

ESTIMACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS Y LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

M. Arauzo¹, J.A. Díez¹ y P. Hernáiz²

¹ Departamento de Contaminación y Química 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 exceso de fertilización nitrogenada en las prácticas agrícolas constituye una importante fuente de contaminación difusa que contribuye al aumento de la concentración de nitrato en las aguas superficiales y subterráneas. La precisión en la dosificación de los fertilizantes, el manejo adecuado de los mismos y la optimización de los sistemas de riego, son aspectos que deben ser abordados a fin de minimizar los procesos de lixiviación de nutrientes hacia las reservas de agua. En este contexto, el conocimiento de la dinámica del agua en los suelos agrícolas es un requisito indispensable para la obtención de unos balances hídricos ajustados. Se hace cada vez más necesario el desarrollo de metodologías precisas que mejoren la estimación de los procesos de evapotranspiración, drenaje y variación en la reserva de agua en el suelo.

En este trabajo se presenta un procedimiento para el cálculo de los balances hídricos en el suelo, mediante la monitorización en continuo del contenido de agua en la zona radicular y en la zona situada por debajo de la misma. Esta metodología, combinada con la estimación de la concentración de nitrato en la solución del suelo mediante cápsulas porosas de succión, permite finalmente evaluar los procesos de lixiviación de nitrato hacia el acuífero. La monitorización del agua en el suelo se ha desarrollado mediante la utilización de sondas EnviroSCAN, con recogida de datos cada hora, a cinco niveles de profundidad. Los resultados de este estudio son de especial aplicabilidad en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

ABSTRACT. Excessive use of nitrogen fertilizer in farming is a major source of nitrate pollution in surface and groundwater systems. In order to minimise the amount of nutrients leaching into water bodies, some issues must be addressed: precise fertilizer level, proper application of it and optimisation of irrigation systems. A detailed knowledge of soil water dynamics in farming land is essential for drawing up accurate water balances, so it is increasingly necessary to devise methods to improve estimations of evapotranspiration, leaching processes and soil water variations.

This work provides a methodology to calculate soil water balances, measuring the soil water content continuously within and below the root-zone, combined with the use of a ceramic candle extraction system to estimate nitrate leaching processes. EnviroSCAN probes were used to measure the soil water content hourly, at five depth levels. The results are especially applicable to nitrate vulnerable zones.

1. Introducción

Uno de los objetivos prioritarios en la gestión sostenible de los ecosistemas agrarios debe ser la protección y conservación de los recursos hídricos. La infiltración en el terreno de aguas con alto contenido en nitrato, derivada del efecto combinado de una excesiva fertilización nitrogenada y unas prácticas de riego poco optimizadas, contribuye al deterioro de los mismos. Es más, si persiste el exceso de nitrato en la solución del suelo en época de intercultivo, también pueden producirse lixiviación con la llegada de las lluvias. El resultado es que, cada vez con más frecuencia, se alcanzan concentraciones que pueden afectar a la salud humana (contaminación de aguas de abastecimiento) y a la calidad ambiental (procesos de eutrofización en ecosistemas acuáticos). En Europa la norma encargada de regular este problema es la Directiva 91/676/CEE, que persigue el doble objetivo de reducir la contaminación por nitratos ya existente y prevenir la aparición de nuevos procesos contaminantes. Según la Directiva, se define como zona vulnerable a aquella superficie territorial cuya escorrentía o filtración afecte o pueda afectar a la contaminación por nitratos. Tales zonas deben ser delimitadas para después decidir el plan de acción a adoptar. Se consideran aguas subterráneas afectadas por la contaminación por nitratos aquellas con contenidos superiores a 50 mg/l, así como las que manifiestan una tendencia creciente que haga prever la necesidad de medidas de protección. La directiva obliga a identificar, cada cuatro años, las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos que, en caso de aguas subterráneas, corresponde a las zonas de recarga de los acuíferos

afectados o en riesgo de estarlo. Se hace, por tanto, indispensable el desarrollo de estudios encaminados a aumentar la precisión en la dosificación del abono nitrogenado y a optimizar las técnicas de riego. En la última década se han publicado diversos trabajos orientados en este sentido (Archer y Thompson, 1993; Román et al., 1996; Sánchez et al., 1998; Rass et al., 1999; Díez, 2000; Díez et al., 2000).

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, en el balance de agua o en 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 debida a la instalación del equipo. La reciente introducción de las sondas EnviroSCAN (Sentek, 2000) en el estudio de la dinámica del agua en el suelo va a facilitar, sin duda, la obtención de unos balances hídricos más ajustados, a partir de datos recogidos en continuo. Aunque las sondas con sensores de capacitancia se han venido utilizando extensivamente en Australia como herramienta de apoyo para el manejo del riego (Buss, 1993) y más recientemente en Estados Unidos, sus múltiples posibilidades en el ámbito científico están prácticamente sin explorar. Paltineanu y Starr (1997), Starr y Paltineanu (1998) y Fares y Alva (1999, 2000) han sido pioneros en su aplicación en trabajos científicos para el estudio de la dinámica del agua en el suelo.

En este trabajo se presenta un nuevo procedimiento, de tipo directo, para el cálculo de los balances hídricos en el suelo, 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. La monitorización en continuo se ha desarrollado mediante la utilización de sondas EnviroSCAN, dotadas de sensores a diferentes niveles de profundidad. Para cada periodo comprendido entre dos aportes de agua consecutivos (riego o lluvia), el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración, drenaje e incremento o pérdida de agua en cada estrato del suelo. Los procesos de drenaje así evaluados, combinados con la estimación periódica de la concentración de nitrato en la solución del suelo mediante cápsulas porosas de succión (Díez et al., 2000), permiten determinar, en tiempo real, cuando se producen procesos de lixiviación de nitrato hacia el acuífero subyacente y en qué cantidad. Se trata de una metodología de especial aplicabilidad en estudios específicos en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

2. Material y métodos

2.1. Trabajo de campo y características de la parcela experimental

El trabajo de campo se ha llevado a cabo en la Finca Experimental La Poveda, que gestiona el Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC. La Finca está situada en la vega del río Jarama (Arganda del Rey, Madrid). El estudio se desarrolló en una parcela experimental de 100 m² de superficie. Ésta, forma parte de un conjunto de parcelas instrumentalizadas diseñadas para el estudio de los procesos de contaminación de acuíferos por nitratos debido a la fertilización nitrogenada. El suelo de la parcela es de textura franco-arenosa, en el primer medio metro, con un incremento progresivo en la proporción de arenas hasta alcanzar el metro y medio de profundidad, 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.

A lo largo de un ciclo anual completo, la parcela experimental recibió los siguientes usos y tratamientos: El 25 de abril de 2002 se inició un cultivo de maíz, variedad Tector, con una densidad de siembra de 90000 plantas/Ha. Se dio un abono de fondo de 100 Kg/Ha de sulfato potásico al 50% y 277 Kg/Ha de superfosfato al 18% y un abono de nitrógeno (urea) en cobertera de 130 KgN/Ha. Los riegos se realizaron con pivot, previamente calibrado para obtener valores más ajustados sobre los aportes de agua en cada riego. La cosecha se realizó el 5 de noviembre. En el estudio también se incluye el periodo de intercultivo posterior a la cosecha, desde el 4 de noviembre de 2002 hasta el 15 de abril de 2003.

La instrumentalización de la parcela consta de una sonda EnviroSCAN para la monitorización en continuo de las reservas de agua en el suelo, con cinco sensores situados a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad. Esta sonda pertenece a una red de sondas EnviroSCAN de similares características instaladas en diversas parcelas experimentales, cuyos sensores envían sus mediciones periódicamente a un *data-logger* localizado *in situ*. El trabajo de campo con la sonda EnviroSCAN se diseñó para una recogida de datos con frecuencia horaria, aunque el sistema permite efectuar medias con una frecuencia igual o superior a 10 minutos. Los sensores permiten conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo mediante medidas de capacitancia; son de forma cilíndrica y cada uno de ellos se encuentra inserto, a cada uno de las profundidades citadas, en una regleta que recorre el interior del tubo de PVC de la sonda. La capacitancia de un capacitor depende de su geometría y del material dieléctrico que separa los conductores. En nuestro caso, el dieléctrico es el suelo, el aire, el agua, la materia orgánica del suelo, el tubo de la sonda, etc. Puesto que el capacitor es fijo, las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir, la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el *data-logger* permite la conversión de las medidas de capacitancia en medidas de contenido volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm. Por ejemplo, si un sensor (previamente calibrado) mide 1 mm, significa que hay 1 mm de agua en una lámina de 10 cm de suelo, lo que

supone un contenido volumétrico de agua en el suelo del 1% o, lo que es lo mismo, que se requiere 1 litro de agua para cubrir 1 metro cuadrado de suelo hasta una altura de 1mm.

Para la extracción de la solución del suelo en la zona en el que pueden darse procesos de lixiviación se emplearon cápsulas porosas de succión. La parcela está dotada de dos muestreadores de cápsula cerámica, construidos en tubo de PVC de 63 mm de diámetro interno. Cada tubo tiene una bujía de porcelana porosa en su extremo inferior, situada a 1,4 m de profundidad. En el extremo que sobresale del suelo, el tubo lleva un tapón que permite la aplicación de una determinada succión mediante vacío y posterior bombeo desde el nivel referido. El agua fue recogida y posteriormente analizada químicamente con frecuencia mensual. Las concentraciones de nitrato en la solución del suelo así obtenidas (en el área donde puede producirse drenaje) y las estimaciones de los volúmenes de agua drenada (a partir de las medidas de la sonda EnviroSCAN) permitieron determinar los nitratos lixiviados durante cada periodo entre dos aportes de agua consecutivos (lluvia o riego).

Los valores de temperatura ambiental y pluviometría se obtuvieron de una estación meteorológica localizada a 2 Km de la zona experimental.

2.2. Cálculo de balances hídricos

El software específico del sistema EnviroSCAN (Sentek, 2000) permite la representación gráfica, en continuo, de los contenidos de agua en el suelo para cada nivel de profundidad en el que se sitúa un sensor. Cuando los sensores no están colocados cada 10 cm de profundidad, el software también permite obtener estimaciones interpoladas del contenido de agua en el estrato entre dos sensores a mayor distancia. La interpolación sólo es válida en estratos de textura y estructura uniformes.

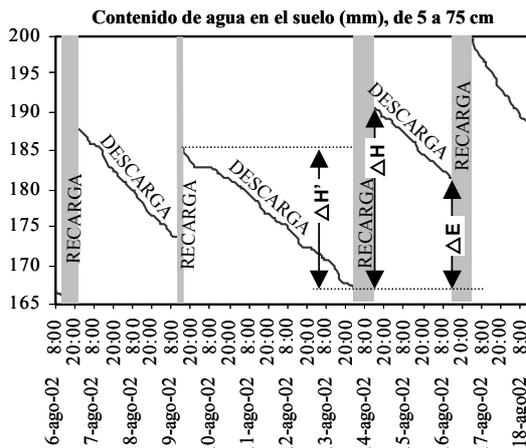


Fig. 1. Variaciones en el contenido de agua en el suelo (de 5 a 75 cm de profundidad) durante cuatro riegos del mes de agosto. Se señalan los periodos de recarga de agua durante cada riego, y los periodos de descarga (en los que no existe aporte de agua). ΔH, ΔH' y ΔE se definen en el texto.

Es importante localizar los sensores a las profundidades adecuadas, de manera que sean representativos de todo el perfil del suelo, además de considerar los niveles de profundidad en los que se está desarrollando la actividad radicular.

El procedimiento para el cálculo de los balances hídricos en el suelo está basado en la monitorización, mediante el sistema EnviroSCAN, 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 (bien por riego, bien por lluvia), el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración (independientemente del tipo de cubierta vegetal) y drenaje, así como las variaciones en el contenido de agua en ambos estratos. Se ha considerado agua de drenaje aquella que supera el nivel de 155 cm de profundidad, debido a la textura gruesa en esta zona (de mayor contenido en grava) y a la proximidad del nivel freático.

En primer lugar se muestran los cálculos para el estrato superior, en el que se producen procesos de evapotranspiración y pueden darse procesos de infiltración y/o sedimentación hacia capas inferiores, cuando el aporte de agua es excesivo. En la Figura 1 se muestran las variaciones en el contenido de agua en el estrato de 5 a 75 cm de profundidad (correspondiente a los sensores de 10 a 70 cm de profundidad) durante cuatro riegos del mes de agosto. Se trata de un gráfico interpolado obtenido mediante el software del sistema.

Para cada ciclo entre dos riegos (o aportes por lluvia) existen dos periodos bien diferenciados: El que hemos denominado "recarga de agua", que se da mientras se produce el riego, y el periodo de "descarga", en el que no existe aporte de agua.

ΔH se define como el incremento de agua en el estrato de 5 a 75 cm de profundidad durante el periodo de recarga, y se obtiene mediante la diferencia entre el valor máximo al finalizar el riego y el valor mínimo anterior al riego. A su vez, ΔH corresponde a la siguiente expresión:

$$\Delta H = (LL + R) - (ET_r + \text{infiltr}_r) \tag{1}$$

donde (LL + R) corresponde al aporte de agua por lluvia y/o riego (ambos conocidos) y (ET_r + infiltr_r) representa la pérdida de agua en el estrato por evapotranspiración y/o infiltración durante el periodo de recarga, cuyo valor puede ser despejado.

ΔH' se define como la pérdida de agua en el estrato de 5 a 75 cm durante el periodo de descarga, y se obtiene por diferencia entre el valor máximo tras finalizar el riego (o lluvia) del ciclo actual y el valor mínimo anterior al siguiente aporte de agua. Como durante el periodo de descarga no existe aporte de agua, ΔH' se expresaría como:

$$\Delta H' = (ET_d + \text{infiltr}_d) \tag{2}$$

donde la evapotranspiración y la infiltración corresponden exclusivamente al periodo de descarga. ΔE se obtiene por diferencia entre los valores mínimos entre dos ciclos de riego consecutivos y se define como la ganancia o pérdida de agua en el estrato de 5 a 75 cm.

Para cada ciclo completo entre dos riegos, incluyendo los periodos de recarga y descarga, las pérdidas por evapotranspiración e infiltración totales se expresarían como:

$$\text{infiltr} + ET = (ET_r + \text{infiltr}_r) + (ET_d + \text{infiltr}_d) \quad (3)$$

La estimación de la infiltración (y/o sedimentación) hacia el estrato inferior se describirá a continuación y, por diferencia, puede determinarse la evapotranspiración.

Igual que en el caso del estrato del nivel radicular, anteriormente descrito, el gráfico interpolado de las variaciones en el contenido de agua para el estrato de 75 a 155 cm de profundidad (correspondiente a los sensores de 70 al 150 cm) se obtiene a partir del *software* del sistema. Debe considerarse que, generalmente, existe cierto desfase temporal entre los aportes de agua en superficie y el movimiento del agua en las zonas más profundas; además, el agua acumulada en los distintos niveles del suelo también puede estar implicada en los procesos de infiltración y/o sedimentación. Tanto durante el periodo que hemos denominado de recarga, como durante el periodo de descarga, pueden suceder tres cosas en el estrato de 75 a 155 cm:

- Que no exista variación en el contenido de agua en el gráfico interpolado, lo que significa que la infiltración (y/o sedimentación) desde la capa superior es igual a 0, y que tampoco existe drenaje por debajo 155 cm.
- Que exista una recarga, correspondiente a la infiltración (y/o sedimentación) desde la capa superior (cuantificable en el gráfico).
- Que el gráfico sea descendente, es decir, que no se haya producido infiltración desde el estrato superior,

pero que se esté produciendo drenaje del agua acumulada en el estrato.

La observación en continuo de las variaciones del agua a este nivel de profundidad permite identificar los momentos en los que se está produciendo infiltración desde la capa superior y aquellos otros en los que se produce drenaje hacia el acuífero y cuantificar las cantidades de agua drenada para cada ciclo entre dos riegos.

3. Resultados

En la Figura 2 se muestra el curso temporal del contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad, monitorizado con frecuencia horaria. Durante los meses de julio y agosto se observa un conjunto de picos bien definido, que representa los aportes de agua correspondientes al periodo de riegos. El resto de las entradas de agua se deben a aportaciones por lluvia. Los picos en las curvas de 120 y 150 cm de profundidad indican los momentos en los que se ha producido infiltración y/o sedimentación de agua desde el estrato superior, momento a partir del cual se inicia el proceso de drenaje. Se observa que durante la época de riegos el drenaje ha sido importante, lo cual indica un exceso en el aporte de agua al cultivo. Asimismo, aunque de menor intensidad, también pueden apreciarse los procesos de drenaje desencadenados con las lluvias de otoño, invierno y primavera, durante la fase de intercultivo.

Con el *software* EnviroSCAN pueden realizarse observaciones de detalle en todo el perfil del suelo, puesto que la monitorización en continuo permite descender en la escala temporal de observación. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestran las variaciones en el contenido de agua en el suelo, a 10 cm de profundidad, durante un periodo comprendido entre dos episodios de lluvia de primavera. Se observan oscilaciones periódicas que corresponden a los procesos de evapotranspiración diaria, debidos a la actividad radicular desarrollada a ese nivel de

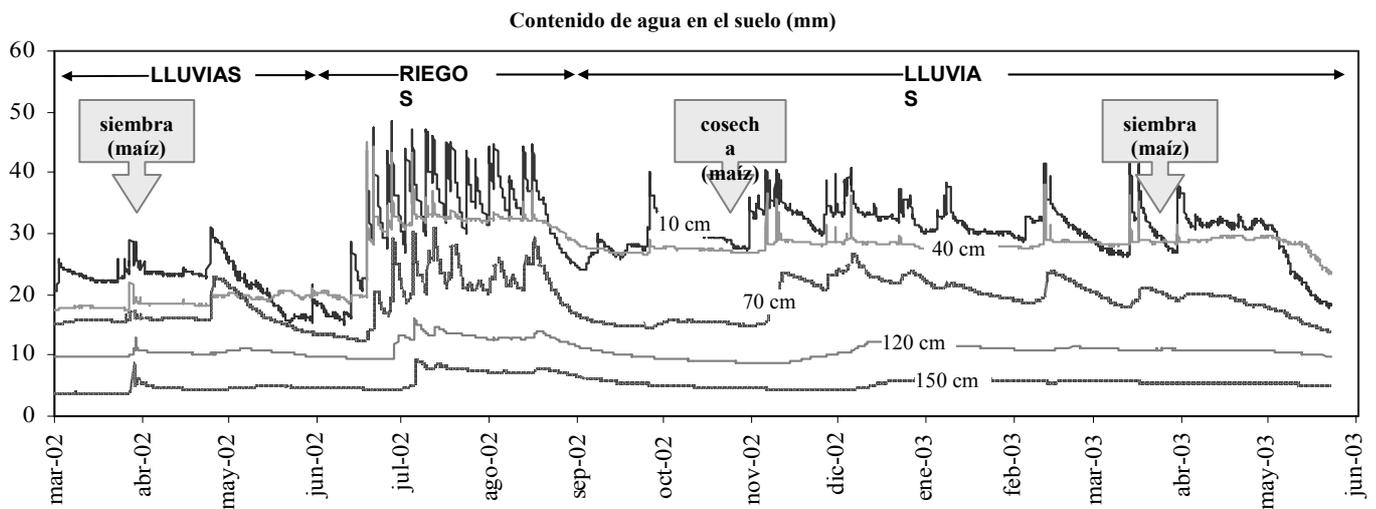


Fig. 2. Curso temporal del contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70 y 120 cm de profundidad. Valores monitorizados con frecuencia horaria mediante una sonda EnviroSCAN. Se señalan los periodos de riego y lluvias y las fechas de siembra y cosecha del cultivo de maíz.

profundidad. Alteraciones en las curvas de evapotranspiración diaria pueden indicar que se está produciendo un stress hídrico para el cultivo. Ante este tipo de eventualidad, la observación en tiempo real permite introducir modificaciones en el manejo del cultivo para evitar situaciones no deseables que pueden afectar a la producción.

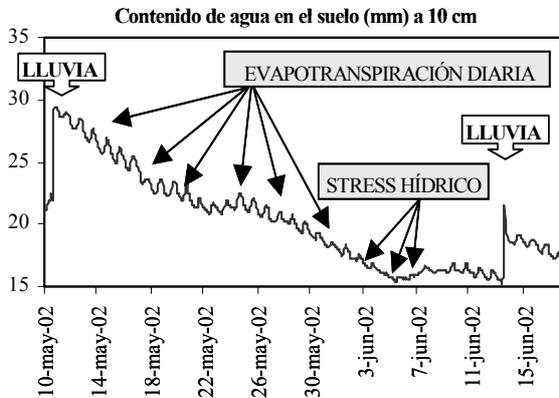


Fig. 3. Detalle del contenido de agua en el suelo a 10 cm de profundidad. Valores monitorizados con frecuencia horaria.

En la Tabla 1 se presentan los balances hídricos para los periodos de cultivo de maíz y de intercultivo, calculados mediante el método descrito en el apartado 2.2. También se indica el nitrógeno lixiviado hacia el acuífero en cada uno de ellos. Durante el cultivo de maíz, el 74 % del aporte de agua se destinó a procesos de evapotranspiración, el 21 % drenó hacia el acuífero y el 5 % permaneció temporalmente retenido en el suelo, mientras que durante la fase de intercultivo, el 82 % se destinó a evapotranspiración, el 9 % a drenaje y el 9 % permaneció en el suelo. Respecto a la dinámica de lixiviación de nitrógeno, de los 130 Kg N/Ha aportados inicialmente como abono en cobertera, el 51 % pasó a enriquecer el contenido en nitrato del acuífero subyacente durante el periodo de cultivo, mientras que el 15 % fue lixiviado por las lluvias en el periodo de intercultivo.

En la Figura 4 se muestran los valores diarios de evapotranspiración, drenaje, aporte de agua (lluvia + riego), temperatura máxima y nitrógeno lixiviado hacia el acuífero. El aporte de agua (por riego o lluvia) presentó una correlación lineal de 0,41 ($p < 0,01$) con la temperatura máxima diaria y de 0,60 ($p < 0,001$) con la evapotranspiración diaria. A su vez, la temperatura máxima se correlacionó con la evapotranspiración ($r = 0,44$, $p < 0,01$) y el drenaje diario presentó una correlación de 0,87 ($p < 0,001$) con el nitrógeno lixiviado.

4. Discusión

Las sondas EnviroSCAN ofrecen medidas muy precisas, en tiempo real, del contenido de agua en el suelo, cuya frecuencia y distribución espacial depende sólo del diseño experimental inicial.

Tabla 1. Balances hídricos y estimación del nitrógeno lixiviado durante los periodos de cultivo de maíz e intercultivo posterior.

	Cultivo de maíz 25-4-02 a 5-11-02	Intercultivo 5-11-02 a 15-4-03
Nº de días	195	161
Entradas de agua:		
Lluvia (mm)	168	451
Riego (mm)	782	0
Total:	950	451
Consumo y distribución del agua:		
Evapotranspiración (mm)	701	368
Drenaje (mm)	201	41
Recarga de 0-75 cm (mm)	57	23
Recarga de 75-155 cm (mm)	-9	19
Total:	950	451
Nitrógeno lixiviado (Kg N-NO ₃ /Ha)	66	20

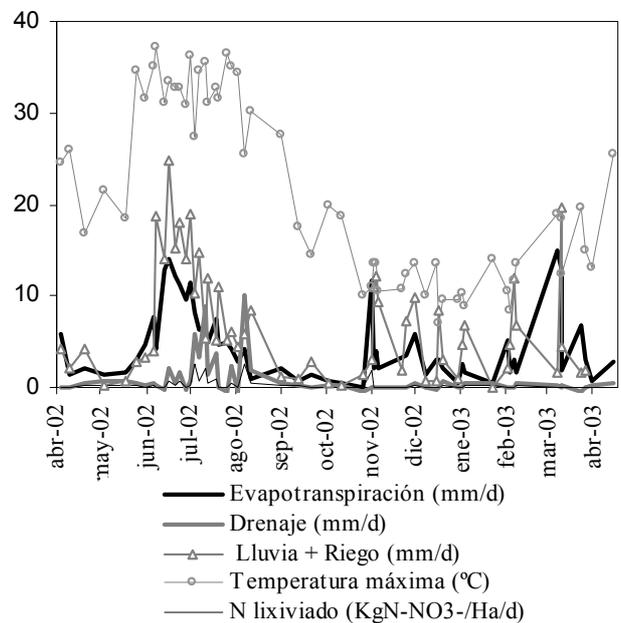


Fig. 4. Curso temporal de la evapotranspiración, el drenaje, el aporte de agua (lluvia + riego), la temperatura máxima y el nitrógeno lixiviado.

Para el cálculo de los balances hídricos utilizando estas sondas de capacitancia se precisa, por tanto, del conocimiento de los aportes reales de agua por riego y lluvia, valores que, con frecuencia, sólo se suelen conocer de modo aproximado. Para evitar desajustes en el cálculo, es muy importante realizar una revisión previa y una calibración adecuada del sistema de riego, además de contar con medidas fiables de los aportes pluviométricos (se recomienda la instalación de un pluviómetro *in situ*). Dependiendo de las características del suelo, se debe colocar un número de sensores suficiente para que las interpolaciones, si fuesen necesarias, sean representativas. También debe considerarse cual es la profundidad máxima a la que se puede producir actividad radicular en cada tipo de cultivo, puesto que este nivel será el que delimite el

estrato superior, en el que se dan procesos de evapotranspiración, del resto del suelo. La representación gráfica del contenido de agua en el suelo que se genera a partir de cada sensor, permite determinar la profundidad hasta donde llega la actividad radicular del cultivo en cada momento; la simple observación de la presencia, o ausencia, de las curvas diarias de evapotranspiración (véase Figura 3) proporciona información veraz sobre el nivel de profundidad de la raíz. Asimismo, cuanto mayor sea la proximidad del último sensor al nivel freático, mayor será la precisión de los cálculos interpolados en el balance hídrico.

Hasta ahora, el estudio de la dinámica del agua en el suelo sólo era posible abordarlo mediante aproximaciones, utilizando métodos gravimétricos o sondas de neutrones. El desarrollo de la técnica TDR y la incorporación de sistemas automatizados para la monitorización de datos, han facilitado este tipo de estudio. Sin embargo, el área de estudio se ve limitada por la necesidad de una distancia inferior a 25 m de cable entre la sonda TDR y el *data-logger* (Heimovaara, 1993). Otra limitación consiste en la dificultad de monitorizar profundidades concretas de suelo. Sánchez-Pérez et al. (1999) han descrito un método alternativo interesante, que permite la caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR, sin embargo, todavía existen algunos problemas por resolver de orden electrónico para la obtención de una señal limpia en sondas de longitud inferior a 50 cm. Estas cuestiones se ven solventadas con el reciente desarrollo de las sondas multisensor de capacitancia (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 2000).

La evapotranspiración es un parámetro importante para determinar los requerimientos del cultivo. Debido a las dificultades que siempre ha presentado su medición directa, ésta se ha estimado generalmente a partir de datos climáticos. Doorenbos y Pruitt (1984), Jensen et al. (1990), Burman y Pochop (1994) y Allen et al. (1994) realizaron revisiones sobre estos métodos. Los valores de evapotranspiración obtenidos mediante el método directo descrito en el apartado 2.2 se encuentran en concordancia con los valores estacionales obtenidos mediante métodos de tipo indirecto por otros autores en cultivos de maíz en áreas templadas (Starr y Paltineanu, 1998; Micucci et al., 2003).

Además de la obtención de unos balances hídricos ajustados para uso en investigaciones sobre los procesos de contaminación de acuíferos por nitratos, la utilización de sondas de capacitancia proporciona información que permite la optimización de los riegos, la corrección de estados de stress hídrico en los cultivos, el estudio de la dinámica del suelo (cambios de textura y estructura), el conocimiento de la profundidad de la raíz del cultivo en cada momento, el cálculo de los puntos de saturación, marchitamiento y la capacidad de campo, etc. Sin duda, se trata de una herramienta que en el futuro se hará indispensable en la gestión sostenible de los ecosistemas agrarios, permitiendo compaginar criterios de producción y de conservación de los recursos hídricos.

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

- Allen, R.G., M. Smith, L.S. Perira y A. Perrier, 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43: 35-91.
- Archer, J. y R. Thompson, 1993. Solving the nitrate problem: Progress in research and development. *AFF Publ.*, London
- Burman, R. y L.O. Pochop, 1994. *Evaporation, evapotranspiration, and climatic data.* Elsevier, Amsterdam.
- Buss, P. 1993. Use of capacitance based measurements of real time soil water profile dynamics for irrigation scheduling. *Proc. Natl. Conf. Irrig. Assoc., Australia and Natl. Committee Irrig. Drain. Launceston, Tasmania. 17-19 May 1993.* Irrig. Assoc. of Aust., Homebush, NSW.
- Diez, 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.
- Diez, 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.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt, 1984. *Crop water requirements.* FAO irrigation and drainage paper n° 24. Rome.
- 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.
- Heimovaara, T.J. 1993. Design of triple-wire time-domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 77: 1410-1417.
- Jensen, M.E., R.D. Burman y R.G. Allen, 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements.* ASCE Manuals and reports on engineering practice N° 70. Am. Soc. Civil Engrs., New York.
- Micucci, F.G., M.A. Taboada y R. Gil, 2003. El agua en los sistemas extensivos, II. Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos. *Arch. Agon.* 7: 1-4.
- 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. Diez, 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. Diez, 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.
- Sánchez-Pérez, J.M., J.P. Laurent, M. Bohy, A.V. Auzet y J.L. Thony, 1999. Evaluación de un Nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR: 33-38. *Estudios de la zona no saturada del suelo.* Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón ICIA Tenerife.
- 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.