

OBSERVACIONES A ESCALA HORARIA DEL CONTENIDO DE AGUA EN LA ZONA NO SATURADA MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE CAPACITANCIA

M. Arauzo¹, J.A. Díez¹ y P. Hernáiz²

¹ Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Serrano 115dpdo., 28006 Madrid; mercedes@ccma.csic.es, jadies@ccma.csic.es

² Finca Experimental La Poveda, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Carretera de Camporreal Km 1.0, 28500 Arganda del Rey, Madrid; phernaiz@iai.csic.es

RESUMEN. El desarrollo de metodologías para el estudio de los procesos de lixiviación de contaminantes de origen difuso debe basarse en la elaboración de balances hídricos ajustados en la zona no saturada del suelo. Una de las metodologías más novedosas para el cálculo de balances hídricos propone el uso de sensores de capacitancia, que permiten la monitorización en continuo del contenido de agua en el perfil del suelo y la estimación del agua de drenaje, la evapotranspiración y el agua retenida en cada estrato del mismo. Con este trabajo se pretende profundizar en el conocimiento de esta metodología mediante la observación de las variaciones del contenido de agua en el suelo a escala horaria.

El estudio se ha desarrollado en una parcela instrumentalizada situada en la Finca Experimental La Poveda CCMA-CSIC (Comunidad de Madrid). Desde noviembre de 2003 a noviembre de 2004 se ha realizado el seguimiento del contenido de agua en el suelo, con frecuencia horaria, mediante la interpretación de datos obtenidos a partir de sensores de capacitancia situados a cinco niveles de profundidad (10, 40, 70, 120 y 150 cm) durante los periodos de cultivo de maíz e intercultivo. Se exploran, asimismo, los efectos de las diferentes formas de aporte de agua (lluvia y riego) y se establece una hipótesis que relaciona las variaciones circadianas de temperatura con la dinámica hídrica.

ABSTRACT. The development of methodologies for studying the leaching of diffuse source pollutants must rely on performing accurate water balances for the unsaturated zone of the soil. One of the most innovative methods to calculate water balances relies on the use of capacitance sensors, which allow continuous monitoring of water content in the soil profile and estimation of drainage, evapotranspiration and the amount of water retained in each stratum. The present work seeks to deepen the understanding of this new methodology; to this end, variations of water content at different depth levels resulting from rainfall and irrigation and the effects of farming practices have been studied on an hourly basis.

The research has been conducted in a sensor-equipped plot of land located at Finca Experimental La Poveda

CCMA-CSIC (Comunidad de Madrid, Spain). From November 2003 to November 2004, soil water content has been monitored through the interpretation of data gathered by capacitance sensors placed at five levels (10, 40, 70, 120 and 150 cm). During two periods, corresponding to maize growing season and inter-crop period, measurements of soil water content have been carried out on an hourly basis. The effects of farming practices and water inputs on soil water dynamics, as well as the influence of circadian temperature variations have been explored.

1. Introducción

La conservación de los recursos hídricos sólo parece factible si se responde al reto de la sostenibilidad. La aplicación de una política de gestión respetuosa con las directivas europeas que asegure el ahorro y protección de un recurso tan vulnerable frente a una demanda creciente de agua, pasa por buscar un punto de encuentro entre los conceptos de sostenibilidad y de producción agrícola. La agricultura consume hoy aproximadamente el 80% de los recursos hídricos y representa una fuente importante de contaminación difusa. El agua se ha convertido, por tanto, en un problema de primera magnitud para el medio agrario, siendo la modernización y la optimización de los sistemas de riego y abonado algunos de los aspectos que han de abordarse a la mayor brevedad (Archer y Thompson, 1993; Román et al. 1996; Sánchez et al. 1998; Rass et al. 1999; Díez, 2000; Díez et al. 2000). Para el seguimiento de los procesos de drenaje y lixiviación de contaminantes de origen difuso hacia las reservas de agua es necesario el desarrollo de metodologías que deben basarse en la elaboración de unos balances hídricos ajustados en la zona no saturada del suelo. Ramos y KücKe (1999) realizaron una revisión sobre los métodos de medida de lixiviación de nitrato en suelos agrícolas, evaluando los métodos de medida del drenaje. Para la medida del drenaje, referían como los métodos más comunes aquellos de tipo indirecto basados en el gradiente hidráulico, en el balance de agua o en los modelos de simulación. Respecto a la utilización de

métodos de tipo directo, señalaban como problemas principales el carácter puntual de la medida y la modificación del suelo durante a la instalación del equipo. La reciente introducción de las sondas de capacitancia (Sentek, 2000) en el estudio de la dinámica del agua en el suelo facilita la obtención de unos balances hídricos más ajustados a partir de datos recogidos en continuo. Paltineanu y Starr (1997), Starr y Paltineanu (1998), Fares y Alva (1999, 2000) y Arauzo et al. (2003) han sido pioneros en la utilización de sondas de capacitancia para el estudio de la dinámica del agua en el suelo. Arauzo et al. (2003) desarrolló un procedimiento para el cálculo de los balances hídricos en el suelo mediante la utilización de sensores de capacitancia (FDR) situados a diferentes niveles de profundidad, basado en la monitorización en tiempo real del contenido de agua en la zona radicular del suelo y en la zona situada por debajo de la misma.

En este trabajo se ha experimentado en campo con sensores FDR-EnviroSCAN® (Sentek Pty. Ltd., Australia), a escala horaria, con los objetivos de profundizar en la interpretación de las variaciones del contenido de agua en el suelo a distintos niveles de profundidad, de explorar los efectos de diferentes formas de aporte de agua (lluvia y riego), de comparar la influencia de las prácticas agrícolas de cultivo e intercultivo en los procesos de lixiviación y de interpretar el posible efecto las variaciones circadianas de temperatura sobre la dinámica hídrica. Son muy escasos los trabajos sobre el transporte de agua en el suelo que recogen observaciones a esta escala, destacando el estudio de Yamanaka y Yonetabi (1999) sobre el transporte en suelos arenosos y su relación con la radiación solar y la temperatura.

2. Material y métodos

El estudio se ha desarrollado en una parcela instrumentalizada situada en la Finca Experimental La Poveda CCMA-CSIC (Comunidad de Madrid, España). Desde noviembre de 2003 a noviembre de 2004 se ha realizado el seguimiento del contenido de agua en el suelo mediante la interpretación de datos obtenidos a partir de sensores de capacitancia situados a cinco niveles de profundidad. Durante dos periodos diferentes, correspondientes a las fases de cultivo de maíz e intercultivo, se han realizado observaciones a escala horaria de los contenidos de agua en el perfil del suelo, se ha interpretado la relación entre la dinámica hídrica y los aportes de agua (lluvia y riego) y se ha explorado la influencia de las variaciones microclimáticas.

El trabajo de campo se llevó a cabo sobre una parcela experimental de 100 m² de superficie, que forma parte de un conjunto de parcelas instrumentalizadas para el estudio de los procesos de lixiviación de nitrato de origen agrícola. El suelo de la parcela es un Xerofluent, de textura franco-arenosa (13% de arcilla) en el primer medio metro, con un incremento progresivo en la proporción de arenas hasta alcanzar el metro y medio de profundidad (2-3% de arcilla), nivel en el que empiezan a aparecer gravas. El nivel freático

fluctúa entre 3,75 y 4,25 m de profundidad a lo largo del año.

En la parcela se encuentra instalada una sonda EnviroSCAN, para la monitorización de las reservas de agua en el suelo, con cinco sensores de capacitancia situados a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad. Los sensores están conectados a un registrador de datos que recoge las medidas de capacitancia con frecuencia horaria. Los cálculos de los contenidos volumétricos de agua a partir de las medidas de capacitancia se realizaron mediante el *software* del sistema EnviroSCAN® (Sentek Pty. Ltd., Australia), utilizando la siguiente ecuación de calibración:

$$Y = 0,19570 * X^{0,40400} + 0,02852$$

Donde Y es la frecuencia universal, definida como “(lectura de capacitancia en aire – lectura de capacitancia en suelo) / (lectura de capacitancia en aire – lectura de capacitancia en agua)” y X es el contenido volumétrico de agua en el suelo, en mm. La ecuación tiene un coeficiente de determinación R²=0,97 y el coeficiente de variación es del 0,01%.

Los valores de temperatura del aire se obtuvieron de una estación meteorológica Vantage Pro Plus (Davis Instruments, Hayward, U.S.A.) que se encuentra situada junto a la parcela experimental y que almacena datos meteorológicos con frecuencia horaria en un registrador de datos. Los volcados de datos de los registradores de la sonda de capacitancia y de la estación meteorológica se efectuaron con frecuencia mensual. Los valores de contenido de agua en el suelo y de temperatura se han referido siempre al horario solar.

Durante un ciclo anual completo la parcela experimental recibió los siguientes tratamientos: el 15 de noviembre de 2003 se cosechó el maíz del cultivo anterior y se inició el periodo de intercultivo; el 20 de abril de 2004 se procedió a la siembra del cultivo de maíz, variedad Tector, con una densidad de siembra de 90000 plantas ha⁻¹; se dio un abono de fondo de 100 kg ha⁻¹ de sulfato potásico al 50% y 277 kg ha⁻¹ de superfosfato al 18% y un abono de nitrógeno (urea) en cobertera de 130 kg N ha⁻¹; los riegos se realizaron con pivot (previamente calibrado para obtener estimaciones más ajustadas sobre los aportes de agua) desde mediados de junio hasta comienzos de septiembre de 2004; la cosecha tuvo lugar el 18 de noviembre.

Los balances hídricos se realizaron según el procedimiento de Arauzo et al. (2003), que se basa en la monitorización mediante sensores de capacitancia, con frecuencia horaria, del contenido de agua en el estrato de suelo con mayor actividad radicular (hasta 75 cm de profundidad, para el cultivo de maíz) y en el estrato situado por debajo de la misma (75-155 cm de profundidad). Para cada periodo comprendido entre dos aportes de agua consecutivos, el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración, drenaje y agua retenida en cada estrato. Se ha considerado agua de drenaje aquella que supera el nivel de 155 cm de profundidad, debido a la textura gruesa en esta zona (grava) y a la proximidad del nivel freático.

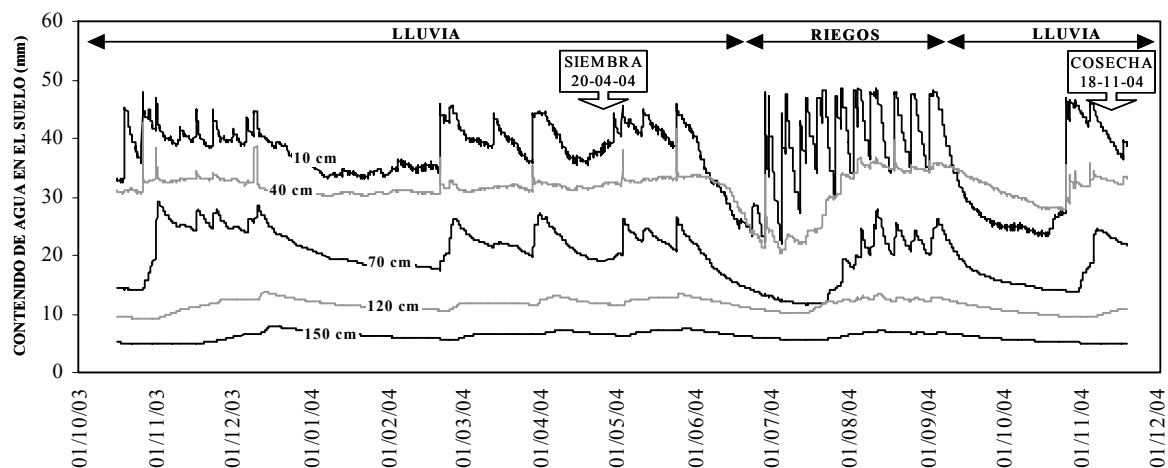


Fig. 1. Contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad durante un ciclo anual completo. Valores monitorizados con frecuencia horaria mediante sensores de capacitancia. Se señalan los periodos de riegos y lluvia y las fechas de siembra y cosecha del cultivo de maíz.

3. Resultados y discusión

En la Fig. 1 se muestra el curso temporal de los contenidos de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad durante un ciclo anual completo. Desde mediados de junio a finales de septiembre se observa un conjunto de picos, bien definido, que corresponde a los aportes de agua durante el periodo de riegos. El resto de las entradas de agua se debieron a aportes por lluvia. Las pendientes ascendentes a 120 y 150 cm indican recarga en las capas profundas (infiltración de agua gravitacional desde las capas superiores); las pendientes descendentes sugieren la existencia de procesos de drenaje desde las capas profundas hacia la zona saturada. Durante la época de riegos se observa drenaje abundante. Durante la fase de intercultivo se aprecian procesos de drenaje similares, con las lluvias de otoño, invierno y primavera. La curva de 10 cm de profundidad no sobrepasa los 48 mm, y en algunos casos no forma picos, sino mesetas. Este valor correspondería al nivel de saturación en la capa arable. Sólo se aprecian procesos de infiltración hacia las capas inferiores cuando el nivel de humedad a 10 cm de profundidad supera los 40 mm, valor que correspondería a la capacidad de campo. Valores superiores provocan la movilización de agua de gravitación, con picos en las capas inferiores atribuibles al flujo descendente (con cierto desfase temporal). En la Tabla 1 se muestran los balances hídricos para los periodos de intercultivo y cultivo de maíz, donde se observa que el drenaje medio diario durante la fase de cultivo (lluvias + riego) fue sólo ligeramente superior al de la fase de intercultivo (lluvias).

En las Fig(s). 2 y 3 se muestran los efectos de 16 episodios de aporte de agua sobre el perfil del suelo: 8 correspondientes a lluvias, durante el periodo de intercultivo, y 8 debidos a riegos (+ lluvia, en algunos casos), durante el cultivo. En ambos periodos se observa movilización del agua de gravitación cuando se satura la capa arable. Durante las lluvias del periodo de intercultivo el agua gravitacional presenta picos a 40, 70, 120 y 150 cm, con unos desfases temporales respecto al nivel de 10 cm de

2-5 horas, 3 días, 9-10 días y 12-20 días, respectivamente. El efecto de los riegos sobre las capas profundas resulta más inmediato (una vez superada la sequedad inicial del suelo; Fig. 3), con picos por drenaje de agua gravitacional a 40, 70 120 y 150 cm desfasados respecto al nivel superior 0,5-1 hora, 1 día, 2 días y 3-4 días, respectivamente. La mayor rapidez en los procesos de drenaje desencadenados por los riegos (fase de cultivo) en relación con los procedentes de las lluvias (fase de intercultivo), considerando aportes similares, podría ser atribuible a que la cantidad de agua que llega al suelo por unidad de tiempo suele ser muy superior durante los riegos.

Tabla 1. Balances hídricos durante los periodos de intercultivo y cultivo.

	Intercultivo 16-10-03 a 19-04-04	Cultivo de maíz 20-04-04 a 18-11-04
Nº de días	176	213
Entradas de agua:		
Lluvia (mm)	375	452
Riego (mm)	0	485
Total:	375	937
Distribución del agua:		
Evapotranspiración (mm)	230	804
Drenaje (mm)	90	138
Recarga de 0-75 cm (mm)	35	-2
Recarga de 75-155 cm (mm)	20	-3
Total:	375	937
Evapotransp. media diaria (mm/d)	1,3	3,8
Drenaje medio diario (mm/d)	0,5	0,6

En la Fig. 4 se representan los contenidos de agua en el suelo a 10 y 40 cm de profundidad, monitorizados con frecuencia horaria, durante cuatro días consecutivos del periodo de intercultivo sin aportes por lluvia (20-23 de marzo). A 10 cm de profundidad se produce una oscilación de periodicidad diaria en el contenido de agua, con mínimos hacia las 9:00 y máximos hacia las 17:30, observándose un aumento medio diario de $0,82 \pm 0,29$ mm (media \pm desviación estándar) durante esa franja horaria, sin haberse producido aportes externos de forma aparente. De 17:30 a 9:00 se produce una pérdida media diaria de $1,17 \pm 0,31$ mm. También se aprecia periodicidad diaria en la curva de 40 cm de profundidad, aunque más atenuada y con

un desfase de 5 h respecto a la curva de 10 cm. A 70 cm no se observa ninguna periodicidad ($21,45 \pm 0,20$ mm), si bien se dio una pérdida neta de 0,70 mm durante el periodo. Las curvas de tendencia descendente en las capas superficiales indicarían una pérdida neta hacia la atmósfera, dado que no se observó drenaje hacia las capas inferiores durante ese periodo: a 120 y 150 cm las humedades se mantuvieron constantes ($11,80 \pm 0,01$ mm y $6,54 \pm 0,00$ mm, respectivamente). En la Fig. 5 se muestran las variaciones de la temperatura del aire con frecuencia horaria durante el mismo periodo.

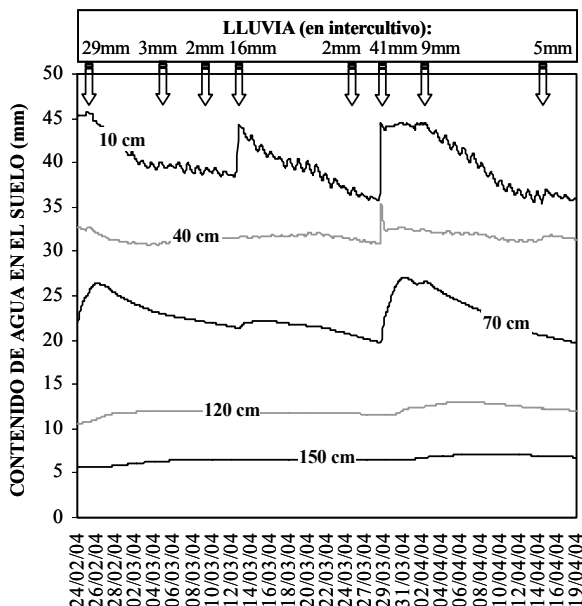


Fig. 2. Efecto de 8 episodios de lluvia sobre el contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad durante el periodo de intercultivo. Valores monitorizados con frecuencia horaria mediante sensores de capacitancia. Se indican los aportes de agua.

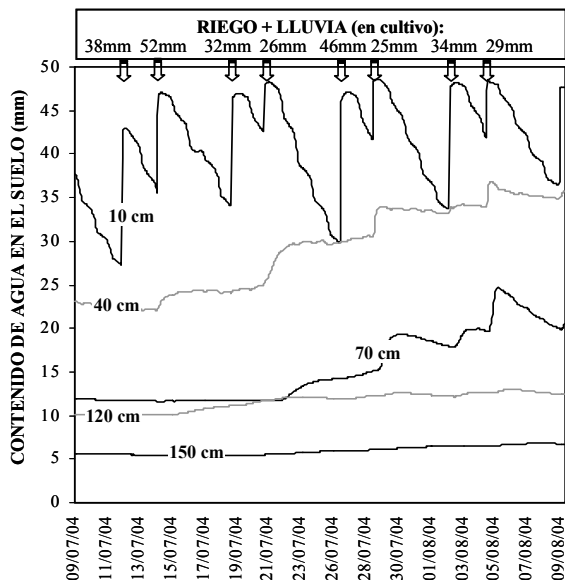


Fig. 3. Efecto de 8 episodios de riego sobre el contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad durante el periodo de cultivo. Valores monitorizados con frecuencia horaria mediante sensores de capacitancia. Se indican los aportes de agua.

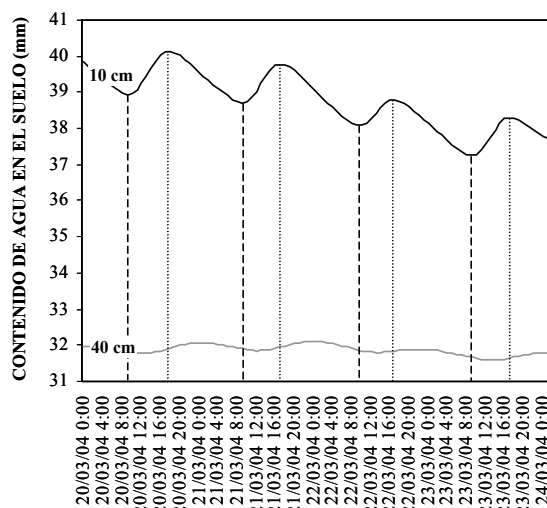


Fig. 4. Contenido de agua en el suelo a 10 y 40 cm de profundidad, con frecuencia horaria, durante cuatro días del periodo de intercultivo.

Durante el periodo de intercultivo, se observan correlaciones positivas significativas entre los contenidos de agua a 10 cm y 40 cm y la temperatura del aire, con desfase de 4 y 9 horas, respectivamente (Tabla 2). Los desfases temporales podrían ser atribuibles a la mayor inercia térmica del suelo, que se calienta y enfría con más lentitud que el aire. Para intentar explicar las ganancias diarias de agua a 10 cm (de 9:00 y 17:30) sin un aporte externo aparente, se ha elaborado una hipótesis que relaciona las variaciones circadianas de temperatura y dinámica de evaporación/condensación en los niveles superficiales. Según la misma, estas ganancias diarias de agua podrían ser atribuibles a movimientos ascendentes en forma de vapor a través de los poros del suelo desde los niveles de 40-70 cm (de curvas de tendencia descendente). Estos niveles intermedios perderían agua, que pasaría a fase gaseosa por efecto del aumento de temperatura y ascendería por el medio poroso, mientras que las zonas más profundas permanecería inalteradas (Fig(s). 2 y 4). Durante la tarde/noche, el aire en superficie se enfría con mucha más rapidez que el aire de la zona porosa del suelo. El proceso de difusión de la humedad desde el suelo hacia la atmósfera se mantendría durante esas horas (pendientes descendentes de 5:30 a 9 h), pero sin aportes por movimiento ascendente. Se alcanzarían situaciones momentáneas de equilibrio entre las humedades del aire y de los poros del suelo hacia las 9:30 y las 17:30 h. Yamanaka y Yonetabi (1999) observaron una dinámica similar de evaporación/condensación en los niveles superficiales de suelos arenosos sin cubierta vegetal, donde el transporte del agua en forma de vapor es dominante y dependiente de las variaciones de temperatura a lo largo del día. Es necesario, sin embargo, el desarrollo de nuevas investigaciones en este sentido, que contribuyan a contrastar las hipótesis planteadas hasta la fecha.

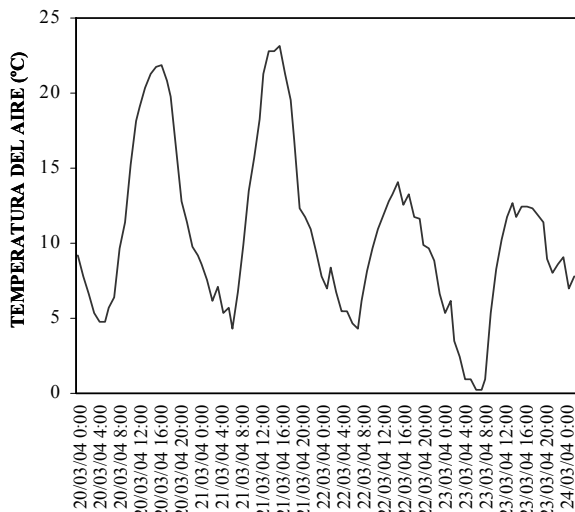


Fig. 5. Temperatura del aire. Valores monitorizados con frecuencia horaria durante cuatro días consecutivos del periodo intercultivo.

Tabla 2. Correlaciones (con desfase temporal) entre la humedad a 10 y 40 cm de profundidad y la temperatura del aire durante dos periodos (en cultivo e intercultivo); n: número de datos; **: significativo para $p < 0,001$; ns: no significativo. Se indica el desfase temporal, en horas.

	Intercultivo (20-23 de marzo)	Cultivo (22-25 de julio)
Humedad 10 cm vs. temperatura	0,77**(4 h) n=92	-0,38**(4 h) n=92
Humedad 40 cm vs. temperatura	0,85**(9 h) n=87	ns

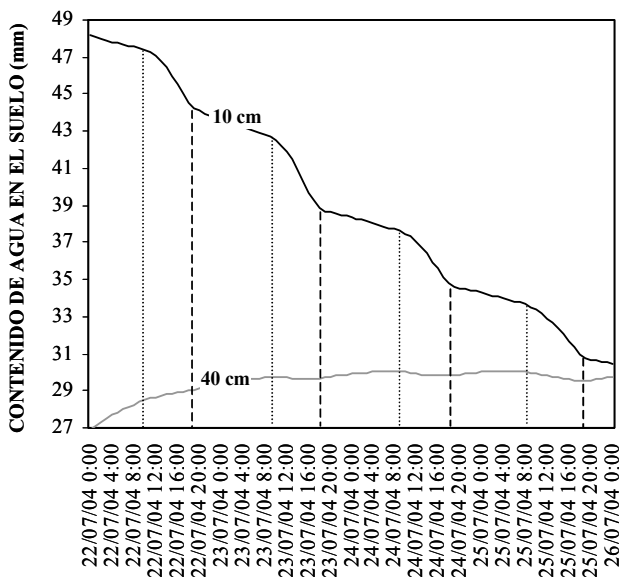


Fig. 6. Contenido de agua en el suelo a 10 y 40 cm de profundidad, con frecuencia horaria, durante cuatro días del periodo de cultivo de maíz.

En la Fig. 6 se representan los contenidos de agua a 10 y 40 cm de profundidad, monitorizados con frecuencia horaria durante cuatro días consecutivos del periodo de cultivo, sin aporte por riego o lluvia (22-25 de julio). A 10 cm de profundidad se observa una oscilación de periodicidad diaria y tendencia descendente

(evapotranspiración + drenaje). Las máximas pendientes se dan de 9:00 a 19:00 h, con una pérdida media diaria de $2,90 \pm 0,37$ mm, debida a la intensa evapotranspiración y al drenaje. Durante las 14 horas restantes la pérdida media es de $1,60 \pm 0,34$ mm, atribuible al drenaje y, en menor medida, a la evapotranspiración. A 40 cm se observa nuevamente periodicidad diaria, aunque más atenuada. La curva a 40 cm es, sin embargo, ascendente, como efecto de la movilización del agua gravitacional durante los días 22, 23 y anteriores, tras un riego a saturación. Los niveles de 70, 120 y 150 cm también mostraron curvas ascendentes, por recarga desde las capas superiores (Fig. 3). En la Fig. 7 se muestran las variaciones de la temperatura del aire durante el mismo periodo. Se da una correlación negativa entre el contenido de agua a 10 cm y la temperatura, con desfase de 4 horas, mientras que a 40 cm no se aprecia significación (Tabla 2). En este caso el proceso de drenaje dominante imposibilitaría los movimientos ascendentes del vapor a través de los poros del suelo desde las capas inferiores, hecho que explicaría que no se observen incrementos diarios de humedad durante las horas de la mañana, como se apreciaba en la Fig. 4.

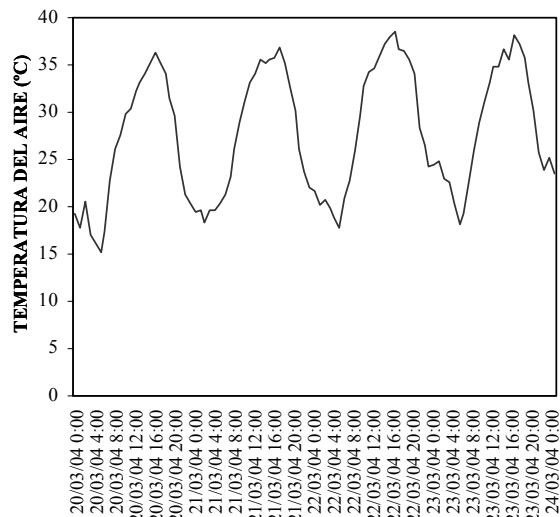


Fig. 7. Temperatura del aire. Valores monitorizados con frecuencia horaria durante cuatro días consecutivos del periodo de cultivo de maíz.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha experimentado con una sonda de capacitancia EnviroSCAN, que suministró datos de contenido de agua en el suelo con frecuencia horaria durante dos periodos con diferentes prácticas agrícolas (intercultivo y cultivo de maíz en regadío). El objetivo fue profundizar en la interpretación de las variaciones del contenido de agua en el suelo a distintos niveles de profundidad y su relación con diferentes formas de aporte de agua (lluvia o riego), con las prácticas agrícolas y con las variaciones circadianas de temperatura.

Al comparar el efecto de los drenajes procedentes de las lluvias durante la fase de intercultivo y de los riegos, en la fase de cultivo, se observa que los riegos movilizan el agua

gravitacional con mayor rapidez hacia las capas profundas del suelo, hecho atribuible a que el aporte de agua por unidad de tiempo suele ser muy superior durante los mismos. La movilización del agua gravitacional se produce cuando se supera la capacidad de campo en las capas más superficiales. Los factores implicados son: la cantidad de agua aportada, el grado de saturación de los niveles receptores, la evapotranspiración y el tiempo en el que se produce el aporte.

Las observaciones sobre las variaciones en el contenido de agua en el suelo, a escala horaria, durante cuatro días consecutivos del mes de marzo (intercultivo) y cuatro días del mes de julio (cultivo) revelan la existencia de ritmos circadianos de humedad en las capas más superficiales del suelo, posiblemente relacionados con las variaciones de temperatura a lo largo del día (con desfases temporales de 4-9 horas). Sin embargo, las curvas de humedad para ambos periodos no serían comparables, puesto que las condiciones ambientales y los procesos involucrados fueron diferentes. En marzo se observó un ritmo diario de ganancia de agua de 9:00 a 17:30 sin que se produjese ningún aporte aparente. Se ha elaborado una hipótesis para explicar este proceso que atribuiría tales incrementos a movimientos ascendentes en forma de vapor a través de los poros del suelo, alternados con periodos de pérdida, en concordancia con los ritmos circadianos de temperatura. Durante este periodo no se produjo drenaje, porque los niveles de humedad se encontraban por debajo de la capacidad de campo. En julio, sin embargo, como efecto de un riego a saturación en los días previos, el proceso de drenaje dominante imposibilitó los movimientos ascendentes del vapor a través de los poros del suelo, resultando una curva descendente, con pendientes muy acentuadas durante el día por efecto de la intensa evapotranspiración.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado con fondos del Proyecto del Plan Nacional I+D AGL2001-2214-C06-02. Nuestro agradecimiento al personal de la Finca Experimental La Poveda, por su valiosa colaboración en los trabajos de campo.

Referencias

- Arauzo, M., J.A. Díez, P. Hernáiz, 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. En: *Investigación de la zona no saturada, Vol. VI, ZNS'03* (J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, eds). Instituto Técnico Agrario de Castilla León, Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, 2003, 408 pp.
- Archer, J. y R. Thompson, 1993. *Solving the nitrate problem: Progress in research and development*. AFF Publ., London
- Díez, J.A. 2000. Optimización de la fertilización nitrogenada: procedimiento de análisis de suelo, toma de muestra y elección del tipo de fertilizante. *Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 6: 73-84.
- Díez, J.A., R. Caballero, R. Román, A. Tarquis, M.C. Cartagena y A. Vallejo, 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *J. Environ. Qual.* 29: 1539-1547.
- Fares, A. y K. Alva, 1999. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. *Soil Sci.* 164: 302-310.
- Fares, A. y K. Alva, 2000. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64: 311-318.
- Paltineanu, I.C. y J.L. Starr, 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 1576-1585.
- Ramos, C. y M. Kücke, 1999. Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas: 25-32. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón ICIA Tenerife.
- Rass, D.P., J.T. Ritchie, W.R. Peterson, T.L. Loudon y E.C. Martin, 1999. Nitrogen management impacts on yield and nitrate leaching in inbred maize systems. *J. Environ. Qual.* 28: 1365-1371.
- Román, R., R. Caballero, A. Bustos, J.A. Díez, M.C. Cartagena, A. Vallejo y A. Caballero, 1996. Water and solute movement under conventional corn in Central Spain: I. Water balance. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 60: 1530-1536.
- Sánchez, L., J.A. Díez, A. Vallejo, M.C. Cartagena y A. Polo, 1998. Estimate of mineralized organic nitrogen in soil using nitrogen balances and determining available nitrogen by the electro-ultrafiltration technique. Application to Mediterranean climate soil. *J. Agric. Food Chem.*, 46: 2036-2043.
- Sentek, 2000. *EnviroSCAN manual*. 1999-2000 Sentek Pty Ltd; EnviroSCAN Versión 4.1. www.sentek.com.au.
- Starr, J.L. y I.C. Paltineanu, 1998. Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 114-122.
- Yamanaka T. y T. Yonetabi, 1999. Dynamics of evaporation zone in dry sandy soils. *J. Hydrol.* 217:135-148