

COMPARACIÓN DE UN MÉTODO DIRECTO Y UN MÉTODO INDIRECTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL DRENAJE Y EL BALANCE HÍDRICO EN LA ZONA NO SATURADA

M. Arauzo¹, J. A. Díez¹, J. J. Martínez-Bastida¹, M. Valladolid², P. Hernáiz³

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

² Departamento de Biodiversidad y Biología Evolutiva, Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. marval@mncn.csic.es

³ 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 procedimientos precisos para la estimación del balance hídrico y las pérdidas de agua por drenaje en la zona no saturada se hace indispensable, habida cuenta de la necesidad de abordar los problemas de contaminación difusa que afectan con frecuencia a las masas de agua subterráneas. Sin embargo, las técnicas para medir el flujo de agua en la zona no saturada en condiciones de campo presentan ciertas limitaciones. Los métodos indirectos no permiten realizar comprobaciones de los resultados con medidas experimentales, además de presentar una incertidumbre en la estimación de parámetros como la evapotranspiración. Los métodos directos (lisímetros clásicos), por otra parte, pueden modificar la estructura del suelo durante la instalación, ocasionando flujos preferenciales y alterando las características naturales del drenaje en el perfil del suelo.

En la Finca Experimental La Poveda (CCMA-CSIC) se ha experimentado a lo largo de un ciclo anual completo (cultivo de maíz e intercultivo) con el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee. Mediante esta tecnología novedosa, que permite conservar inalterada una parte del perfil del suelo, se obtuvo la medida directa y en continuo del agua de drenaje con frecuencia horaria. La monitorización de la humedad del suelo se realizó mediante una sonda FDR-EnviroSCAN. Las mediadas de drenaje y los balances hídricos obtenidos por el método directo, basados en el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee, se han comparado con los estimados mediante el método indirecto del balance hídrico, a partir del cálculo de la evapotranspiración del cultivo (Allen et al., 1998). La similitud de resultados al comparar ambos métodos aporta información que contribuye a validar la utilidad del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee en la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada.

ABSTRACT. The prevention of diffuse groundwater pollution requires the development of accurate methods for the estimation of water balance in the unsaturated zone of the soil. The current techniques used to estimate soil-water flux in that zone present several limitations. Indirect methods do not always permit the verification of experimental measurements, and the estimation of the parameters of processes like the evapotranspiration is

sometimes very difficult. On the other hand, direct methods like the use of conventional lysimeters can disturb the soil structure during installation, inducing preferential fluxes and modifying the natural drainage of the profile.

A soil water balance experiment has been conducted at *Finca Experimental La Poveda* (CCMA-CSIC) over an annual cycle (growing and non-growing period of a corn crop). The plot was equipped with a Gee Passive Capillary Lysimeter, for continuous monitoring of deep drainage, which leaves part of the soil profile undisturbed. Soil moisture was monitored using a FDR-EnviroSCAN probe. Water balances and drainage obtained from the direct method (Gee Passive Capillary Lysimeter) were compared with those estimated by the indirect method of the water balance, based on daily crop evapotranspiration (Allen et al., 1998). Both methods gave similar results, which provides an interesting contribution towards validating the use of Gee Passive Capillary Lysimeter for the estimation of drainage and water balance in the unsaturated zone.

1.- Introducción

El debate sobre la regeneración y conservación de las masas de agua subterráneas situadas en zonas vulnerables debe basarse en la convergencia de dos estrategias hasta ahora escasamente relacionadas: la política agraria (vía desarrollo rural) y la política de gestión de los recursos hídricos. La elaboración de una estrategia conjunta para la gestión del agua y de los usos del suelo bajo el principio de sostenibilidad, requiere de una mejor comprensión de la respuesta de los sistemas hidrológicos a los impactos derivados de causas naturales y humanas. Considerando que la agricultura consume aproximadamente el 80% del agua y representa una fuente importante de contaminación difusa, es decisivo reconocer que la agricultura es el sector donde hay más posibilidades de mejorar la calidad y conservación de las masas de agua. La gestión sostenible del agua se ha convertido en un reto para el medio agrario, debiendo abordarse, entre otros, aspectos como la modernización de los sistemas de riego y la optimización en la aplicación de los fertilizantes (Archer y Thompson, 1993; Rass et al., 1999;

Domingo-Olivé et al., 2005; Quemada et al., 2006; Andreu et al., 2006). Tanto las investigaciones que se desarrollan en el ámbito agrario, como las orientadas hacia la protección de los recursos hídricos subterráneos, necesitan profundizar en las interacciones entre la zona no saturada y la zona saturada. El estudio de los procesos de contaminación difusa en acuíferos de zonas potencialmente vulnerables (Arauzo et al., 2006) también requiere de información sobre los drenajes y las cargas de lixiviados a escala de cuenca. Se hace indispensable, por tanto, el desarrollo de procedimientos precisos para la estimación de los balances hídricos en la zona no saturada y de las pérdidas de agua por drenaje hacia la zona saturada. Estas metodologías deben ser plenamente operativas y fiables en condiciones de campo, tanto en los estudios de carácter extensivo, como en los que se desarrollan en parcelas experimentales.

Los métodos indirectos para la medida del flujo de agua en la zona no saturada, basados en la representación dinámica del flujo del agua a partir de determinadas ecuaciones, o en el balance del volumen de agua en un periodo de tiempo (Wagenet, 1986), no permiten realizar comprobaciones de los resultados con datos experimentales, además de presentar una incertidumbre en la estimación de parámetros como la conductividad hidráulica o la evapotranspiración. Por otra parte, los métodos directos (lisímetros clásicos, etc.) modifican la estructura del suelo durante la instalación, ocasionando flujos preferenciales y alterando las características naturales de drenaje en el perfil del suelo. Hasta la fecha, no se ha establecido un método estandarizado para la medida del drenaje y la solución drenante (Ministerio de Medio Ambiente, 2001). Ramos y Kücke (1999) realizaron una revisión crítica sobre los métodos de medida de lixiviación de nitrato en suelos agrícolas, evaluando tanto los métodos de medida del drenaje, como los de estimación de la concentración de nitrato en la solución del suelo. Para la medida del drenaje, referían como los más comunes aquellos métodos de tipo indirecto basados en el gradiente hidráulico, el balance de agua o los modelos de simulación. Respecto a las limitaciones en la utilización de métodos de tipo directo, señalaban como problemas principales el carácter puntual de la medida y la modificación del suelo durante la instalación del equipo.

En este trabajo se ha experimentado a lo largo de un ciclo anual completo con el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee (Gee et al., 2002) en un suelo agrícola, durante un periodo de cultivo de maíz y el periodo posterior de intercultivo. La tecnología del Lisímetro está basada en un método novedoso de tipo directo de medida que permite, entre otras prestaciones, la monitorización en continuo del agua de drenaje en la zona más profunda del suelo. Por otra parte, al conservarse inalterada una parte del perfil del suelo durante la instalación, las limitaciones referidas por Ramos y Kücke (1999) respecto a otros métodos de tipo directo se verían cuestionadas en este caso.

El principal objetivo de la investigación consiste en la comparación de un método de tipo directo, basado en la utilización del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee, y un método indirecto clásico (ampliamente utilizado), basado en el balance hídrico a partir del cálculo de la evapotranspiración del cultivo (Allen et al., 1998), para la estimación de los balances hídricos en la zona no saturada y las pérdidas de agua por drenaje. Las medidas de humedad en el perfil del suelo, monitorizadas mediante sensores FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) de una sonda EnviroSCAN (Sentek, 2000), permitirán completar los balances hídricos realizados mediante los dos métodos de estimación, aportando información sobre las variaciones del contenido de agua en el perfil del suelo durante los periodos de cultivo e intercultivo. La comparación de métodos aportará información que contribuirá a valorar la utilidad del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee en la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada y su operatividad en condiciones reales de campo.

2.- Material y métodos

2.1. Parcela de cultivo, labores e instrumentación

El estudio se llevó a cabo en la Finca Experimental La Poveda (Arganda del Rey, Comunidad de Madrid), que gestiona el Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC. Su duración fue de un ciclo anual completo, con dos periodos diferenciados: cultivo de maíz (desde el 15 de abril hasta el 21 de noviembre de 2005) y periodo posterior de intercultivo (desde el 22 de noviembre de 2005 hasta el 4 de abril de 2006).

El trabajo de campo se desarrolló sobre una parcela de 40000 m² de superficie. En la Tabla 1 se muestran algunos parámetros relacionados con las propiedades del suelo de la parcela. El suelo es un Xerofluvent, de clase textural franco arenosa (clasificación USDA) en el primer medio metro, con un incremento progresivo en la proporción de arena hasta alcanzar el metro y medio, profundidad a la que empiezan a aparecer gravas. El nivel freático fluctúa entre 3.75 y 4.25 m a lo largo del año.

Durante el periodo experimental se realizaron las siguientes labores: el 12 de abril de 2005 se aplicó un abono de fondo de 100 UF de potasio, en forma de sulfato potásico al 50%, y 100 UF de fósforo, en forma de superfosfato al 46%; el 15 de abril se procedió a la siembra del maíz, variedad Dracma, con una densidad de 90000 plantas ha⁻¹; el 1 de junio se aplicó un abono de nitrógeno en cobertera de 150 kg N ha⁻¹ (urea al 46% de N); durante el periodo de cultivo se dieron un total de 26 riegos, mediante sistema de pívot (previamente calibrado, para obtener estimaciones ajustadas sobre los aportes de agua por riego); la cosecha se realizó el 21 de noviembre de 2005. Desde el 21 de noviembre de 2005 hasta el 1 de febrero de 2006 se mantuvo el suelo sin cultivar, con una cobertura de restos de materia vegetal del 50%, aproximadamente. Posteriormente se aplicaron labores para incorporar los restos de materia orgánica al suelo, evitar el crecimiento de malas

hierbas y preparar la parcela para la siembra siguiente (periodo de suelo desnudo).

Tabla 1. Propiedades del suelo en la parcela de cultivo, de 0 a 30 cm de profundidad (media $\pm$ desviación típica)

Arena USDA (%)	52 $\pm$ 12
Limo USDA (%)	35 $\pm$ 9
Arcilla (%)	13 $\pm$ 5
Permeabilidad (mm h ⁻¹)	18.0 $\pm$ 2.4
Densidad aparente (Kg m ⁻³)	1450 $\pm$ 50
Capacidad de campo (pF=2,5, %)	21.1 $\pm$ 0.2

La instrumentalización de la parcela de cultivo consta de un Lisímetro Pasivo Capilar de Gee, una sonda EnviroSCAN y una estación meteorológica Vantage Pro Plus. El Lisímetro Pasivo Capilar de Gee se utilizó para registrar la medida directa y en continuo del agua de drenaje (la metodología se describe en el apartado siguiente, 2.2). La monitorización de la humedad en el perfil del suelo se realizó mediante una sonda EnviroSCAN, dotada de cinco sensores FDR situados a 10, 30, 60, 110 y 140 cm de profundidad. Los sensores se encuentran 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 un programa informático del sistema EnviroSCAN® (Sentek Pty. Ltd., Australia), utilizando la ecuación de calibración (1):

$$Y = 0.19570 \cdot X^{0.40400} + 0.02852 \quad (1)$$

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 $R^2=0.97$ y el coeficiente de variación es del 0.01%. El programa informático del sistema EnviroSCAN permite realizar estimaciones interpoladas del contenido de agua en el estrato de suelo situado entre dos o más sensores (interpolación sólo válida en el caso de estratos de textura y estructura uniformes). Utilizando este procedimiento, se estimó el contenido de agua en el perfil del suelo (de 0 a 110 cm de profundidad) en las fechas de siembra, cosecha y finalización del periodo de intercultivo. Por diferencia, se obtuvo el incremento o la pérdida de agua en el perfil de suelo (ΔH) durante los periodos de cultivo e intercultivo. Los datos meteorológicos para la estimación la evapotranspiración del cultivo (ETc; Allen et al., 1998) se obtuvieron de una estación meteorológica Vantage Pro Plus (Davis Instruments, Hayward, U.S.A.) situada junto a la parcela de cultivo, dotada de un registrador de datos que opera con frecuencia horaria.

2.2. Método directo: Lisímetro Pasivo Capilar de Gee

El Lisímetro Pasivo Capilar de Gee (Fig. 1) permite realizar medidas en continuo del agua de drenaje en la zona no saturada y toma de muestras para el análisis de lixiviados (Gee et al., 2002). Consta de un tubo de control de divergencia (TCD) de 66 cm de altura y 20 cm de diámetro, un elemento colector y de medición, y un registrador de datos Em5 (Decagon Devices Inc., Pullman-Washington).

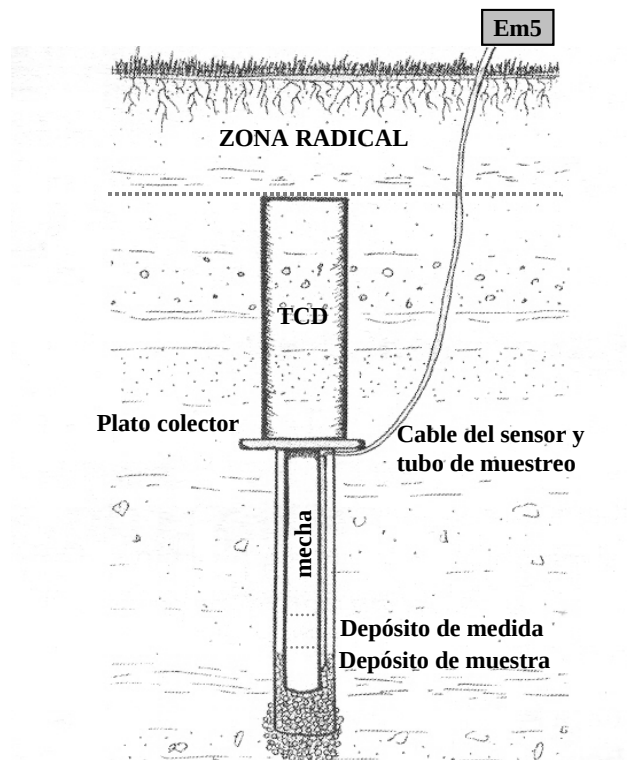


Fig. 1. Esquema del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee.

Se eligió el método de instalación del “monolito intacto”, que permitió mantener inalterado el estrato de suelo que queda en el interior del TCD. El Lisímetro se instaló por debajo de la zona radical, situando el TCD entre 44 y 110 cm de profundidad y el plato colector a 110 cm. El funcionamiento es el siguiente: cuando se produce drenaje, el agua gravitacional penetra por la parte superior del TCD hasta llegar al plato colector. En el plato hay una fibra textil y una mecha que ejerce una tensión y provoca que el agua descienda por el tubo colector hasta el depósito de medida, situado en este caso a 198 cm de profundidad. Un sensor de nivel en el depósito envía señales al registrador de datos a medida que el depósito se va llenando. La resolución del aparato para la medida del drenaje es de 1mm. Cuando el nivel del agua alcanza la parte superior del tubo del sifón, el depósito se vacía y el agua pasa a un depósito inferior, ideado para la extracción de muestras del agua de drenaje y posterior análisis de lixiviados. Durante el experimento, se estableció un intervalo de medidas del drenaje de 60 minutos.

Los balances hídricos, correspondientes a los periodos de cultivo e intercultivo, se elaboraron a partir de la ecuación (2):

$$P + R = (ETc + \Delta H) + D \quad (2)$$

donde,

P = Precipitación (mm).

R = Riego (mm).

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm).

ΔH = Variación de la reserva de agua en el suelo (mm).

D = Drenaje (mm).

P y R se obtuvieron mediante medidas de tipo directo, con frecuencia diaria. Los valores de D , obtenidos mediante medida directa con el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee con frecuencia horaria, se agruparon para obtener valores diarios de drenaje. " $ETc + \Delta H$ " se calculó por diferencia, a partir de la ecuación del balance hídrico. ΔH se obtuvo a partir de la información sobre humedad en el perfil del suelo de la sonda EnviroSCAN, y permitió despejar el valor de ETc para cada periodo.

2.3. Método indirecto

Los balances hídricos estimados mediante el método indirecto se elaboraron a partir de la ecuación (3):

$$P + R = ETc + (\Delta H + D) \quad (3)$$

P y R se obtuvieron mediante medidas de tipo directo, con frecuencia diaria (igual que en el método anterior). La evapotranspiración diaria del cultivo (ETc ; Allen et al., 1998) se estimó mediante la ecuación (4):

$$ETc = ETo \cdot Kc \quad (4)$$

donde,

ETo = Evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}), estimada con frecuencia diaria a partir de datos meteorológicos, según la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Kc = Coeficiente del cultivo (adimensional), estimado a partir de los estados fenológicos y los datos meteorológicos durante el periodo de cultivo, y de las condiciones del suelo, durante la fase sin cultivo (Tabla 2) (Allen et al., 1998).

" $\Delta H + D$ " se estimó por diferencia, a partir la ecuación del balance hídrico. La variación de la reserva de agua en el suelo (ΔH) se obtuvo a partir de la información sobre humedad en el perfil del suelo de la sonda EnviroSCAN, y permitió despejar el drenaje (D) para cada periodo.

Tabla 2. Valores diarios adoptados para Kc . MO: materia orgánica vegetal, con una cobertura aproximada del 50%

Estadios de crecimiento		Kc
CULTIVO 15-4-05 a 21-11-05	Inicial, 30 días	0.22
	Desarrollo, 50 días	0.22-1.30
	Medio, 30 días	1.30
	Final, 40 días	1.30-0.11
	Planta seca, 71 días	0.11
INTERCULTIVO 22-11-05 a 4-4-06	Suelo con restos de MO, 71 días	0.17
	Suelo desnudo, 63 días	0.22

3.- Resultados y discusión

En la Fig. 2 se representa la distribución de los aportes de agua diarios, por lluvia y riego, durante el experimento. Los aportes por lluvia a lo largo de ciclo anual fueron escasos (207 mm), como corresponde al periodo de sequía que afectaba a la zona en 2005 y 2006. Durante el periodo de cultivo, se realizaron riegos aislados desde abril a mediados de junio, momento en el que se empezaron a aplicar dos riegos semanales (39 mm y 30-35 mm, martes y jueves, respectivamente), hasta completar un total de 26 aplicaciones.

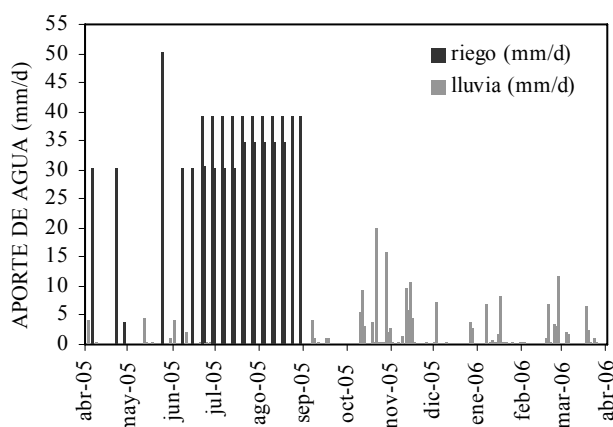


Fig. 2. Aporte de agua por lluvia y riego durante el experimento.

La Fig. 3 muestra los valores diarios acumulados de aporte de agua, drenaje y, por diferencia, " $ETc + \Delta H$ ". En este caso los drenajes diarios se obtuvieron a partir de medidas directas del drenaje con frecuencia horaria, almacenadas por el registrador de datos de Lisímetro Pasivo Capilar de Gee.

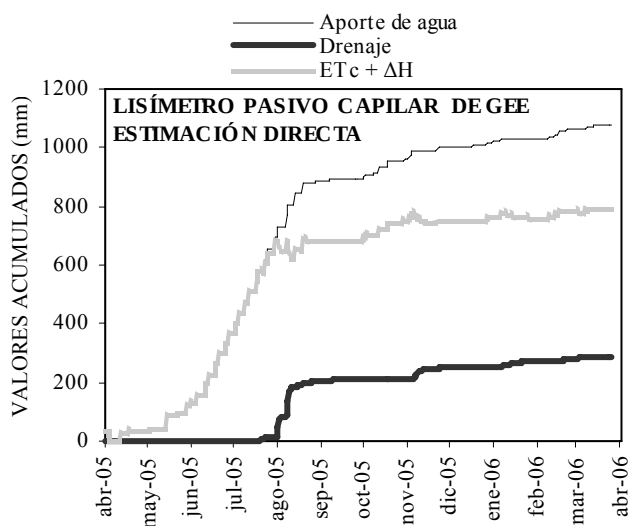


Fig. 3. Valores diarios acumulados de aporte de agua ($P + R$), Drenaje (método directo: Lisímetro Pasivo Capilar de Gee) y " $ET_c + \Delta H$ " durante el experimento.

La representación de los valores acumulados de la evapotranspiración del cultivo, estimada mediante el método indirecto de balance hídrico, se muestra en la Fig. 4. También se representan los valores acumulados de aporte de agua y, por diferencia, " $D + \Delta H$ ".

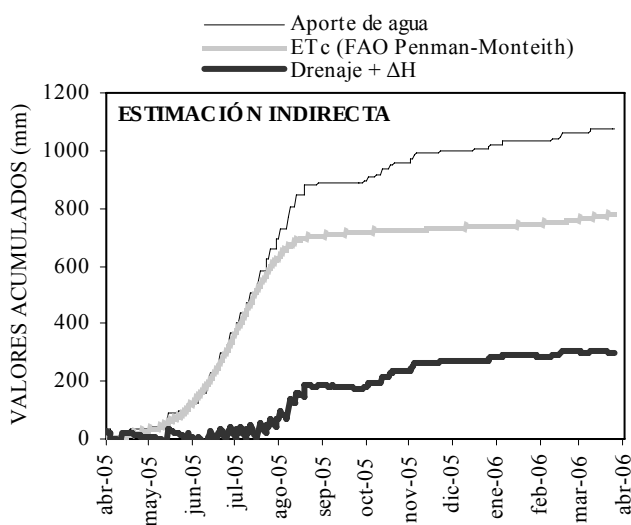


Fig. 4. Valores diarios acumulados de aporte de agua ($P + R$), ET_c (estimación indirecta) y " $D + \Delta H$ " durante el experimento.

Al comparar las Figs. 3 y 4 se observa que los resultados obtenidos mediante los métodos de estimación directo e indirecto son muy similares. En ambos casos se aprecia que durante los meses de junio y julio la evapotranspiración diaria alcanzó los valores máximos, en concordancia con los aportes de agua (eficiencia óptima de riego, según las necesidades del cultivo). Apenas se produce drenaje durante este periodo. Los

aportes por riego durante la primera quincena del mes de agosto fueron similares a los de los dos meses anteriores (véase la Fig. 2), sin embargo, la evapotranspiración resultó menos intensa que en el periodo anterior, puesto que el cultivo iniciaba ya su estadio de madurez fisiológica y las condiciones climatológicas eran más favorables. La descompensación entre el aporte de agua, en exceso, y la evapotranspiración del cultivo dio lugar a la aparición de procesos de drenaje, que adquirieron su máxima intensidad durante la primera quincena de agosto.

El desglose de los balances hídricos en todos sus componentes, ha sido posible introduciendo en cada balance el valor de ΔH (incremento o la pérdida de agua en el perfil de suelo) durante cada periodo, estimado a partir de las mediciones de la humedad en el suelo con la sonda EnviroSCAN. En la Tabla 3 se presentan los balances hídricos para los periodos de cultivo e intercultivo, estimados mediante el método directo (Lisímetro Pasivo Capilar de Gee) y el método indirecto (balance hídrico; Allen et al., 1998). Se han obtenido valores de drenaje y evapotranspiración muy similares a partir de ambos métodos, con unas dispersiones relativas muy bajas (coeficiente de variación entre métodos para los valores de drenaje durante los periodos de cultivo e intercultivo: 0.3% y 1.7%; coeficiente de variación entre métodos para los valores de evapotranspiración durante los periodos de cultivo e intercultivo: 0.1 % y 1.4 %).

De estos resultados (Figs. 3 y 4; Tabla 3) puede concluirse que, en el tipo de suelo en el que se ha desarrollado el experimento, y utilizando el método del "monolito intacto" para la instalación del Lisímetro, no se observan diferencias apreciables en la aplicación del método directo y el método indirecto.

Tabla 3. Balances hídricos durante los periodos de cultivo e intercultivo, estimados mediante métodos de tipo directo (Lisímetro Pasivo Capilar de Gee) e indirecto (balance hídrico, según Allen et al., 1998). ΔH se estimó mediante tecnología FDR- EnviroSCAN.

	CULTIVO		INTERCULTIVO	
	15-4-05 a 21-11-05		22-11-05 a 4-4-06	
Lluvia (mm)	122		85	
Riego (mm)	868		0	
APORTE TOTAL DE AGUA (mm)	990		85	
LISÍMETRO PASIVO CAPILAR DE GEE:				
" $ET_c + \Delta H$ " (mm)	748		43	
ΔH (mm)	22		-8	
ET_c (mm)	726		51	
D (mm)	242		42	
CONSUMO TOTAL DE AGUA (mm)	990		85	
MÉTODO INDIRECTO:				
ET_c (mm)	725		52	
" $D + \Delta H$ " (mm)	265		33	
ΔH (mm)	22		-8	
D (mm)	243		41	
CONSUMO TOTAL DE AGUA (mm)	990		85	

En este experimento no se ha contemplado explícitamente el efecto de la variabilidad espacial de la parcela. Puede interpretarse que el método indirecto proporciona información sobre la totalidad del cultivo, puesto que se basa en el cálculo de ET_c, a partir de los estados fenológicos del mismo y de datos meteorológicos. Sin embargo, el método directo aporta información más local, correspondiente al área en el que se encuentra instalado el Lisímetro. La gran coincidencia en los resultados de los dos métodos sugiere, en este caso, una escasa variabilidad textural en la superficie de la parcela en la que, además, se han efectuado aportes de agua muy uniformes.

La experimentación con el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee durante un ciclo anual completo ha resultado satisfactoria, por la precisión obtenida en los resultados. La dotación del Lisímetro puede completarse, si se desea, con sensores FDR y con un pluviómetro, de manera que, un solo aparato (de bajo consumo y amplia autonomía en el registro de los datos) proporciona información cuantitativa del drenaje, el aporte de agua y la humedad del suelo en tiempo real, además de facilitar la extracción de muestras del agua de drenaje para el análisis de lixiviados. La parte más delicada es el proceso de instalación del aparato. En este caso se optó por un sistema de instalación que preservase inalterado un amplio estrato del perfil del suelo (método del monolito intacto). Sin embargo, no siempre se dan las condiciones óptimas para esta clase instalación (pe., suelos pedregosos). Es necesario, por tanto, continuar realizando validaciones, en distintos tipos de suelo, bajo diferentes condiciones de uso, con el fin de reunir información suficiente que avale el uso del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee en las investigaciones de campo, tanto de carácter extensivo, como en parcela experimental.

4.- Conclusiones

Durante de un ciclo anual completo (cultivo de maíz e intercultivo) se ha experimentado con el Lisímetro Pasivo Capilar de Gee, tecnología novedosa para la monitorización directa, y en continuo, del agua de drenaje en la zona más profunda del suelo.

Los resultados del estudio indican que los balances hídricos y los drenajes obtenidos a partir del método de tipo directo (basado en la utilización del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee), y los estimados mediante el método indirecto (balance hídrico a partir del cálculo de la evapotranspiración del cultivo; Allen et al., 1998), resultaron muy similares, tanto durante el periodo de cultivo, como durante la fase posterior de intercultivo.

La monitorización de humedad en el perfil del suelo mediante sensores FDR permitió completar los balances hídricos obtenidos a partir del método directo y del método indirecto, aportando información sobre las variaciones del contenido de agua en el perfil del suelo.

La instalación del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee se revela, quizá, como la parte más delicada del proceso. El

sistema de instalación del “monolito intacto”, que permite preservar inalterado un estrato del perfil del suelo, resultó idóneo para el suelo de la parcela experimental (clase textural franco arenosa), si bien no es aplicable en otros tipos de suelo.

La similitud de resultados en las estimaciones de los balances hídricos y de los drenajes a partir de los métodos directo e indirecto, contribuye a validar la utilidad del Lisímetro Pasivo Capilar de Gee y su aplicabilidad en estudios sobre contaminación difusa de las aguas subterráneas. Es necesario, sin embargo, continuar recopilando información sobre idoneidad de este tipo de tecnología en otros tipos de suelo y bajo diferentes condiciones de uso del suelo.

Agradecimientos. Este trabajo se ha llevado a cabo mediante el Proyecto de Investigación GR/AMB/0745/2004, financiado por la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, el Fondo Europeo para Desarrollo Regional y el Fondo Social Europeo. La Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y el Fondo Social Europeo han colaborado con la dotación de una beca de Formación de Personal Investigador. Nuestro especial agradecimiento al personal de la Finca Experimental La Poveda, por su valiosa colaboración en los trabajos de campo.

Bibliografía

- Allen, R.G., L.A. Pereira, D. Raes, M., Smith, 1998. *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. Roma. 300 pp.
- Andreu, J., J. Betrán, I. Delgado, J.L. Espada, M. Gil, M. Gutiérrez, F. Iguácel, R. Isla, F. Muñoz, F. Orús, M. Pérez, D. Quílez, E. Sin, M.R. Yagüe, 2006. *Fertilización nitrogenada. Guía de actualización*. Informaciones Técnicas. Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura y Alimentación. Zaragoza. 196 pp.
- Arauzo, M., M. Valladolid, J.J. Martínez-Bastida, C. Gutiérrez, 2006. Dinámica espacio-temporal del contenido en nitrato de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Oja (La Rioja, España): vulnerabilidad del acuífero aluvial. *Limnetica* 25: 753-752.
- Archer, J. y R. Thompson, 1993. *Solving the nitrate problem: Progress in research and development*. MAFF Publ., Londres.
- Domingo-Olivé, F., J. Serra, A. Roselló, N. Teixidor. 2005. Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego. En: *VII Jornadas de Investigación de la Zona No Saturada del Suelo* (F.J. Samper, A. Paz, Eds.). Universade da Coruña, Xunta de Galicia. 371 pp.
- Gee, G.W., A.L. Ward, T.G. Caldwell, J.C. Ritter, 2002. A vadose-zone water-flux meter with divergence control. *Water Res. Res.*, 38: 1141-1141.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2001. *Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos*. Secretaría de estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas, Madrid.
- Quemada, M. (Ed.), 2006. *Balance de nitrógeno en sistemas de cultivo de cereal de invierno y de maíz en varias regiones españolas*. Monografías INIA: Serie Agrícola, nº 22. Madrid. 143 pp.
- 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.
- Ramos, C. y M. Kücke, 1999. Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas: 25-32. En: *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA. La Laguna, Tenerife.
- Sentek, 2000. *EnviroSCAN manual*. 1999-2000 Sentek Pty Ltd; EnviroSCAN Versión 4.1. www.sentek.com.au.
- Wagenet, R. J., 1986. Principles of modelling pesticide movement in the unsaturated zone: 330-341. En: *Evaluation of Pesticides in Groundwater* (W. Y. Garner et. al., eds.), ACS Symp. Ser., Washington.