

LAVADO DE NITRATOS EN UN CULTIVO DE MAÍZ CON DIFERENTES TIPOS DE RIEGO

F. Domingo-Olivé¹, J. Serra¹, A. Roselló¹ y N. Teixidor²

¹ IRTA-Estació experimental Agrícola Mas Badia, Mas Badia, 17134 La Tallada d'Empordà, Girona; francesc.domingo@irta.es y joan.serra@irta.es

² Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya, Mas Badia, 17134 La Tallada d'Empordà, Girona; narcis.teixidor@irta.es

RESUMEN. El cambio de sistema de riego por superficie a riego por aspersión, para el cultivo del maíz, permitiría mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno, disminuyendo las pérdidas por lixiviación. En un ensayo plurianual con cultivo de maíz, con dos sistemas de riego, surcos y aspersión, y diferentes dosis y fraccionamiento del N se ha medido el lavado del N nítrico del suelo. El lavado de nitratos debido al aporte de fertilizante nitrogenado es poco importante y no difiere entre uno y otro tipo de riego durante el ciclo del cultivo, siendo más dependiente del contenido de N nítrico en el suelo al inicio del cultivo. El fraccionamiento de los aportes de N no implica de forma clara un menor lavado en el conjunto del período analizado.

ABSTRACT. To change irrigation system from surface to sprinkler irrigation could allow an efficiency improvement in the use of N for a maize crop, minimizing N leaching. A plurianual maize trial with two different types of irrigation, furrow and sprinkler, and different N rates and split applications was carried out and N leaching measured for several treatments. Nitrogen leaching due to fertilizer application has low importance and does not differ between types of irrigation system during the cropping cycle, being more dependent on N-nitrate content of soil at sowing. Split application of N does not clearly conduce to a lower N leaching over the cropping period.

1. Introducción

El maíz es uno de los cultivos extensivos con extracciones más elevadas de nitrógeno. La mejora genética ha hecho que las producciones del maíz sean cada vez más altas y, consecuentemente, también las extracciones de N. Es por ello que a menudo el abonado nitrogenado del mismo no se ajusta a las necesidades reales del cultivo, sino que por parte de técnicos y agricultores se apliquen dosis excesivas de N para asegurar una buena cosecha, contraviniendo las buenas prácticas agrícolas y aumentando el riesgo de contaminación de las aguas freáticas y superficiales con ión nitrato (Díez et al. 2000).

Por otra parte, el maíz se cultiva en amplias zonas con sistemas de regadío por superficie, algunos de ellos – es el caso del Empordà – de origen medieval, que por su estructura limitan en gran medida el uso de herramientas de programación del riego que permitirían una gestión eficiente y correcta del agua. En estas condiciones, además, se hace muy difícil el fraccionamiento del abonado nitrogenado. Si las dosis de N aplicado son altas, el riesgo de lavado de nitrato se incrementa notablemente. El cambio a sistemas de riego que permitan esa programación (pivot, cobertura,...) puede permitir mejorar la eficiencia en el uso del agua y, consecuentemente, la del nitrógeno a través del ajuste de dosis y del fraccionamiento. Previsiblemente se disminuiría así el riesgo de lavado de nitrato.

El cultivo de maíz en amplias zonas de Cataluña – y en particular en la zona de Girona – está localizado en zonas que han sido designadas como zonas vulnerables (ZV), de acuerdo con la Directiva Europea 91/676/CEE, donde se producen fertilizantes orgánicos de origen ganadero, estiércoles y purines, que han venido siendo utilizados tradicionalmente como abonos, y en las que son de aplicación los correspondientes programas de medidas agronómicas, que limitan las cantidades de N que es posible aportar a los diferentes cultivos.

Con el propósito general de intentar adecuar el manejo de la fertilización nitrogenada del maíz al nuevo marco legal y social, el presente trabajo se plantea el objetivo de cuantificar el lavado de N nítrico fuera de la zona radicular de un cultivo de maíz en regadío para diferentes sistemas de riego y dosis de abonado nitrogenado.

2. Material y métodos

En el año 2003, se inició un ensayo de larga duración para el estudio del lavado del N nítrico del suelo, en el cultivo del maíz en regadío, para diferentes sistemas de riego y manejo del N (dosis y fraccionamiento). El ensayo se realizó en la Estación Experimental Agrícola Mas Badia (IRTA) situada en el municipio de La Tallada d'Empordà, noreste de Cataluña, sobre un suelo de la serie Saions (DARP, 1993) clasificado, a nivel de familia, como

Xerofluent oxiácúico, franca gruesa, mezclada, calcárea, térmica (Soil Survey Staff, 1998). Es un suelo de origen aluvial, muy profundo, moderadamente bien drenado, sin problemas de salinidad, de texturas gruesas y sin elementos gruesos. La textura del horizonte superficial es franca. La de los horizontes subsuperficiales es media o moderadamente gruesa. Las principales características químicas del suelo en la parcela de ensayo se muestran en la Tabla 1. El contenido de materia orgánica del horizonte superficial es bajo. Por el contrario, los contenidos en materia orgánica de los horizontes subsuperficiales son relativamente altos, corroborando el carácter fluvéntico del suelo.

Tabla 1. Características físico-químicas del suelo, a diferentes profundidades, dónde se ha desarrollado el ensayo y se ha implantado el cultivo de maíz en regadío. La Tallada d'Empordà-Cataluña. Año 2003.

	Profundidad (cm)		
	0-30	30-60	60-90
Arena (%)	49,7	42,5	39,8
Limo (%)	43,5	48,1	48,6
Arcilla (%)	6,8	9,4	11,6
Textura USDA	Franca	Franca	Franca
pH en agua (1:2,5)	8,4	8,5	8,5
C.E. (1:5) (dS m ⁻¹)	0,19	0,20	0,19
Mat. Org. Oxid. (%)	1,30	1,01	0,80
N total (%)	0,08		
Relación C/N	9,1		
Fósforo ¹ (P) (mg kg ⁻¹)	23		
Potasio ² (K) (mg kg ⁻¹)	84		

¹ Método Olsen.

² Método del acetato amónico.

El diseño del ensayo fue factorial, en parcelas subdivididas y con 3 repeticiones. El factor principal consistió en 2 tipos de riego (aspersión y surcos –método habitualmente utilizado en la zona-). El factor secundario constaba de 6 combinaciones diferentes de dosis y fraccionamiento del nitrógeno aplicado en forma de fertilizante mineral (0, 100, 200 y 300 Kg de N ha⁻¹ en cobertera y 100 y 200 Kg de N ha⁻¹ fraccionados en función del tipo de riego). Los tratamientos se situaron sobre las mismas parcelas todos los años (2003 y 2004 en el presente trabajo). El tamaño de la parcela fue de 40 m². En los tratamientos sin aporte fraccionado del N, éste se aplicó en el estadio V6 del cultivo, 6 hojas completamente desarrolladas. En los tratamientos con aporte fraccionado del N, éste fue diferente según el tipo de riego. En el caso de riego a surcos, 1/3 de la dosis de N se aportó antes de la siembra y 2/3 en el estadio V6 del cultivo. En el caso de riego por aspersión, se realizaron 3 aportes de 1/3 de la dosis cada uno en los estadios de seis hojas desarrolladas (V6), 10 hojas desarrolladas (V10) y en el inicio de la floración (VT) del cultivo. El fertilizante nitrogenado se aplicó manualmente, a las dosis adecuadas según los diferentes tratamientos, en forma de nitrato amónico (33,5% de N) y fue enterrado inmediatamente cuando se aportó previo a la siembra y en V6, previo a la realización de los surcos de riego.

En las dos campañas se cultivó maíz (*Zea Mays* L. cv. Eleonora, ciclo 700 de FAO). La siembra se realizó el 24 de marzo y 19 de marzo para las campañas 2003 y 2004, respectivamente. La densidad de siembra fue de 80000 pl ha⁻¹. El agua de riego provenía de pozo con un contenido en nitratos inferior a los 5 mg L⁻¹. El riego se optimizó tanto para el caso del riego por aspersión, como para el riego por surcos.

Para la determinación del rendimiento se recolectó el grano de las dos líneas centrales de cada parcela, recogiendo una superficie de 1,5x10 m² en cada parcela elemental. El rendimiento obtenido en esta superficie se extrapó para una hectárea.

Las pérdidas de nitrato por lixiviación en el período entre cobertera y cosecha, que incluye el período de riego, se determinaron en 6 tratamientos, 3 en riego por aspersión y 3 en riego por surcos. Éstos fueron, el testigo sin fertilizar, el aporte de 100 Kg N ha⁻¹ en V6 y el aporte fraccionado de 100 Kg N ha⁻¹ (1/3 en fondo y 2/3 en V6 en riego por surcos; 1/3 en V6, V10 y VT en riego por aspersión). Estas pérdidas se calcularon multiplicando el volumen de drenaje de un periodo determinado por la concentración de N-NO₃ en la solución del suelo a 1,2 m de profundidad durante dicho período. El nitrato lixiviado durante la campaña se calculó sumando el lixiviado en cada periodo. El drenaje se calculó por períodos de 7-10 días aproximadamente.

La pendiente del terreno es inferior al 3% por lo que se considera que no se produce escorrentía. El agua freática se sitúa por debajo de los 2 m de profundidad según confirman las lecturas de un piezómetro de 2 m de profundidad que se mantuvo permanentemente sin agua a lo largo de todo el año. Se ha estimado, por tanto, que la ascensión capilar de agua por encima de 120 cm no se produce.

El drenaje a 1,2 m de profundidad se determinó en 2 tratamientos (testigo sin fertilizar y aporte de 100 Kg N ha⁻¹ en V6) para cada tipo de riego. El drenaje en cada periodo y para cada tipo de riego se obtuvo al hacer la media diaria de los tratamientos correspondientes. El drenaje en los tratamientos mencionados se calculó como:

$$D = P + R - ETc - VR \quad (1)$$

donde,

D = Agua drenada por debajo de 120 cm de profundidad de suelo durante un periodo determinado (L m⁻²)

P = Precipitación en el mismo periodo (L m⁻²)

R = Riego aplicado en el mismo periodo (L m⁻²)

ETc = Evapotranspiración del cultivo durante el mismo periodo (L m⁻²)

VR = Variación de la reserva del suelo hasta 120 cm de profundidad de suelo (L m⁻²).

La precipitación se ha medido en la estación agrometeorológica automatizada de La Tallada d'Empordà-Mas Badia (XAC-Xarxa Agrometeorològica de Catalunya, Generalitat de Catalunya) situada a menos de 1 Km de distancia del ensayo. Se midió el volumen de agua aplicada en cada riego mediante medidor volumétrico. La ETc del cultivo se calculó diariamente según Doorenbos y Pruitt

(1988) siguiendo la ecuación $ET_c = K_c \times ET_o$, siendo ET_o la evapotranspiración de referencia calculada por el método FAO Penman-Monteith y K_c el coeficiente sencillo del cultivo (Allen et al. 1998). La ET_o se estimó, a partir de los datos facilitados por la estación mencionada, según el método de Penman-Monteith. Los coeficientes de cultivo aplicados son los que se utilizan en el modelo para programación de riegos, PACREG, del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya (DARP, 2001).

Para cuantificar la VR del suelo se midió la humedad volumétrica del suelo mediante la técnica TDR (Time Domain Reflectometry). El equipo utilizado fue un TDR-Trime®, que obtiene sus lecturas a partir de una sonda de medida que se sitúa, al inicio y al final del período de medida escogido, a diferentes profundidades en el interior de un tubo de PVC, que permanece en el suelo y permite el acceso de la sonda TDR. En cada parcela elemental de los tratamientos que se midieron se instaló un tubo de acceso para la sonda TDR, de 1,8 m de longitud. Las profundidades de medida fueron 0,2-0,5-0,8-1,1 m de profundidad, a las que se les asignaron profundidades de suelo de 0-0,3 m, 0,3-0,6 m, 0,6-0,9 m y 0,9-1,2 m, respectivamente.

Para conocer la concentración de nitrato en la solución del suelo, se instaló una caña de succión a 1,2 m de profundidad (Lord y Shepherd 1993) en cada una de las parcelas de los tratamientos a estudiar. Se instalaron antes de la aplicación de abonado de cobertera y se mantuvieron sometidas a un vacío de 0,4-0,5 bar desde antes del primer riego hasta el final del cultivo. Las cañas de succión fueron muestreadas al final de cada período de medida del drenaje. En cada muestreo, en una alícuota de la solución extraída se determinó la concentración de $N-NO_3^-$ por colorimetría previa reducción del nitrato (Keeney y Nelson, 1982).

El lavado de nitrógeno nítrico producido en un intervalo de tiempo determinado se calculó como:

$$L = D * N / 100 \quad (2)$$

donde:

L = N nítrico lavado por debajo de 120 cm de profundidad de suelo ($Kg N-NO_3^- ha^{-1}$)

D = Agua drenada por debajo de 120 cm de profundidad de suelo durante un periodo determinado ($L m^{-2}$)

N = Concentración de nitratos en la solución extraída mediante sonda de succión a 120 cm de profundidad ($mg N-NO_3^- L^{-1}$).

3. Resultados y discusión

La producción de maíz para los distintos tipos de riego y tratamientos de fertilización nitrogenada y para los dos años de estudio (2003 y 2004) se muestra en la Tabla 2.

En el año 2003 no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.1$) en la producción de maíz entre los 2 tipos de riego, ni entre los distintos

tratamientos de abonado nitrogenado. Desde un punto de vista agronómico, la producción media en riego por aspersión en los tratamientos con aporte de nitrógeno fue un 8.5% superior a los mismos tratamientos en riego por surcos. En este último tipo de riego la producción es similar para todos los tratamientos, mientras que en el caso de riego por aspersión, los tratamientos fertilizados producen un 15.4% más que el testigo sin fertilizar.

Tabla 2. Producción del cultivo de maíz ($Kg ha^{-1}$) para los distintos tipos de riego, tratamientos de fertilización nitrogenada y años de ensayo.

Dosis N ($Kg N ha^{-1}$)	Aspersión		Surcos			
	2003 NS	2004 *	2003 NS	2004 *		
0	10966	10764	b	11482	10930	b
100	13079	13325	a	10644	12140	ab
200	13037	13827	a	11425	13170	a
300	12560	12966	a	11661	12718	a
100F ¹	11559	12409	ab	12329	13517	a
200F ¹	13029	13800	a	12291	13894	a

¹Fraccionamiento 1/3 a V6, 1/3 a V10-12, 1/3 a VT para riego por aspersión o 1/3 en fondo y 2/3 a V6 para riego por surcos.

NS: No existen diferencias significativas entre los tratamientos ($\alpha=0,1$)

*: Separación de medias entre tratamientos ($\alpha =0,1$) según Tukey; medias seguidas de la misma letra no son diferentes entre ellas

En el año 2004 no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.1$) para la producción de maíz entre los 2 tipos de riego, pero sí entre el tratamiento sin fertilizar y el resto de tratamientos de abonado nitrogenado, para ambos tipos de riego. La producción media en los tratamientos con aporte de nitrógeno fue un 23.2% y un 19.7% superior a la del tratamiento sin fertilizar para el caso de riego por aspersión y de riego por surcos, respectivamente. La producción en el año 2004 fue superior a la del año 2003, especialmente en el caso del riego por surcos, debido a las elevadas temperaturas alcanzadas en la campaña 2003 que influyeron negativamente en la producción de maíz.

En ningún caso se detectaron diferencias de producción importantes entre los aportes de N únicos y fraccionados, para los dos tipos de riego.

La inexistencia de diferencias de producción entre diferentes dosis de N en el año 2003 puede ser debido a los elevados contenidos de N nítrico en el suelo (0-120 cm) al inicio del cultivo ($335 Kg N ha^{-1}$). En el año 2004 este contenido era menor ($136 Kg N ha^{-1}$) y se obtuvieron diferencias en producción entre el tratamiento sin fertilizar y los tratamientos con aporte de N.

En la Tabla 3 se muestran el drenaje, el riego, la ET_o y la lluvia medidos en el período considerado, para los diferentes tipos de riego y años.

El volumen de agua de riego aplicada en el año 2003 fue superior en el caso de riego por surcos. A pesar de eso la producción de maíz fue superior en el riego por aspersión.

El drenaje en este año fue ligeramente superior para el caso de riego por surcos.

En el año 2004, el volumen de riego aplicado fue superior en el riego por aspersión debido a un error de manejo ocurrido en el periodo del 5 al 10 de agosto de 2004, en el que se aplicaron 111 L m⁻² en lugar de los aproximadamente 35 L m⁻² que hubiesen sido correctos. En estas condiciones el drenaje medido ha sido superior al esperado si el riego hubiese sido el correcto. En caso de no haberse producido este percance, el drenaje para el riego por aspersión se hubiese situado a un nivel similar al medido para el riego por surcos.

Tabla 3. Volumen de riego aplicado (L m⁻²), ETo (L m⁻²), precipitación (L m⁻²) y drenaje medido (L m⁻²) para los distintos tipos de riego y años de ensayo.

Parámetro	Aspersión		Surcos	
	2003	2004	2003	2004
<i>Drenaje</i>	126.8	163.1	145.1	92.8
<i>Riego</i>	234.3	350.1	336.0	279.8
<i>Precipitación</i>	115.9	63.5	115.9	63.5
<i>ETo</i>	323.3	286.2	323.3	286.2

En la Tabla 4 se muestra la cantidad de N nítrico lixiviado para los diferentes tratamientos dónde se ha medido lavado en los años 2003 y 2004.

Tabla 4. N nítrico lixiviado (Kg N-NO₃⁻) para los distintos tipos de riego, tratamientos de fertilización nitrogenada y años de ensayo.

Dosis N (Kg N ha ⁻¹)	Aspersión		Surcos	
	2003	2004	2003	2004
0	166.8	16.0	133.8	9.9
200	165.1	55.4	269.8	19.3
200 F ¹	227.7	16.7	130.1	33.3

¹Fraccionamiento 1/3 a V6, 1/3 a V10-12, 1/3 a VT para riego por aspersión o 1/3 en fondo y 2/3 a V6 para riego por surcos.

Para el año 2003 no se observan diferencias de lavado de N nítrico entre diferentes tipos de riego. Para el riego por aspersión, el lavado en el tratamiento con fraccionamiento del N aplicado es superior al del tratamiento sin fraccionamiento que no difiere del testigo sin fertilizar. En el caso de riego por surcos, por contra, el lavado en el tratamiento sin fraccionamiento del N aplicado es un 107% superior, es decir, más del doble, al del tratamiento con aplicación fraccionada del N o el testigo sin fertilizar.

El lavado medio medido en el año 2004 representa un 14% del medido en el 2003. Siendo debida esta diferencia principalmente a un mayor contenido de N nítrico en el suelo y en la solución del suelo para el año 2003 y no a la cantidad de agua drenada que es menor para el año 2004.

Como se ha comentado, en el año 2004 se produjo una

anomalía en el riego por aspersión al aplicar en un riego una cantidad de agua excesiva. Esto puede haber provocado un mayor lavado de N nítrico en este período. Pero de hecho, este mayor lavado sólo ha sido remarcable en el caso de la aplicación de 200 Kg N ha⁻¹ sin fraccionar, provocando un lavado de 40 Kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. El lavado acumulado durante todo el ciclo, en este tratamiento, probablemente no hubiera superado los 20 Kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ si no se hubiese producido el exceso de riego ocurrido. En estas condiciones no se hubieran observado diferencias en el lixiviado de N nítrico entre tratamientos en el año 2004.

4. Conclusiones

El lavado de nitratos debido al aporte de fertilizante nitrogenado es poco importante y no difiere entre uno y otro tipo de riego durante el ciclo del cultivo, siendo más dependiente del contenido de N nítrico en el suelo al inicio del cultivo. Es, por tanto, importante conocerlo.

El fraccionamiento de los aportes de N no implica de forma clara un menor lavado en el conjunto del período analizado

Agradecimientos. El presente trabajo se ha financiado a través del proyecto coordinado RTA03-066-C4-1 del INIA.

Referencias

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. Y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service.
- DARP. 1993. Mapa de sòls detallat (E. 1:25000) del Marge Esquerre del Baix Ter (Alt i Baix Empordà). Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Generalitat de Catalunya. Lleida
- DARP. 2001. PACREG 4.1 Una eina per a l'ús eficient de l'aigua de reg en parcel·la. Programa informàtic. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Generalitat de Catalunya. D.L. L-433-2001.
- Diez, J.A., Caballero, R., Román, R., Tarquis, A., Cartagena, M.C. y Vallejo, A. 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. Journal of Environmental Quality, 29. 1539-1547.
- Domingo, F., 2001. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en el conreu de blat de moro. Jornada Técnica sobre blat de moro. IRTA-DARP.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1988. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje, 24.
- Keeney, D.R. y Nelson, D.W. 1982. Nitrogen Inorganic Forms. En: Methods of Soil Analysis. Part 2. A.L. Page et al. (eds.), pp 643-698. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.
- Lord, E.I. y Shepherd, M.A. 1993. Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. Journal of Soil Science. 44:49-62
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to soil taxonomy. 8th ed. 326 pp. USDA.NRCS.