

## OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO MEDIANTE SONDAS DE CAPACITANCIA Y SU EFECTO SOBRE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATO

J.A. Díez<sup>1</sup>, M. Arauzo<sup>1</sup> y P. Hernáiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Serrano 115 dpdo., 28006 Madrid; jadiez@ccma.csic.es, mercedes@ccma.csic.es,

<sup>2</sup> 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.** La contaminación de acuíferos por nitratos debe ser abordada no sólo desde la perspectiva de optimizar la dosificación de fertilizantes y el manejo de los mismos, sino también mediante la optimización de las dosis de riego, mejorando los sistemas de detección de las reservas de agua en la zona no saturada del suelo, de modo que permitan ajustarse los balances de agua en tiempo real. El experimento se ha llevado a cabo en un cultivo de maíz durante 2 años consecutivos en los que se dieron dos regímenes climáticos diferentes, especialmente en lo que se refiere a la lluvia y a las temperaturas máximas registradas durante el mes de Agosto. En el año 2003 se registraron 153 mm de lluvia durante el periodo de cultivo, mientras que en el 2004 fueron 422 mm. También en el periodo previo a la siembra en el 2003 las lluvias fueron escasas, lo que afectó negativamente a las reservas de agua en la zona no saturada. Durante ambos periodos de cultivo (2003 y 2004) se hizo un seguimiento de las reservas de agua en el suelo mediante sonda de capacitancia.

El objetivo del trabajo ha sido evaluar el efecto de dos escenarios hídricos diferentes en la producción de maíz durante dos años consecutivos con condiciones climáticas diferentes. Las curvas de humedad medidas en continuo, han contribuido a optimizar las dosis de riego.

La dosis de riego total aplicada durante el 2003 fue de 762 mm distribuidos en 12 riegos, mientras que en el 2004 fue de 485 mm distribuidos en 10 riegos. Esto representa una reducción en las dosis de riego de 273 mm, con relación a la aplicada en 2003.

Las reservas de agua en la zona no saturada y las condiciones climáticas acontecidas durante cada uno de ambos años experimentales, afectaron tanto a la producción de biomasa, como a la producción de grano. Las producciones en general fueron más elevadas durante el 2004, debido a que el régimen hídrico y las temperaturas fueron más favorables. En el 2003, a pesar de aplicar dosis de riego más elevadas, se observa un claro descenso tanto en la producción de grano como en la de biomasa.

**ABSTRACT.** Nitrate pollution must be studied optimizing fertilizer rates and improving the irrigation rate and by a

detection system of the water content in the unsaturated zone. It is necessary to adjust the water balance in real time.

This experiment was developed in a maize crop during two consecutive years with different climatic weather, especially in the rainfall and maximum temperatures during August. In 2003, a rainfall of 153 mm was registered during the crop period, while in 2004 it was 422 mm. Before the start of the crop season rainfall was scarce which affected negatively to water reserves in the unsaturated zone. During both crop periods water reserves were controlled in subsoil with one capacitance probe.

The purpose of this paper is to evaluate the effect of two different hydric conditions on the maize yield, during two consecutive years with different climatic weather. Moisture curves have contributed to estimate irrigation rates.

The total irrigated rate applied in 2003 was 762 mm distributed in 12 applications. In 2004 it was only 485 mm distributed in 10 applications. Consequently, the irrigation rate was reduced in 273 mm compared to the irrigation applied in 2003.

Water reserves in the unsaturated zone and climatic conditions of each experimental year affected grain and biomass yield. In 2004, the yield was larger due to more advantageous water and temperature conditions. However, in 2003 with higher irrigation (762 mm) it was observed a clear drop in the crop yield (grain and biomass).

### 1. Introducción

El mantenimiento del contenido de agua adecuado durante el periodo de cultivo es necesario para obtener el óptimo crecimiento de la planta, su producción y calidad. Un buen manejo de irrigación se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos y en consecuencia obtener el máximo retorno económico. Las buenas prácticas de irrigación, están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad en esta zona y minimizar la contaminación difusa, es decir,

lixiviación del agua y nutrientes por debajo de la zona radicular (Fares et al. 2000).

Para minimizar la lixiviación de nitratos es necesario optimizar las dosis de fertilizantes nitrogenados y el manejo de los mismos (Díez et al. 2000), al tiempo que se aplican dosis optimizadas de riego, lo cual se puede lograr mediante el uso de sistemas de detección de las reservas de agua en el suelo. La cantidad y el estado del agua en el suelo y sus cambios, pueden impactar dramáticamente sobre los cultivos y la absorción de fertilizantes. El desarrollo de mejores prácticas de manejo para hacer los cultivos más eficientes y reducir el impacto sobre las aguas superficiales y subterráneas, requiere gran conocimiento de los factores que afectan la dinámica del agua en el suelo. Por ello es necesario conocer con precisión, en tiempo real, cuales son las variaciones de las reservas de agua en la zona no saturada medidas en continuo desde el comienzo del cultivo y determinar su evolución a lo largo del mismo. A ser posible, necesitamos realizar estas medidas en suelo sin disturbar. Sin embargo, muchos de los métodos bien conocidos para medir las variaciones del agua en el suelo, presentan varias limitaciones que impiden cumplir todos los requerimientos. En nuestros experimentos anteriores (Díez et al. 1997) se han utilizado algunas de las técnicas más comunes, tales como la gravimetría, sonda de neutrones y TDR (time domain reflectometry), las cuales por diversos motivos han sido sustituidas. También, es preciso conocer los aportes de agua de lluvia mediante el apoyo de una estación meteorológica, para poder realizar los balances de agua y finalmente determinar las pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) y drenaje (D).

El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar el efecto de dos escenarios hídricos diferentes en la producción de maíz durante dos años consecutivos con condiciones climáticas diferentes, especialmente en lo que se refiere a los regímenes de lluvia. Este estudio se ha realizado mediante sensores de capacitancia situados a diferentes niveles de profundidad (Enviroscan) con medidas en continuo, cuyo objeto final es el de optimizar las dosis de riego.

## 2. Materiales y Métodos

El experimento se llevó a cabo en la Finca Experimental de la Poveda del CSIC (Arganda del Rey, Madrid). Este experimento forma parte de un diseño experimental de 12 parcelas con 4 tratamientos en los que se aplicaron 3 diferentes dosis de nitrógeno y un testigo sin fertilizar, en 3 repeticiones de cada uno. El suelo es un Calcic Xerofluvent, de textura franco arenosa con un contenido del 13% de arcilla en superficie. El análisis granulométrico muestra un contenido de arena de 39%, limo 47% y arcilla 13%. Con la profundidad su contenido en arcilla descendiendo paulatinamente hasta el 3% a 2 m. Por debajo de este nivel se encuentra una capa de grava de 2 m de espesor y por debajo de esta se sitúa la capa freática a 4-4.5 m de profundidad, cuya variación de nivel dependió de la lluvia y de la recarga del río, dada su proximidad. La capacidad de almacenaje de agua en el perfil del suelo hasta los 2 m de

profundidad se estima en  $309 \pm 33$  mm mientras que la capa superior de 0.5 m fue de  $154 \pm 21$  mm, medido mediante la técnica de TDR (Díez et al. 2004). El suelo presenta un contenido de 1.4% de materia orgánica, 3.4% de carbonatos y pH 8.1.

La siembra de maíz (*Zea mays L. cv Tector 700*) se realizó el 22 de Abril los dos años experimentales, con objeto de valorar los efectos de la climatología sobre la producción. La densidad de siembra fue de 90000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ , en surcos con una separación de 75 cm entre ellos. El maíz fue cultivado siguiendo la práctica habitual de los agricultores, y fue recolectado en Octubre cuando el grano estaba maduro.

Para la determinación de la producción de grano y biomasa, el maíz fue recolectado en 5 m de un surco situado en el centro de la parcela. De las plantas recolectadas, 10 fueron seleccionadas al azar y pesadas las diferentes partes de la planta (grano, hoja, tallo, bracteas y zuro), desecadas durante 24 h a  $60^\circ\text{C}$  y 2 h  $80^\circ\text{C}$ , y pesadas de nuevo para determinar su contenido en materia seca.

El agua de riego empleada en el experimento procede de un canal de riego del río Jarama. La calidad media de agua de riego fue:  $\text{NO}_3^-$ ,  $5.1 \pm 0.5$  mg  $\text{N L}^{-1}$ ; Na,  $90 \pm 16$  mg  $\text{L}^{-1}$ ; sólidos totales,  $650 \pm 50$  mg  $\text{L}^{-1}$ ; conductividad eléctrica (EC),  $0.10 \pm 0.01$  S  $\text{m}^{-1}$ ; relación de adsorción de Na (SAR), 1.55; y pH,  $7.6 \pm 0.2$ .

Con objeto de hacer el seguimiento de las reservas de agua en la zona no saturada, en una de las parcelas centrales se instaló la sonda de capacitancia. Este método está basado en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo aire y agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, debido a que la constante dieléctrica del agua es alta (80 aproximadamente) comparada con la del suelo que es 5, y la del aire que es 1. El procedimiento establece que los dipolos permanentes del agua en el medio dieléctrico del suelo están alineados por un campo eléctrico polarizado. La medida de capacitancia nos da la constante dieléctrica y a partir de esta el contenido en agua del suelo. El sistema monitorizado para medir el contenido de agua en el suelo en tiempo real, ha sido desarrollado por Enviroscan, Sentek Pty Ltd. en Australia. Una descripción del equipo puede encontrarse en el trabajo de Paltineanu et al. (1997). El sistema está diseñado para que las sondas de medida puedan estar instaladas a una distancia de hasta 500 m del *datalogger*. Los 5 sensores se situaron a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad dependiendo de las características del perfil de suelo. La señal de frecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica ( $\theta_v$ ) mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997) la cual es facilitada por el *software* de Enviroscan. El equipo fue programado para que realizara una lectura cada hora durante los dos años de experimentación, cuyos datos se recogieron en un *datalogger* y se volcaron con una periodicidad mensual.

Los datos de agua del suelo, medidos durante intervalos de tiempo finitos, obtenidos por los sensores de capacitancia fueron utilizados junto con los datos de riego y de lluvia para calcular la ET y el drenaje. El balance hídrico se realizó según el procedimiento de Arauzo et al. (2003).

El drenaje fue calculado en base al balance de agua del suelo mediante la expresión:

$$D = LI + R - ET \pm \Delta S$$

Donde D es el drenaje (mm), LI la lluvia (mm), R el riego, ET evapotranspiración (mm) y  $\Delta S$  los cambios observados en el suelo en la reserva de agua (mm) entre 0 y 55 cm de profundidad, medido mediante sonda de capacitancia (ver Arauzo et al. 2003, donde se describe el procedimiento de cálculo). Las condiciones del experimento han permitido descartar la posibilidad de pérdidas de agua por escorrentía.

### 3. Resultados y Discusión

Debemos destacar el diferente régimen hídrico acontecido durante cada uno de los dos años experimentales. El 2003 fue un año con tendencia a seco, con una pluviometría de 153 mm durante el periodo experimental (de Abril a Noviembre) y una temperatura máxima en verano que puntualmente superó los 40°C (Fig. 1). En cambio el 2004 fue un año bastante húmedo para la zona experimental, con una pluviometría de 452 mm durante el periodo de cultivo y cuyas temperaturas máximas en verano fueron algo más suaves que las del año anterior. Este diferente régimen pluviométrico afectó a gran parte del año, de tal forma que las reservas de agua al comienzo del cultivo fueron mas bajas en 2003 lo que obligó a comenzar los riegos con mayor antelación. Las fechas en las que se aplicó el primer riego, fueron el 14 de mayo en el 2003 y 18 de junio en el 2004, es decir más de un mes de diferencia entre ambos. Teniendo en cuenta que la siembra se realizó en la misma fecha en ambos años (22 de abril), debemos considerar que el comienzo de los riegos cada uno de estos años difiere claramente de lo que es la práctica habitual, cuyo comienzo suele ser entre el 5 y 10 de junio.

Las Fig(s). 2 y 3 relativas a las curvas de reservas de agua facilitadas por el Enviroscan, muestran el diferente contenido de humedad durante el cultivo en 2003 y 2004, respectivamente. En la capa arable (10 cm de profundidad) el 20 de mayo al comienzo del cultivo había 18.2 mm en 2003 mientras que en 2004 en la misma fecha 25.3 mm. A 40 cm de profundidad también se observan diferencias apreciables en la misma fecha, 23.8 y 28.2 mm en los años 2003 y 2004, respectivamente.

Los primeros riegos durante 2003 para paliar la sequía reflejan una recuperación progresiva en las capas más superficiales. En las Fig(s). 2 y 3 podemos observar que durante el riego, el proceso de recarga de las capas inferiores sigue una evolución diferente, ya que los picos detectados en la capa de 20 cm se transfieren a la capa de 40 cm casi de forma inmediata, pero en cambio la capa situada a 70 cm muestra su recuperación de humedad casi un mes después del comienzo de los riegos.

Los riegos se fueron aplicando en función de las necesidades del cultivo y sobre todo considerando el balance de agua puntual realizado por segmentos de suelo,

comprobando que en las capas situadas por debajo de la zona radicular (120 y 150 cm) no se produjera drenaje.

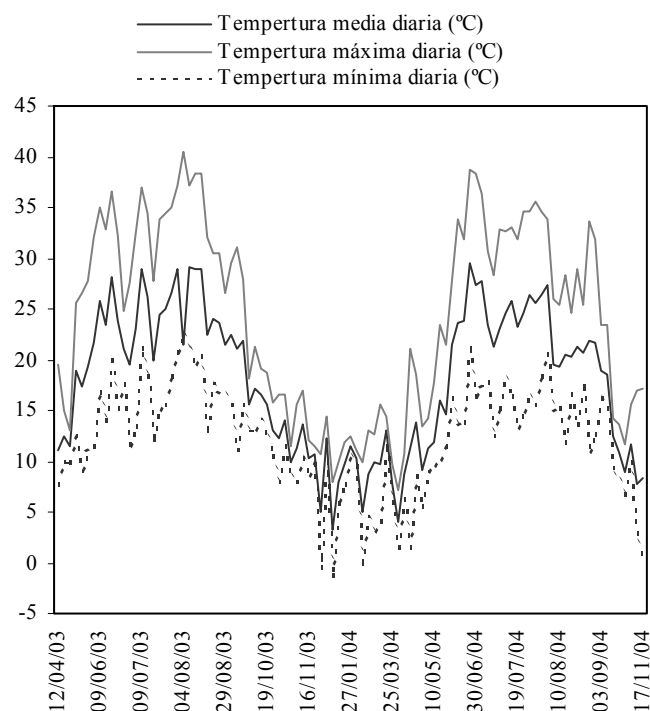


Fig. 1. Evolución de las temperaturas (máxima, mínima y media) durante el periodo experimental.

En el año 2003 se observa como las dosis de riego aplicadas hicieron que aumentaran las reservas de agua del suelo hasta alcanzar el punto de llenado (*full point*) el 10 de julio, en la capa arable. La máxima recarga en todas las capas de suelo se produjo el 29 de agosto. La dosis de riego total aplicada durante el 2003 fue de 762 mm distribuidos en 12 riegos de 60-65 mm cada uno, y las entradas de agua totales (lluvia + riego) fueron de 915 mm. Aplicaciones de dosis de riego de bajo volumen y más frecuentes son beneficiosas para mantener la humedad en el suelo, evitando sus inconvenientes.

Las dosis de riego aplicadas conducen a alcanzar el punto de saturación, pero el proceso fue apreciablemente diferente en los dos años comparados. Mientras en el 2003 este punto se alcanza después de los 4-5 primeros riegos (Fig. 2), en 2004 con los primeros riegos aplicados se alcanza el punto de llenado del suelo, situado en 48 mm (Fig. 3), lo que se explica porque las reservas de agua al comienzo del riego eran apreciablemente menores en el 2003. Las curvas del contenido de agua en el suelo en el 2004 muestran que la recuperación de sus reservas de agua fue apreciablemente más rápida que la observada el año anterior. Los máximos se alcanzan el 15 de agosto en todas las capas de suelo. Sin embargo, debemos destacar que en ambos años, los riegos aplicados a finales del mes de agosto fueron los responsables principales del drenaje, debido a que la ET en este periodo fue relativamente más baja, siendo más acusado este efecto en el 2003, debido a las elevadas dosis de riego aplicadas (ver Fig(s). 2 y 3).

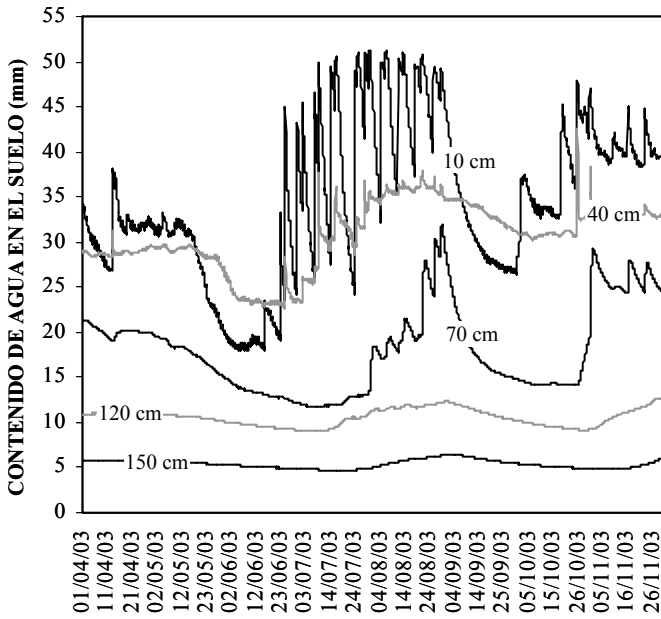


Fig. 2. Evolución de las curvas de reserva de agua a distintas profundidades durante el año 2003, medidas mediante Enviroscan.

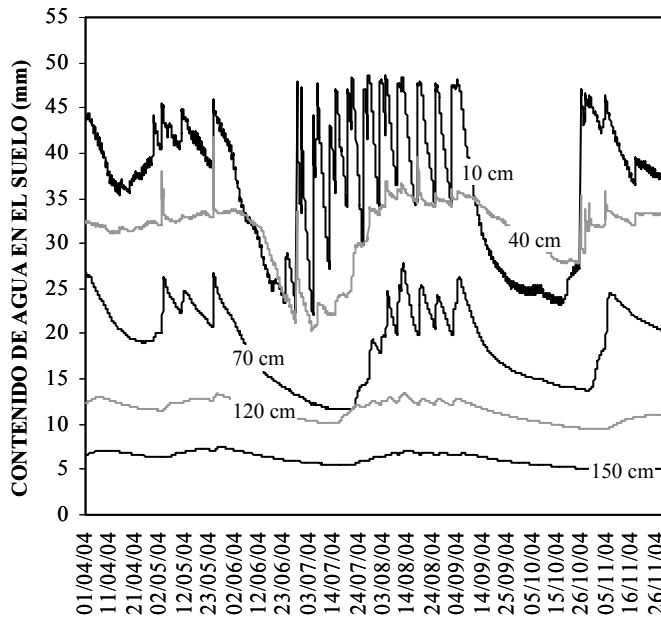


Fig. 3. Evolución de las curvas de reserva de agua a distintas profundidades durante el año 2004, medidas mediante Enviroscan.

La dosis de riego total aplicada durante el 2004 fue de 485 mm distribuidos en 10 riegos. Esto representa una reducción en las dosis de riego de 273 mm, con relación a la aplicada en 2003. Las entradas totales en este año (lluvia + riego) fueron 937 mm. Con las lluvias caídas en otoño se llegan a igualar las reservas de agua en el perfil del suelo en ambos años, aunque las lluvias del 2003 en este periodo fueron más tempranas.

Las medidas en continuo del contenido de agua en el suelo a lo largo del perfil fueron empleadas para determinar las pérdidas de agua en el sistema. Considerando conjuntamente la lluvia y el riego, en el 2003 se aportaron 915 mm durante el periodo de cultivo, mientras en el 2004

fue de 937 mm. Esta similitud en las entradas de agua contabilizadas en cada uno de los dos años, a pesar de la acusada diferencia en el régimen hídrico observada, se debe a la eficiencia del riego realizada gracias a la información facilitada por las sondas de capacitancia, especialmente en lo que se refiere a las pérdidas por ET y Drenaje.

En las Fig(s). 4 y 5 se muestran las curvas de evolución de la ET, Drenaje y entradas de agua totales durante los años 2003 y 2004, respectivamente. La ET es el principal componente del balance de agua en el suelo especialmente en el cultivo de maíz cultivado preferentemente durante el periodo estival. Su evolución siguió un patrón estacional, ya que esta directamente relacionado con la temperatura y el porcentaje de humedad del aire. Los valores de ET detectados en el presente experimento fueron algo mas elevados durante el cultivo del 2003 (843 mm) debido como se ha dicho, a la climatología cálida y seca de este año. Esto representa el 92% de la entrada total de agua (lluvia + riego) al suelo, durante este periodo. Durante el 2004, las pérdidas de agua por ET fueron algo más bajas (819 mm) lo que representa unas pérdidas del 87% de la entrada total de agua en el suelo, durante este periodo. Los valores cuantitativos de ET obtenidos en nuestro experimento son similares a los hallados por Fares et al. (2000) en cultivos de cítricos en Florida, pero el porcentaje de agua perdida por ET respecto al total de entrada de agua al sistema, en nuestro caso fue apreciablemente mayor. Sin embargo debemos constatar que a pesar de las acusadas diferencias climáticas acontecidas entre ambos años, las diferencias en la ET no fueron demasiado acusadas.

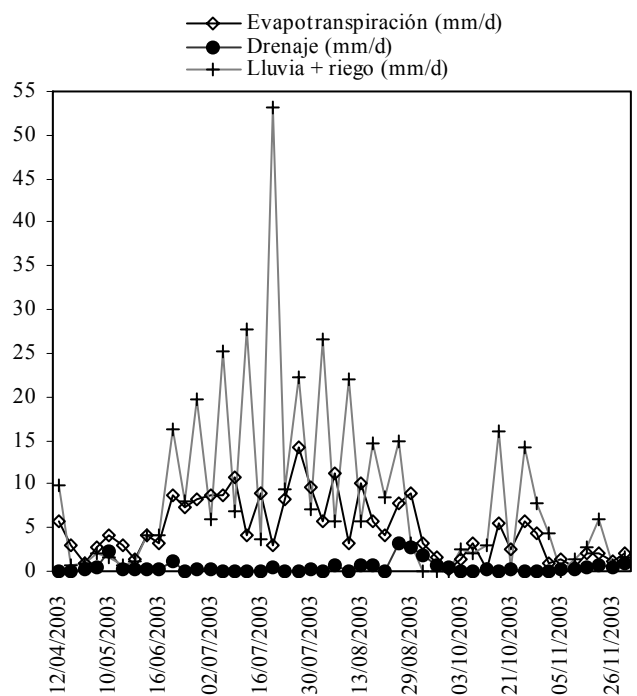


Fig. 4. Gráficas de ET, drenaje y aporte de agua durante el cultivo de maíz del 2003

Las pérdidas de agua por drenaje fueron más bajas durante el 2003 con 91 mm, a pesar de que las dosis de riego fueron bastante más elevadas (762 mm) que las

aplicadas en 2004 (485 mm), cuyas pérdidas por drenaje fueron de 141 mm. Estas pérdidas no son uniformes a lo largo del periodo de cultivo. En la Fig. 4, podemos observar un punto de inflexión hacia arriba en el 2003 en la etapas finales del cultivo, en el mes de septiembre, originado principalmente por las lluvias. En cambio la curva de drenaje acumulativo del año 2004 (Fig. 5) presenta dos puntos de inflexión ascendentes, el primero durante los primeros riegos de junio, indicativo de que las reservas de agua en el suelo al comienzo de los riegos, eran más elevadas que las del año anterior; y un segundo pico en septiembre originado por las lluvias. Los picos observados en septiembre se originan no solo por las lluvias sino también por la reducida capacidad de absorción de agua por el cultivo en esta etapa (fase de secado) y las moderadas temperaturas acontecidas en este periodo. La ajustada dosis de agua aplicada en el riego se traduce en una reducción apreciable de las pérdidas por lixiviación de nitrato, al tiempo que se origina un importante ahorro de la misma.

Las reservas de agua en la zona no saturada y las condiciones climáticas acontecidas durante cada uno de ambos años experimentales, afectaron tanto a la producción de biomasa, como a la producción de grano (Fig. 6). Las producciones en general fueron más elevadas durante el 2004, debido a las abundantes precipitaciones caídas durante este año originando un régimen hídrico favorable al comienzo del cultivo, con unas reservas de agua mayores y unas temperaturas extremas durante el mes de agosto más moderadas. En cambio, durante el periodo de cultivo del 2003, con un escenario climático opuesto, a pesar de aplicarle dosis de riego más elevadas (762 mm) para mantener en equilibrio sus reservas de agua, se originó un claro descenso tanto en la producción de grano como en la de biomasa, a pesar de que durante el periodo de irrigación no se detectó stress hídrico ninguno de los 2 años experimentales.

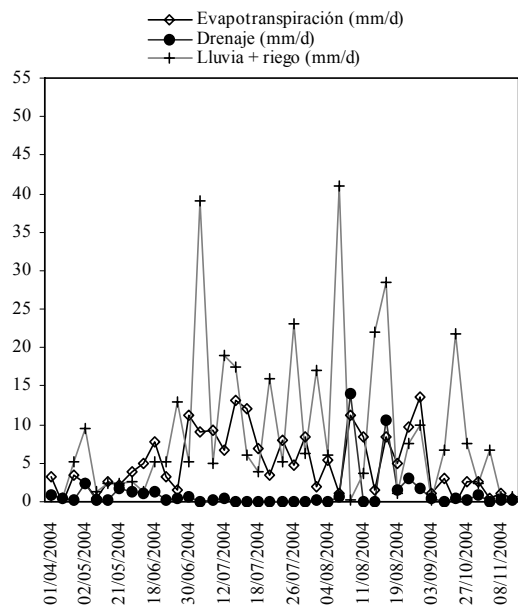


Fig. 5. Gráficas de ET, drenaje y aporte de agua durante el cultivo de maíz del 2004.

Consecuentemente, el control de la dosis de riego es fundamental, tanto para mantener los niveles de humedad en el suelo adecuados para el crecimiento y desarrollo de la planta, como para evitar las pérdidas por drenaje, cuyos efectos son contaminantes. Los resultados de este experimento demuestran, que en ocasiones extremas, como las que se dieron en el año 2003, elevando las dosis de riego se puede llegar a mantener el cultivo, pero los efectos nocivos de las condiciones climáticas extremas acaban afectando negativamente a la producción.

Si no se hubiera llevado a cabo el control del riego mediante sondas de capacitancia, aplicaciones convencionales de riego hubieran conducido a pérdidas por drenaje considerablemente más elevadas, lo que finalmente se hubiera traducido en un incremento sustancial de las pérdidas por lixiviación de nitrato. La escasa diferencia en las entradas de agua contabilizadas en 2003 (915 mm) y en 2004 (934 mm) se debe fundamentalmente, al control de los riegos efectuado gracias a la información facilitada por las sondas de capacitancia, especialmente en lo que se refiere a las pérdidas por drenaje y a las de evapotranspiración.

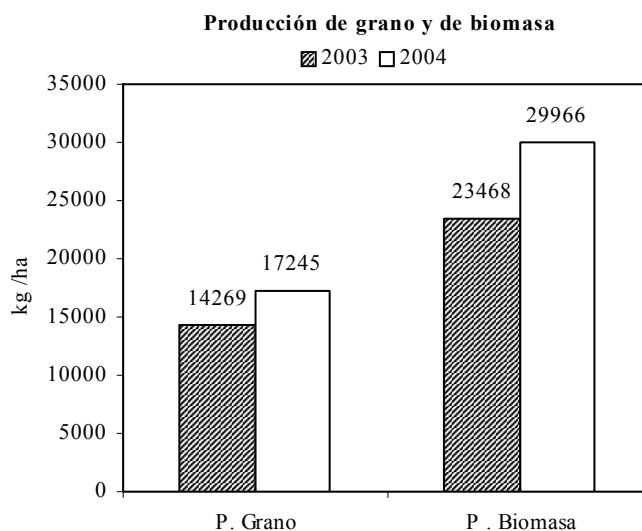


Fig. 6. Producción de grano y de biomasa durante cada uno de los dos años experimentales.

Una de las conclusiones del trabajo es que durante el periodo de riego debe valorarse la ET, ya que a finales del mes de agosto esta tiende a descender, lo que debería traducirse en una reducción de las dosis de riego para evitar el drenaje, que en este caso hemos podido observar.

Los resultados de este experimento demuestran, que en ocasiones extremas, como las que se dieron en el año 2003, con las dosis de riego puede llegar a mantenerse el cultivo, pero los efectos nocivos de las condiciones climáticas extremas acaban afectando negativamente a la producción.

*Agradecimientos.* Los autores agradecen a la Comisión de Ciencia y Tecnología la financiación del proyecto AGL 2001 2214-C06, que ha hecho posible la realización de esta investigación.

## 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.
- Díez J.A., Caballero R., Roman R., Tarquis A., Cartagena M.C. y Vallejo A. 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *J. Environ. Qual.* 29,1539-1547.
- Díez J.A., Hernáiz, P., Muñoz M.J. de la Torre A. y Vallejo A. 2004. Impact of pig slurry on soil, water salinization, nitrate leaching and crop yield in a 4 year experiment in Central Spain. *Soil Use and Management*.20, 444-450.
- Fares A. y Alva A.K. 1999. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. *Soil Sci.* 164, 302-310.
- Fares A. y Alva A.K. 2000. Soil water components based on capacitance probes in sandy soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64, 311-318.
- Paltineanu I. C. y Starr J. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 61, 1576-1585.