. (1988). Spatial and temporal distribution of soil water in the Tilled Layer under a corn crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 363-368.
- VANCLOOSTER, M., MALLANTS, D., VANDERBORGHT, J., DIEL, J., VAN ORSHOVEN, J., FEYEN, J. (1995). Monitoring solute transport in a multi-layered sandy lysimetre using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 337-344.
- VAUCLIN, M. y CHOPART, J.-L. (1992). L'infiltrométrie miltidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale*, 46, 259-270.
- WAGNER, G.H. (1962). Use of porous ceramic cups to sample soil water within the

- profile. *Soil Science*, 94, 379-386.
- WEBSTER, C.P., SHEPHERD, M.A., GOULDING, K.W.T., LORD, E. (1993). Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *Journal of Soil Sci*, 44, 49-62.
- WHALLEY, W.R. (1993). Considerations on the use of TDR for measuring soil water content. *Journal of Soil Sci*, 44, 1-9.
- WHITE, I. y SULLY, J. (1987). Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research*, 23, 1514-1522.
- YANAI, J., ARAKI, S., KYUMA, K. (1993). Use of a looped hollow fiber sampler as a device for nondestructive soil solution sampling from the heterogeneous root zone. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39 (4), 737-743.
- 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 Resour. Res.*, 25(11), 2367-2376.
- ZHAI, R, KACHANOSKI, R.G., VORONEY, R.P. (1990). Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 54, 186-192.