

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA Y NITRATO EN EL SUELO EN RIEGO POR GOTEO Y SURCOS EN EL CULTIVO DEL MAÍZ

G. Arbat¹, A. Roselló², F. Domingo Olivé², J. Puig-Bargués¹, E. González Llinàs², M. Duran-Ros¹, J. Pujol¹, F. Ramírez de Cartagena¹

¹ Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària, Universitat de Girona, C/ de Maria Aurèlia Capmany, 61, 17071 Girona, gerard.arbat@udg.edu.

² IRTA Mas Badia, Mas Badia, 17134 La Tallada d'Empordà (Girona).

RESUMEN. En el presente trabajo se analizaron los volúmenes de suelo mojado y la producción en dos parcelas cultivadas con maíz regadas por surcos y por goteo. Se analizó la distribución de nitrato en el suelo y el contenido de nitrato de la solución lixiviada en distintos tratamientos de riego por goteo con la aportación o no de fertilizante orgánico previo a la siembra y distintos niveles de nitrógeno aplicado en cobertera. En el riego por surcos y suelo arenoso, la zona del caballón donde se encuentra la planta, se mantuvo relativamente seca incluso después de regar. El riego por goteo con frecuencia diaria mantuvo un volumen de suelo mojado suficientemente extenso para humedecer la zona de desarrollo del cultivo. Los nitratos se mueven en el suelo arrastrados por el agua procedente de los emisores. La aplicación de dosis de abonado nitrogenado en cobertera superiores a 150 kg N/ha no aumentó la producción pero incrementaron la concentración de N-NO_3^- en la solución lixiviada.

ABSTRACT. In the present work soil wetting patterns and corn yield under furrow and drip irrigation were examined in two different fields. Soil nitrate distribution and nitrate content in the leached solution were analyzed in different drip irrigated treatments, with or without application of organic fertilizer at pre-planting and at different levels of nitrogen fertilization. In furrow irrigation and sandy soil, the ridge where the plant grew, was kept relatively dry even after irrigation. Drip irrigation on a daily basis produced a soil wetting pattern large enough to moisten the whole growing area of the soil. Nitrates move in the soil leached by water from emitters. Application doses of nitrogen fertilizer over 150 kg N/ha during the growing season did not increase yield but it increased the concentration of N-NO_3^- in the leached solution.

1.- Introducción

El riego por surcos es el sistema de riego tradicionalmente utilizado para el cultivo de maíz en el Empordà (Girona) y en muchas otras zonas. Sin embargo, en la región se han dado periodos de sequía que han obligado a restringir el riego agrícola. En este sentido, los agricultores se plantean la posibilidad de utilizar sistemas de riego más eficientes, como el riego por goteo aplicado al maíz. Debe considerarse además, que esta área geográfica está incluida en el mapa de

zonas vulnerables por la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias (DOGC, 2004), puesto que en ella concurren, por una parte una elevada concentración ganadera que conlleva a que la aplicación de purines como abonado de fondo sea práctica habitual y por otra las características edáficas e hidrológicas propias de la llanura aluvial.

Cote *et al.* (2003), Gärdenäs *et al.* (2005) y Hanson *et al.* (2006), utilizaron el código HYDRUS-2D para analizar el efecto de distintas estrategias de fertilización en la distribución de agua y nitratos en el suelo en riego por goteo. Sin embargo, existen muy pocos trabajos que muestren la distribución de nitratos en el suelo a partir de datos experimentales. Li *et al.* (2004) en un estudio de laboratorio y Hanson *et al.* (2006) aplicando modelos de simulación, mostraron que la distribución de nitratos está condicionada por la forma y dimensiones del volumen de suelo mojado, observándose un mayor contenido en la periferia debido a su elevada solubilidad en agua. Hanson *et al.* (2006) indican que en riego por goteo y condiciones de cultivo típicas de California el nitrato se acumularía a 150 cm de profundidad, si bien no consideraron el efecto de la lluvia.

Presumiblemente el cambio de un sistema de riego por surcos a otro de goteo reduciría el volumen de suelo mojado y permitiría aplicar el abonado nitrogenado de cobertera mediante fertirrigación, pudiendo de esta forma reducir la lixiviación hacia los acuíferos. Por otro lado, la mayor uniformidad de distribución del sistema de riego por goteo y el mantenimiento del contenido de agua en el suelo cercano a valores de capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo podría reducir el uso de agua y/o aumentar la producción de maíz.

Los objetivos del presente estudio son: (1) Comparar la distribución de agua en el suelo en el sistema de riego por surcos y goteo en el cultivo del maíz; (2) Determinar si el riego por goteo permite reducir el uso de agua manteniendo la producción en relación con el riego por surcos; y (3) Determinar el efecto de distintas estrategias de abonado nitrogenado aplicadas en riego por goteo en la producción del maíz y en la distribución de nitratos en el suelo y en el lixiviado.

2.- Material y Métodos

2.1.- Procedimiento experimental

Los ensayos se realizaron en la Estación Experimental Agrícola Mas Badia (Girona) durante el periodo 2008-2010 en dos parcelas distintas con un suelo Oxyaquic Xerofluvents (SSS, USDA, 2006). Las principales características físicas del suelo en cada uno de los ensayos se indican en la Tabla 1

Tabla 1. Porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica del suelo en el que se realizaron los ensayos.

Ensayos	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
2008	0-60	69.3	23.3	7.4	1.74
2009-10	0-120	32.0	55.0	13.0	1.46

En el ensayo realizado en 2008, con maíz regado por surcos, se midieron las dosis de agua aplicadas en cada riego, el tiempo de avance y receso de agua en los surcos y la distribución de agua en el suelo. Al final del ensayo se obtuvieron las producciones de maíz grano al inicio, 2/5, 3/5, 4/5 y al final de los surcos, cosechando una superficie de 15 m² en cada tramo. Se realizaron 3 repeticiones del mismo tratamiento en parcelas elementales de 130 m de largo y 4.5 m de ancho, con seis surcos separados 0.75 m entre ellos en un campo nivelado a una pendiente de 0.0015 m/m. Antes y después de cada riego, en una de las repeticiones se determinó el contenido de agua en el suelo con una sonda basada en la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR-IMKO Trime T-FM). Los contenidos de agua se midieron a 20, 70 y 120 m del inicio del surco y en distintas posiciones respecto de la sección transversal del surco (caballón y fondo del surco). Se tomaron medidas de contenido de agua de 0 a 0.8 m de profundidad en el caballón y de 0 a 1.80 m en el fondo del surco con intervalos de 0.2 m.

En el ensayo realizado en 2009 se realizaron 3 tratamientos: riego por surcos, y riego por goteo con dos separaciones entre emisores distintas (0.3 m (D30) y 0.5 m (D50)). Cada una de las parcelas elementales tenía unas dimensiones de 100 m de largo por 4.5 m de ancho y se realizaron 3 repeticiones de cada tratamiento. La pendiente longitudinal de la parcela era de 0.005 m/m. Los laterales de riego estaban colocados a 1.5 m de separación entre ellos y las hileras de maíz estaban separadas 0.75 m. Los emisores utilizados descargaban 4 L/h en ambos tratamientos. En cada uno de los tratamientos de riego se midió el volumen de agua aplicado en cada riego y la producción de maíz grano obtenida al inicio, 1/2 i final de las filas de siembra, cosechando mecánicamente una superficie de 15 m². En 2010 el ensayo se realizó en la misma parcela que en 2009. La totalidad de la parcela, dividida en tres repeticiones, recibió el mismo tratamiento de riego, mediante emisores de 4 L/h separados 0.5 m. Se realizaron un total de 20 tratamientos de fertilización distintos (2 de fondo x 10 en cobertera). Los dos tratamientos de abonado de fondo consistieron en aplicar 0 o 120 kg N/ha aportados mediante purines de cerdo. La aplicación se realizó con una cisterna que distribuyó los purines mediante aplicadores de

mangueras separados 0.30 m entre sí, para asegurar una buena uniformidad. Los tratamientos de cobertera consistieron en aplicar dosis de 0 a 300 kg N/ha, (con fertilizante líquido de una composición del 16% de nitrógeno en forma ureica, 8% amoniacal y 8% nítrica) repartidas durante el crecimiento del cultivo, mediante fertirrigación (Tabla 2). Las parcelas elementales fueron de 45 m². Al final del ensayo se determinó la producción de maíz grano cosechando mecánicamente una superficie de 15 m² de la parte central de cada parcela elemental.

Tabla 2. Tratamientos de abonado nitrogenado en cobertera en los que se varía las dosis y el momento de aplicación con fertirrigación.

Tratamiento	kg N/ha aplicados			kg N/ha totales
	13/07/2010	21/07/2010	30/07/2010	
T1	0	0	0	0
T2	40	0	0	40
T3	40	0	35	75
T4	40	35	0	75
T5	40	35	75	150
T6	75	75	0	150
T7	75	75	75	225
T8	150	75	0	225
T9	150	75	75	300
T10	150	150	0	300

En las 3 repeticiones del tratamiento T4, con y sin aplicación de purines como abonado de fondo, el contenido de agua del suelo fue muestreado con una periodicidad semanal a partir del 30/07/2010 y hasta el 16/09/2010 tomando muestras gravimétricas con una barrena a 0, 0.375 y 0.75 m de distancia al lateral de riego y a 0.15, 0.45, 0.75 y 1.05 m de profundidad (Fig. 3). En las mismas muestras utilizadas para determinar el contenido gravimétrico, se analizó la concentración de nitrato (N-NO₃⁻) mediante una extracción 1:1 con agua, y aplicando el método colorimétrico con tiras de indicadoras Merckoquant[®] y un lector Nitracheck[®]. Asimismo se determinó el contenido de nitrato en la solución recogida con sondas de succión instaladas a 1.0 m de profundidad en los tratamientos T1, T4 y T9 que recibieron purines.

2.2.- Descripción de las campañas de riego

Como las fechas de siembra y emergencia fueron ligeramente distintas en las 3 campañas de riego, para comparar las estrategias de riego se muestra la evapotranspiración del cultivo (*ETc*) acumulada desde emergencia hasta los 15 días posteriores al estadio de grano pastoso, cuando los riegos ya habían finalizado (Fig. 1).

En 2008 la *ETc* fue superior a la suma de lluvia y riego (*WU*) en 94.3 mm (Tabla 3), en 2009 en el ensayo de riego por surcos la *ETc* fue inferior a la *WU* en 77.7 mm y en los dos ensayos de riego con emisores separados 0.3 m y 0.5 m la *ETc* fue superior a la *WU* en 151.9 y 160.0 mm, respectivamente. En 2010 en riego por goteo con emisores separados 0.5 m la *ETc* fue ligeramente inferior a la *WU*.

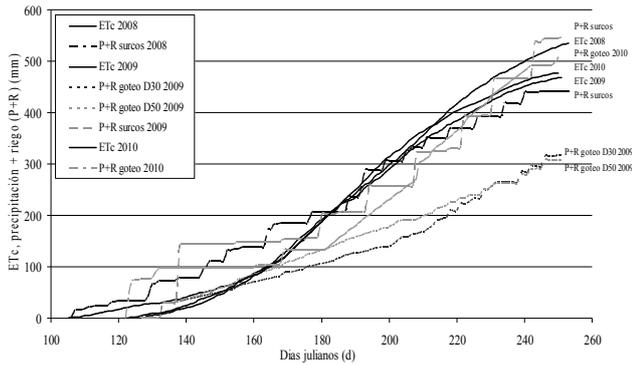


Fig.1. Evolución de las necesidades hídricas acumuladas del cultivo y de los aportes recibidos en forma de agua de riego (R) y precipitación (P).

2.3.- Modelado de la distribución de agua en el suelo

La distribución de agua en el suelo se modeló con la ecuación de Richards considerando un término sumidero para incorporar la evapotranspiración. Se utilizó el código HYDRUS (Simunek *et al.*, 2006) para resolver numéricamente la ecuación.

Las propiedades hidráulicas del suelo se consideraron según la ecuación de van Genuchten-Mualem, estimándose sus parámetros utilizando los contenidos de arena, limo, arcilla y densidad aparente mediante el código Rosetta Lite integrado en el código HYDRUS.

En riego por surcos se simuló el riego realizado el 14/08/08 y el periodo de redistribución que fue de 8 días. Las dimensiones del dominio de flujo en las simulaciones fueron de 2.00 m de profundidad y 0.75 m de ancho (Fig. 2). Los elementos finitos triangulares situados en superficie tenían unos 2 cm de lado, incrementándose con la profundidad hasta alcanzar una dimensión aproximada de 5 cm a 2 m de profundidad. El menor tamaño de los elementos situados en superficie se justifica porque en esta zona los flujos de agua fueron más activos y la geometría más compleja. Las condiciones iniciales se fijaron a partir de los contenidos de agua medidos con TDR a 20 m del inicio de los surcos en las posiciones del fondo de surco y del caballón.

Las condiciones de contorno fueron de ausencia de flujo en los márgenes derecho e izquierdo del dominio. En la zona superior se consideraron unas condiciones de contorno distintas para el periodo de riego y el de redistribución. El riego se simuló a partir de una condición de potencial en la zona del surco acorde con la lámina de agua medida durante el riego, mientras que en la redistribución se consideró una condición de flujo para contemplar la precipitación y evaporación a lo largo de toda la superficie. En el fondo del dominio de flujo se impuso una condición de gradiente de potencial hidráulico unitario. En el riego por goteo se simuló el periodo del 30/07/2010 al 16/09/2010. El dominio de flujo para la simulación del riego por goteo tuvo una extensión horizontal de 0.75 m y una profundidad de 1.50 m (Fig. 3). La dimensión de los elementos finitos triangulares en la zona de cercana al emisor fue de 0.5 cm de lado, incrementándose en las dos direcciones a medida que

aumentaba la distancia al gotero, hasta alcanzar unas dimensiones máximas de 2 cm de lado. Las condiciones de contorno fueron de ausencia de flujo en los márgenes derecho e izquierdo del dominio, mientras en la zona superior se consideraron dos zonas, una de una anchura de 0.30 m al lado del emisor donde se aplicó una condición de flujo constante de acuerdo al caudal de gotero y otra de 0.30 a 0.75 m donde se impuso una condición de contorno para permitir la infiltración de agua de lluvia. En el fondo del dominio de flujo se impuso una condición de gradiente de potencial hidráulico unitario.

En ambos sistemas de riego la extracción de agua por la planta se consideró hasta 1.10 m, con una reducción a medida que aumentaba la profundidad, siguiendo el patrón de disminución de la densidad de longitud radicular observada en campos experimentales de maíz en parcelas próximas (Ramos, 2005).

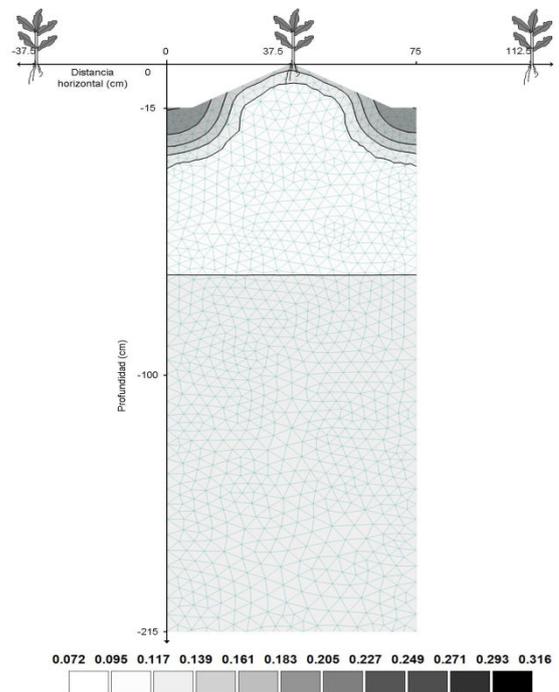


Fig.2. Distribución del contenido volumétrico (-) de agua en el suelo un día después de regar por surcos.

2.3.- Uso de agua (WU), eficiencia en el uso del agua (WUE) y déficit de agua (Def).

En los distintos tratamientos se determinó el uso de agua (WU) como:

$$WU = \text{Riego} + \text{Precipitación efectiva} \tag{1}$$

La eficiencia en el uso del agua (WUE) se calculó como:

$$WUE = \frac{\text{Producción media}}{WU} \tag{2}$$

El déficit de agua (Def) se definió como:

$$Def = ETC - WU \tag{3}$$

2.4.- Tratamiento estadístico de los datos

Se realizó un análisis de la varianza mediante el procedimiento GLM (General Linear Model) del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EE.UU).

3.- Resultados y Discusión

En el ensayo de 2008 destacó que la zona del caballón, donde se encontraba la planta de maíz, se mantuvo relativamente seca durante todo el periodo, incluso después de finalizar los riegos (Fig. 2). Esto fue debido al alto contenido en arena del suelo, con poca capacidad de redistribuir el agua lateralmente. También destacó la poca profundidad del volumen de suelo mojado. Los contenidos de agua simulados a una profundidad superior a 0.20 m no presentaron incrementos (Fig. 2), coincidiendo con las medidas tomadas con TDR. En el año 2010 el contenido de agua en el suelo a lo largo de la campaña dependió significativamente ($p < 0.05$) de la profundidad y de la distancia horizontal del lateral, pero no del aporte de purines. El contenido de agua en el suelo disminuyó a medida que aumentó la distancia horizontal al lateral y la profundidad. A 1.05 m de profundidad, el contenido volumétrico fue muy bajo y sin apenas variación en función de la distancia horizontal. La distribución del contenido volumétrico de agua en el suelo correspondiente al día 11/08/2010 (Fig. 3) simulada con HYDRUS y determinada a partir de muestras de suelo indicaron que el modelo predijo adecuadamente los contenidos de agua. Esta tendencia se observó a lo largo de todo el periodo, con contenidos de agua más elevados en superficie y cerca del lateral de riego. El frente de humedad alcanzó la zona donde se encontraba la planta (0.375 m del lateral) y la zona más seca se encontraba en el punto intermedio entre dos laterales.

Excepto en una fecha concreta (16/09/2010), no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el contenido en nitrato del suelo en los tratamientos que se había aplicado purines y los que no. Se observó que su contenido varió en función de la profundidad, la distancia horizontal del gotero y su interacción, en la mayoría de las observaciones (Figs. 4 y 5). El contenido de nitrato en los 0.15 m superficiales (Fig. 4) fue significativamente superior ($p < 0.05$) al de las demás profundidades en todas las fechas excepto las dos primeras y el 31/08/2010. Una vez establecido el cultivo (a partir del 20/05/2010) la evolución del contenido de nitrato en los cuatro intervalos de profundidades medidas fue muy similar (Fig. 4).

El contenido de nitrato en el suelo (Fig. 5) en la zona cercana al lateral de riego (0 m), para la mayoría de las fechas, fue inferior a las demás posiciones. La zona más próxima a la planta (0.375 m) presentó los valores más altos de concentración de nitrato, mientras que a partir del 24/08/2010 fue la zona más alejada a los emisores (0.75 m) donde se encontraron las mayores concentraciones de nitrato.

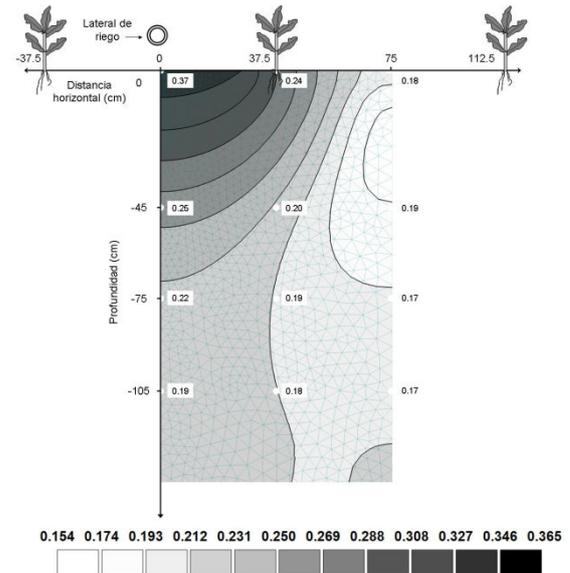


Fig.3. Distribución del contenido volumétrico de agua en el suelo respecto a la posición del lateral (0,0 en los ejes de coordenadas) correspondiente al día 11/08/2010 según la simulación con HYDRUS (curvas de contorno) y según medida procedente del muestreo (etiquetas numéricas sobre fondo blanco).

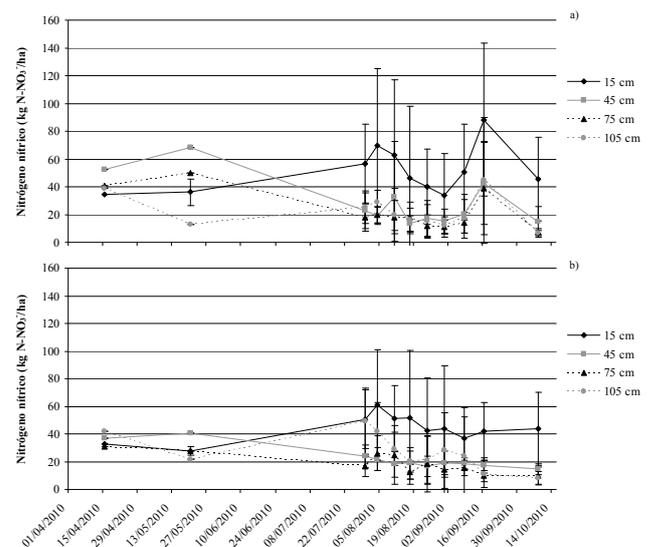


Fig.4. Evolución del contenido en nitrato en el extracto del suelo en función de la profundidad y del aporte de purines (superior) o no aporte de purines (inferior).

En la Fig. 6, correspondiente al día 11/08/2010, se observa que el contenido de nitrato fue superior en la superficie y a 0.375 y 0.75 m de distancia al lateral, lo que coincide con los resultados obtenidos por Hanson *et al.* (2006) mediante simulaciones que indican que el nitrato se mueve con el frente de humedad producido por el gotero desplazándose hacia su periferia. Cote *et al.* (2003) a partir de simular distintas estrategias de riego sugerían que es preferible aplicar el nitrato por fertirrigación al

final de los riegos para evitar que éste sea arrastrado con el agua de riego a la periferia del volumen de suelo mojado por el emisor.

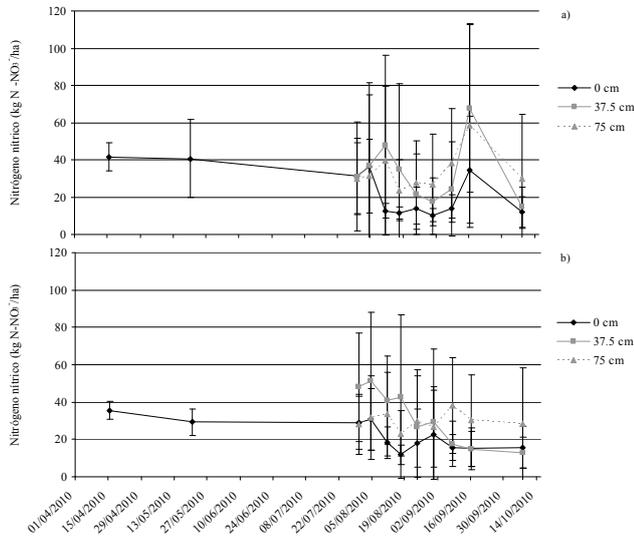


Fig.5. Evolución del contenido en nitrato en el extracto del suelo en función de la distancia al gotero y del aporte de purines (superior) o no aporte de purines (inferior), correspondiente al tratamiento T4.

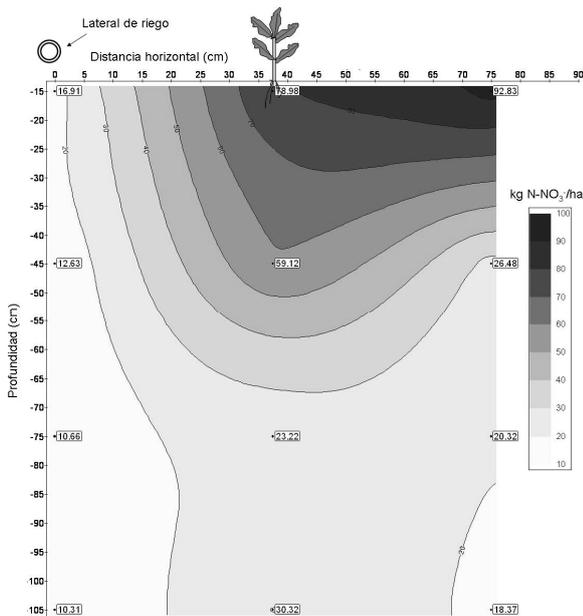


Fig. 6. Distribución del contenido de nitrato en el suelo correspondiente al día 11/08/2010 en el tratamiento T4 y aporte de purines.

En el lixiviado (Fig. 7) correspondiente al tratamiento T9, con aporte de purines de fondo, la concentración de $N-NO_3^-$ dependió de la fecha, aumentando significativamente ($p < 0.05$) al final del ciclo del cultivo cuando las extracciones por parte del cultivo se redujeron. En los tratamientos T1, que sólo recibió abonado de fondo y 4 (40, 35, 0) la concentración a lo largo del ciclo no dependió

significativamente de la fecha. Las concentraciones medias a lo largo de toda la campaña de muestreo no fueron estadísticamente distintas entre los tratamientos T1 (42.6^B ppm $N-NO_3^-$) y 4 (35.0^B), pero sí se diferenciaron del tratamiento T9 (104.9^A).

Las mayores diferencias en la concentración de $N-NO_3^-$ se observaron el 29/09/2010 (Fig. 7), justo después de la cosecha, siendo significativamente superiores en el tratamiento 9 (203.9^a) que en los tratamientos T1 (5.9^b) y 4 (23.1^b). Entre los tratamientos T1 y T4 no se observaron diferencias significativas, aunque al final del cultivo, el tratamiento T1 (sin aportes nitrogenados) mantuvo unos lixiviados con una concentración inferior a la medida en el tratamiento T4. A partir del 29/09/2010 la concentración de $N-NO_3^-$ tendió a reducirse en todos los tratamientos, probablemente a causa del lavado producido por las lluvias ocurridas en este periodo.

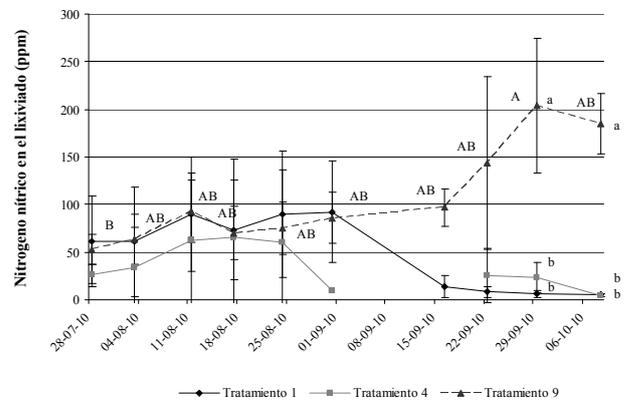


Fig.7. Evolución del contenido en $N-NO_3^-$ en el lixiviado recogido durante el año 2010 en función del tratamiento. Para cada tratamiento, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre fechas ($p < 0.05$). Para cada fecha, letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La Fig. 8 muestra las producciones obtenidas en el ensayo por surcos del año 2008 en función de la distancia desde el inicio del surco. La producción media al final de los surcos fue significativamente superior ($p < 0.05$) a la obtenida al inicio. Este hecho coincide con la mayor infiltración de agua en el tramo final de los surcos, observado en este mismo ensayo por Arbat *et al.* (2009).

Del experimento del 2009 cabe destacar que los tratamientos de riego por goteo recibieron una dosis de agua (WU) muy inferior al tratamiento regado por surcos (Tabla 3) sin observarse una reducción de la producción obtenida. Esto puede reflejar la mayor uniformidad de distribución del agua en este sistema. También es destacable el valor de la WUE , muy superior a la del riego por surcos y a los resultados obtenidos con goteo en 2010 cuando la WU no difirió en exceso de la Etc . Las importantes precipitaciones de la primavera de 2009, que habrían recargado la reserva de agua del suelo, podrían justificar estos resultados, pero no se dispone de medidas de contenido de agua en el suelo para confirmar esta

hipótesis.

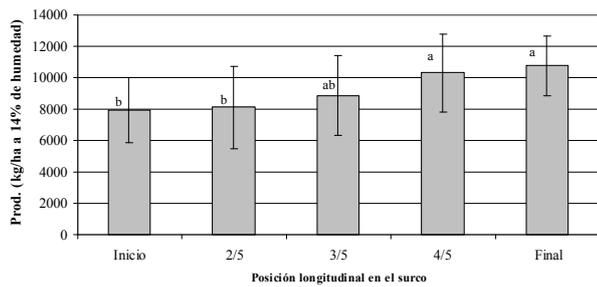


Fig. 8. Producción de maíz en el ensayo de riego por surcos (2008) en función de la distancia desde el inicio del surco. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Tabla 3. Dosis de riego (*Riego*), precipitación total (*P total*), evapotranspiración del cultivo (*ETc*), uso de agua (*WU*), producción de grano al 14 % de humedad (*Prod*), eficiencia en el uso del agua (*WUE*) y déficit de agua (*Déficit*) en cada uno de los tipos de riego y ensayo-año.

	2008	2009	2009	2009	2010
	Surcos	Goteo D30	Goteo D50	Surcos	Goteo
<i>Riego</i> (mm)	185.8	249.6	241.5	479.2	305.0
<i>P total</i> (mm)	254.0	66.4	66.4	66.4	202.2
<i>ETc</i> (mm)	234.1	467.9	467.9	467.9	476.7
<i>WU</i> (mm)	439.8	316.0	307.9	545.6	507.2
<i>Prod</i> (Mg/ha)	10.29	13.70	12.92	13.99	12.77
<i>WUE</i> (kg/m ³)	2.340	4.335	4.196	2.564	2.518
<i>Déficit</i> (mm)	94.3	151.9	160.0	-77.7	-30.5
<i>Déficit</i> (%)	17.65	32.46	34.20	-16.61	-6.40

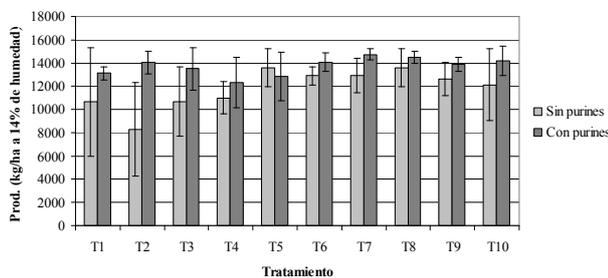


Fig.9. Producción de maíz en el ensayo de 2010 en función del tratamiento de fertilización y del aporte o no de purines de cerdo en fondo. Sin diferencias significativas ($p > 0.05$).

Por lo que se refiere a las producciones del ensayo del año 2010, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la media de todos los tratamientos que recibieron el aporte orgánico de fondo y la media de los que no lo recibieron, 13717^a y 11833^b kg/ha, respectivamente. No se observaron diferencias en función del tratamiento (Fig. 9). Las parcelas que no recibieron los purines de abonado de fondo y que además recibieron un tratamiento de abonado nitrogenado en cobertera inferior (T1-T4, abonados con menos de 75 kg N/ha), obtuvieron las menores producciones. Las parcelas con estos mismos tratamientos pero con aporte de purines en presiembra no obtuvieron producciones tan bajas, puesto

que el nitrógeno necesario para el desarrollo del cultivo podría proceder de este aporte orgánico y de la nitrificación del amonio contenido en los purines.

4.-Conclusiones

Con el riego por surcos en suelo arenoso no se consiguió humedecer la zona del caballón, donde se encontraba la planta, y esto pudo representar una reducción en la producción.

El riego por goteo con frecuencia diaria permite mantener un volumen de suelo mojado suficientemente extenso para el desarrollo del cultivo.

Aunque se observaron valores dispares de *WUE* entre los distintos años, las comparaciones en un mismo año indican que fue superior en el riego por goteo.

La distribución de nitrato en el suelo a lo largo de la campaña de riego indica que éste se mueve arrastrado por el agua procedente de los emisores, acumulándose en la periferia del frente de humedad. En riego por goteo la aplicación de purines como abonado de fondo permitió mantener la producción con aplicaciones de nitrógeno en cobertera mínimas. La aplicación de dosis de abonado en cobertera de 300 kg N/ha aumentó la concentración de NO_3^- en los lixiviados sin aumentar la producción.

5.- Referencias

Arbat, G. Domingo Olivé, F., Roselló A., Puig-Bargués, J. y Ramírez de Cartagena, F., 2009. Distribución del agua en el suelo en riego por surcos alternos y no alternos en el cultivo del maíz. En: *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol IX*, Barcelona.

Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J. y Thorburn, P.J., 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22, 143–156.

DOGC, 2004. Decreto del diario oficial de la Generalitat de Cataluña 476/2004, de 28 de diciembre, por el cual se designan las nuevas zona vulnerables en relación a la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias.

Gärdenäs, A., Hopmans, J.W., Hanson, B.R. y Simunek, J., 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for different fertigation strategies under micro-irrigation. *Agric. Water Manage.* 74, 219–242.

Hanson, B.R., Simunek, J. y Hopmans, J.W., 2006. Evaluation of urea-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agric. Water Manage.* 80, 102–113.

Li, J., Zhang, J. y Rao, M., 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricult. Water Manag.* 67, 89–104.

Ramos, B., 2005. Influència de l'aportació continuada de fems de bovi i de fertilitzant nitrogenat en el rediment i en el rentat de nitrogen nítric d'un cultiu de blat de moro en regadiu. *Projecte Final de Carrera d'Enginyer Agrònom*. ETSEA-UdL, Lleida.

Simunek, J., Sejna, M. y van Genuchten, M.T., 2006. The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. U.S. Salinity Laboratory. Riverside, California.

SSS, USDA, 2006. Keys to Soil Taxonomy. Tenth Edition. Natural Resources Conservation Service. USDA. Washington DC. 333 pp.