



Cosecha del cultivo de tomate.

Evaluación del lavado de nitratos en el cultivo del tomate para industria

Nuria Vázquez, Alfonso Pardo, María Luisa Suso

Sección de Recursos Naturales. (CIDA)

Miguel Quemada

Dpto. Producción Vegetal: Fitotecnia. ETSI Agrónomos. UP Madrid



Extracción de la solución del suelo.

Aumentar la frecuencia de riego, reduciendo la aportación de agua, mantiene la producción y optimiza el uso del agua y nitrógeno, según los ensayos realizados en el CIDA con riego por goteo y acolchado plástico

La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nitratos es un tema que ha llegado a ser preocupante ya que, cada vez con más frecuencia, se alcanzan concentraciones que pueden afectar a la salud y a la calidad ambiental. La producción agrícola ha sido identificada como la causa principal de contaminación difusa en aguas que no alcanzan los objetivos de calidad marcados (Directiva 91/676/CEE). Las zonas más vulnerables a esta contaminación están ligadas a las áreas agrícolas, generalmente de regadío, con cultivos especialmente exigentes en nitrógeno (maíz, remolacha, hortalizas). Obviamente, este proceso se agrava cuando se aplican dosis excedentarias de riego y de nitrógeno, prácticas que han llegado a ser habituales entre los agricultores, debido a que el coste de los fertilizantes es bajo comparado con el precio del producto, y a que los efectos de una excesiva aplicación de fertilizante nitrogenado, a menudo, no son visibles.

Si las aplicaciones de fertilizante nitrogenado son muy elevadas, el porcentaje de nitrógeno extraído por el cultivo, con respecto al nitrógeno aplicado, disminuye y aumenta el nitrógeno residual en el suelo susceptible de ser lixiviado (por riego o lluvia). También es importante conocer las características de crecimiento del cultivo, ya que permite acoplar los aportes de fertilizante a las demandas. Aún así, si las dosis de fertilizantes y el momento

de aplicación se ajustan a las necesidades del cultivo, pero se aplican volúmenes de agua superiores a los requeridos por el mismo, el exceso de agua arrastrará el nitrato fuera de la zona radicular, por lo que, además de contaminar los cursos de agua, puede llegar a producirse una falta de nitrógeno para el cultivo. Por tanto, para manejar correctamente la fertilización nitrogenada es necesario realizar al mismo tiempo un manejo correcto del riego, ajustando la dosis y la frecuencia a las necesidades del cultivo.

El problema se debe en gran medida a que los agricultores aplican sistemáticamente, como mínimo, dosis de N equivalentes a las exportaciones de N por el cultivo y en ocasiones dosis superiores, con objeto de garantizarse la máxima producción, sin realizar análisis de suelos y mucho menos sin considerar el N que se genera en el suelo procedente de la mineralización de la materia orgánica. Esta práctica conduce a que en el suelo se acumulen cantidades de nitrógeno residual muy elevadas con capacidad potencial contaminante.

El riego por goteo permite una aplicación más dirigida del agua y los nutrientes y así incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno. La aplicación de fertilizantes a través del riego por goteo puede reducir el uso de fertilizante y minimizar la contaminación de las aguas subterráneas por el lixiviado de

fertilizante provocado por la lluvia o riego excesivo.

Las prácticas habituales en los cultivos hortícolas de trasplante en el valle del Ebro, que utilizan sistemas de riego por goteo y acolchado plástico, consisten en la aplicación de riegos masivos en la fase del trasplante, para asegurar de esta forma la supervivencia de las plántulas. Una vez asegurada ésta, el cultivo se mantiene mediante riegos de frecuencia entre uno y dos días hasta poco antes de la recolección. Actualmente, la mayor parte de la superficie del cultivo de tomate para industria se realiza con estas técnicas.

En estudios previos de este sistema de cultivo pudimos concluir que las mayores pérdidas de agua y nitrógeno se producían durante la fase de trasplante. Durante la fase de cultivo, regando de acuerdo a las necesidades calculadas por FAO 56, se produjo drenaje a 1 m, por lo que el riego aplicado superó las necesidades del cultivo.

Como consecuencia de estos resultados se planteó un ensayo en un cultivo de tomate para industria con riego por goteo y acolchado plástico, con el objetivo de optimizar el riego y reducir las pérdidas de nitrógeno en este sistema de cultivo, mediante un manejo más adecuado de la frecuencia y la dosis de riego.

Material y métodos

Los experimentos se realizaron durante los años 2001 y 2002 en la finca del CIDA, en Valdegón (Agoncillo), sobre un suelo clasificado como Typic Xerofluvient con la capa freática a una profundidad superior a cuatro metros. Al inicio de los ensayos se analizó el suelo de las parcelas en las que se ubicarían los ensayos. Se trata de suelos bien estructurados con un porcentaje de arena muy bajo a lo largo de todo el perfil y un contenido de materia orgánica elevado, superior al 2% en la capa superficial y al 1% a 1 m de profundidad.

El trasplante se realizó el 17 y el 13 de mayo de los años 2001 y 2002, respectivamente. Se empleó la variedad de tomate Brigade cultivada en mesetas de 1 m de anchura, separadas 1,5 m entre ejes y con una distancia entre plantas de 0,20 m.



Cabezal de riego.

La fertilización se realizó en función de la fertilidad del suelo y consistió en la aplicación de 50-190-90 kg/ha (año 2001) y 50-150-75 kg/ha (año 2002) de NPK. En fondo se aplicó todo el fósforo y el potasio, en forma de complejo 0-14-7. En cobertera se aplicó el nitrógeno mediante fertirrigación, realizándose seis aplicaciones, una por semana, a partir de la cuarta semana desde el trasplante.

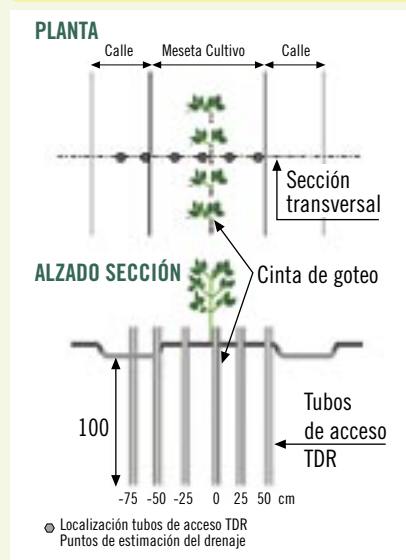
Se evaluaron distintos tratamientos de riego (tabla 1) con el fin de optimizar el aporte de agua y reducir las pérdidas de nitrógeno. Para ello, se dividió el periodo total de cultivo en dos fases: 1°. trasplante, desde el inicio de los riegos previos al trasplante hasta que la planta estuvo arraigada; 2° cultivo, desde este momento, en que se inicia la programación del riego en función de la evapotranspiración, hasta la recolección.

El diseño experimental se realizó en bloques de 6x30 m, correspondiendo cada uno de ellos con uno de los tratamientos de riego estudiados.

Para conocer las necesidades del cultivo se calculó diariamente la evapotranspiración del mismo mediante el método de los coeficientes (FAO56), empleando la expresión: $ET_c = K_c \times ET_0$.

La ET_0 fue calculada por el método de FAO Penman-Monteith. Los coeficientes de cultivo empleados se muestran en la

Figura 1. Estación de medida de la humedad volumétrica del suelo. Unidades en cm



Esquema general de la parcela elemental en el momento del trasplante.

Tabla 1. Tratamientos de riego aplicados al cultivo de tomate

Trat.	Fase de trasplante	Fase de cultivo
T1R1	Riegos continuos (8 a 10 horas)	1 riego diario al 100% de la ET_c
T1R2	Riegos continuos (8 a 10 horas)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 80% de la ET_c
T2R3	Riegos de alta frecuencia (8 riegos diarios)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 100% de la ET_c
T2R2	Riegos de alta frecuencia (8 riegos diarios)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 80% de la ET_c

T1R1: Tratamiento correspondiente a la práctica habitual en la zona.

Tabla 2. Coeficientes de cultivo (K_c) aplicados al cultivo de tomate en riego por goteo y acolchado (Sc: suelo cubierto; Fm: frutos maduros)

Estado de desarrollo del cultivo	K_c	Estado de desarrollo del cultivo	K_c
Trasplante-10% Sc	0,15	80% sc-10% Fm	1,10
10-30% Sc	0,30	10-50% Fm	1,00
30-50% Sc	0,55	50-80% Fm	0,70
50-80% Sc	0,90	Cosecha	0,60

tabla 2, y fueron modificados según las propuestas de Allen et al. (1998) y Pereira et al. (1998) para tener en cuenta el grado de desarrollo del cultivo, las condiciones evaporativas y la fracción de suelo mojado. Se consideró lluvia útil aquella superior a 10 mm en sucesos aislados o superior a 15 mm en periodos de tres días consecutivos (Luc, 1998) y para el cálculo del riego se empleó un tercio de su valor. El corte de riego se produjo 8 y 10 días antes de la recolección los años 2001 y 2002, respectivamente.

La recolección se realizó el 29/08/01 y el 2/09/02 con el 80% de frutos maduros. Se cosecharon 5 m de longitud (7,5 m²) en una de las líneas centrales de cada parcela, controlándose la producción total y la comercial.

El nitrógeno absorbido por el cultivo se calculó multiplicando la concentración de nitrógeno en cada una de las partes de la planta, determinado por el método Kjeldahl, por la materia seca producida.

Al inicio y al final del ensayo se realizó un perfil de contenido de nitrato y

amonio del suelo en 1 m de profundidad, tomándose las muestras cada 0,2 m. La extracción se realizó con KCl 1 M y se analizó el contenido de nitrato por colorimetría previa reducción en columna de cadmio (Keeney y Nelson, 1982) y el de amonio según el método descrito por Solórzano (1969).

Determinación de la lixiviación de nitrato. El lavado de nitrato por debajo de 1 m se calculó multiplicando la concentración de nitrato en la solución del suelo por el drenaje estimado.

El volumen de drenaje se calculó aplicando la expresión del balance de agua en el suelo, $P+R = ET_c \pm VR + D$ (donde P es la precipitación, R el agua aplicada en el riego, ET_c la evapotranspiración del cultivo calculada, VR es la variación de la reserva de agua en el suelo y D es el drenaje), a una sección transversal a la cinta de goteo definida por seis puntos de medida (figura 1). Semanalmente se realizaron medidas de la humedad volumétrica con sonda tubo TDR para cuantificar la VR en el periodo estudiado.





Cultivo en el momento de la cosecha.
Situación de los tubos de acceso TDR
y de las sondas de succión.

Figura 2. Producción comercial y eficiencia en el uso del agua. Años 2001 y 2002.
Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0,05$)



Para conocer la concentración de nitrato en la solución del suelo se instalaron en cada tratamiento 6 cañas de vacío provistas de una cápsula de cerámica a 1 m de profundidad y así obtener muestra de la solución del suelo. Semanalmente, de forma simultánea con la medida de TDR, se recogió la solución del suelo y se analizó su contenido en nitrato.

Tanto el drenaje como el lavado de nitratos se calcularon semanalmente y se acumularon en las dos fases definidas en los tratamientos de riego.

Balance de nitrógeno. Considerando las entradas y salidas más importantes de nuestro sistema suelo-planta analizamos el balance de nitrógeno a 1 m de profundidad empleando la siguiente ecuación:

$$N_{mn} - N_d = (N_i + N_p + \Delta N_s) - (N_f + N_e)$$
 donde: N_f : N aportado como fertilizante,
 N_e : N aportado con el agua de riego,
 N_{mn} : N aportado por mineralización neta de la materia orgánica del suelo en 1m,
 N_d : N lixiviado por debajo de 1 m de profundidad,
 N_p : N extraído por el cultivo,
 N_d : Pérdidas de N por desnitrificación,
 ΔN_s : Variación del contenido de N mineral en el perfil del suelo durante el cultivo en 1 m.

Resultados y discusión

Los rendimientos obtenidos ambos años fueron elevados, superiores a 100 t/ha de producción total (figura 2). El tratamiento T2R3 mostró, los dos años, mayor producción comercial que el considerado como práctica habitual en la zona (T1R1), debido al mayor número de frutos. Por tanto, los tratamientos de alta frecuencia en el trasplante aseguraron el arraigo de las plantas al igual que los riegos continuos. La producción no disminuyó por este cambio de técnica de riego y se logró reducir el aporte de agua. El fraccionamiento del riego durante el cultivo, incluso con una reducción del aporte de agua equivalente al 80% de la ETc, permitió asegurar la producción.

Por lo tanto, la aplicación de riegos de alta frecuencia permitió disminuir la dosis de agua y así aumentar la eficiencia de su uso, que en todos los casos fue superior al tratamiento T1R1 (figura 2).

Evolución temporal del drenaje y del lixiviado de nitrato. En la fase de trasplante, los tratamientos con riego continuo (T1R1 y T1R2) presentaron un drenaje muy elevado, alcanzando valores en torno a los 150 l/m² y 110 l/m² en los años 2001 y 2002, respectivamente.

En esta misma etapa, el drenaje en los tratamientos con riego de alta frecuencia (T2R3 y T2R2) fue significativamente menor, y supuso como máximo el 50% del drenaje alcanzado en los tratamientos con riego continuo (figura 3).

En el año 2001, al inicio del periodo de cultivo prácticamente no se produjo drenaje en ninguno de los tratamientos. A partir del 10 de julio, en los tratamientos con riego al 100% de la ETc, el drenaje aumentó de forma continua, mientras que continuó siendo prácticamente nulo en los tratamientos con riego al 80% de la ETc. Sin embargo, durante el año 2002, posiblemente debido a las lluvias caídas al inicio de la fase de cultivo, se produjo drenaje en todos los tratamientos hasta el 7 de junio. Durante las dos semanas siguientes prácticamente no se produjo drenaje en ninguno de los tratamientos y, finalmente, a partir del 24 de junio, mientras que en el tratamiento T2R2 casi no se produjo drenaje, excepto tras la lluvia del 8 de julio, en el resto de los tratamientos se produjo un aumento más o menos continuo del mismo. Los dos años, en el momento de la cosecha, el drenaje total en los tratamientos T2R3 y T1R2 prácticamente se igualó (figura 3).

El lixiviado de nitrato (figura 4) siguió la misma pauta del drenaje, pero con un error mayor debido a la mayor variabilidad espacial de la concentración de nitrato en la solución del suelo, que interviene en el cálculo de este valor.

Excepto el tratamiento T2R3, el comportamiento de ambos años fue similar. Durante la fase de trasplante se lixiviaron aproximadamente 100 kg/ha en los tratamientos con riego de alta frecuencia (T2) y 200 kg/ha en los tratamientos de riego continuo (T1). En la fase de cultivo, el año 2001 se produjo un lixiviado en torno a los 50 kg/ha, mientras que en el año 2002, excepto en el tratamiento T2R3, el lixiviado de nitrato osciló en torno a los 170 kg/ha. Durante este año, se produjeron más tormentas a lo largo del periodo de cultivo, lo que provocó un mayor drenaje que, junto a la mayor concentración de nitrato en la solución del suelo, provocó un mayor lixiviado. La menor lixiviación de nitrato del tratamiento T2R3 durante el año 2001 fue debida a la diferencia

Figura 3. Evolución del drenaje acumulado (l/m²), símbolos y líneas, en los diferentes tratamientos de riego. Eventos de lluvia semanales (l/m²), barras verticales, los años 2001 y 2002

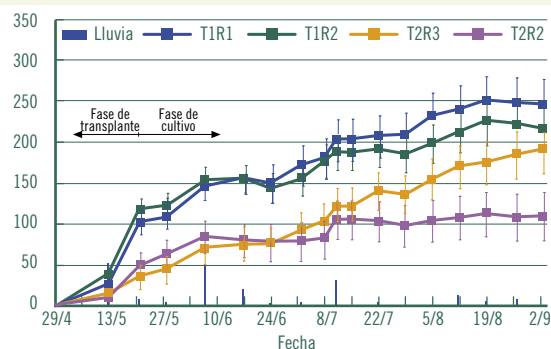
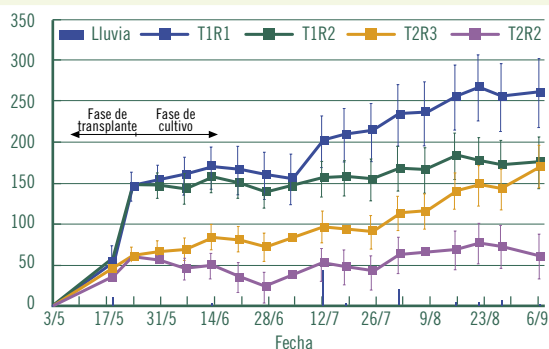
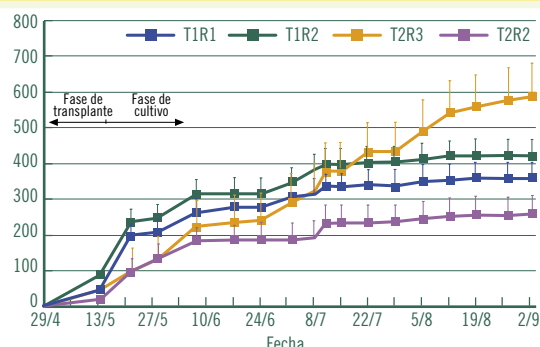
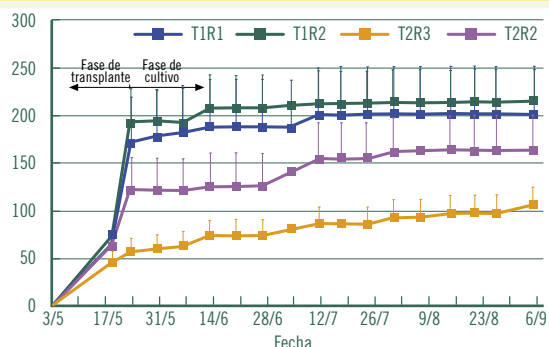


Figura 4. Evolución del lixiviado de N-NO₃ acumulado (kg/ha) en los diferentes tratamientos de riego durante los años 2001 y 2002



producida durante la fase de trasplante, provocada por la menor concentración inicial de nitrato en la solución del suelo.

Por tanto, en el año 2001, el mayor drenaje y lixiviado de nitrato se produjo durante la fase de trasplante, excepto en el tratamiento con riego de alta frecuencia en ambas fases y aporte de agua durante el cultivo igual al 100% de la ETc (T2R3), en que ocurrió a lo largo de todo el cultivo. En el año 2002, tanto el drenaje como el lavado de nitrato, se produjo a lo largo de las dos fases, trasplante y cultivo, debido a una mayor pluviometría durante la fase de cultivo.

Balance de agua. En la tabla 3 se presentan los resultados del balance de agua en las fases de trasplante y cultivo. Con la aplicación de riegos de alta frecuencia

en una o las dos fases se redujo significativamente el drenaje, que para los tratamientos T1R2 y T2R3 fue del 33% y 16% en los años 2001 y 2002, y en el tratamiento T2R2 del 77% (año 2001) y del 55% (año 2002).

El objetivo de la fase de trasplante es asegurar el establecimiento del cultivo, lo que se consiguió con las dos pautas de riego empleadas, riegos continuos durante 10 horas y riegos de alta frecuencia. Pero, en los tratamientos de riego de alta frecuencia en el trasplante, se aplicó menos del 50% de agua que en los de riego continuo, produciéndose un drenaje significativamente menor.

En la fase de cultivo, con los tratamientos de riego de alta frecuencia al

80% de la ETc (T1R2 y T2R2) disminuyó significativamente el drenaje. Sin embargo, no se observaron diferencias en el drenaje obtenido al aplicar el 100% de la ETc en un único riego diario (T1R1) o mediante riegos de alta frecuencia (T2R3). En el año 2002, el drenaje acumulado durante la fase de cultivo fue significativamente superior al del año 2001, posiblemente debido a la lluvia.

En este trabajo se ha comprobado que una restricción del riego al 80% de la ETc reduce significativamente el drenaje sin que la producción se vea afectada.

Balance de nitrógeno. En la tabla 4 se presentan los resultados del balance global de nitrógeno durante el periodo completo de cultivo.

El término mineralización aparente incluye la mineralización neta y la desnitrificación. Un valor negativo de dicho término ($N_{mn} - N_d$) indicaría que las pérdidas gaseosas son mayores que la mineralización neta y viceversa. En nuestro caso en todos los tratamientos se produce una mineralización neta muy elevada.

Los suelos hortícolas en los que se ha llevado a cabo el trabajo son ricos en materia orgánica en profundidad y están bien aireados; por tanto, aunque la mineralización sucede principalmente en los primeros 20 cm, en este caso también ha



Realización de extractos de suelo para determinación de nitrato y de amonio.

Tabla 3. Balance de agua (L / m²) hasta 1 m de profundidad

Trat.	Trasplante				Cultivo			
	Riego	Lluvia	ETc	Drenaje	Riego	Lluvia	ETc	Drenaje
Año 2001								
T1R1	160,6	12,4	8,7	146,8 ^b	452,4	97,0	480,4	114,2 ^b
T1R2	162,4	12,4	8,7	149,5 ^b	365,4	97,0	492,6	27,0 ^a
T2R3	78,8	12,4	8,7	63,4 ^a	453,4	97,0	494,1	107,9 ^b
T2R2	73,9	12,4	8,7	60,1 ^a	361,6	97,0	493,3	1,1 ^a
Año 2002								
T1R1	122,7	56,8	22,4	100,8 ^b	473,8	130,2	473,5	144,1 ^b
T1R2	114,4	56,8	22,4	117,3 ^b	406,4	130,2	487,2	98,3 ^a
T2R3	40,7	56,8	22,4	35,1 ^a	475,8	130,2	489,9	156,0 ^b
T2R2	49,4	56,8	22,4	48,0 ^a	364,0	130,2	481,2	61,0 ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna y en el mismo año según la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

Tabla 4. Balance de nitrógeno (Kg N/ha) hasta 1 m de profundidad

Trat.	Entradas ⁽¹⁾	N planta	Salidas			ΔN ⁽²⁾ suelo	Mineralización aparente
			Lixiviado				
			Trasplante	Cultivo	Total		
Año 2001							
T1R1	59,0	445 a	172 b	30 a	202 ab	-80,6	507 ± 60,4 a
T1R2	58,3	423 a	194 b	20 a	213 b	-58,9	519 ± 45,8 a
T2R3	56,7	441 a	57 a	49 a	107 a	-82,7	408 ± 60,6 a
T2R2	54,6	437 a	122 ab	41 a	163 ab	-81	465 ± 41,4 a
Año 2002							
T1R1	57,7	298 a	194 ab	162 a	356 ab	-341,1	255 ± 109,7 a
T1R2	58,3	311 a	233 b	188 a	421 ab	-169,7	504 ± 155,5 ab
T2R3	55,7	399 a	100 ab	487 b	588 b	-272,4	658 ± 123,4 b
T2R2	53,3	296 a	96 a	161 a	257 a	-322,4	178 ± 80,2 a

(1) Abonado N mineral + aporte en agua de riego.

(2) Variación del contenido de N mineral en el perfil del suelo (profundidad: 1m) durante el cultivo.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna y en el mismo año según la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0,05$).

podido producirse en profundidad (Jarvis et al., 1996). Por otro lado, al tratarse de parcelas sin cultivar en los dos últimos años, la humectación de las mismas ha favorecido la mineralización del nitrógeno.

El menor valor observado en el tratamiento T1R1 del año 2002 fue debido a que la capa superficial (0-20 cm) presentó valores superiores al 35% de humedad volumétrica. Estas condiciones de humedad disminuyeron la disponibilidad de oxígeno, reduciendo la mineralización y favoreciendo las pérdidas por desnitrificación. Por el contrario, en el tratamiento T2R2, el volumen de suelo humedecido a capacidad de campo fue menor, debido a que recibió menos agua, disminuyendo así el volumen de suelo con las condiciones óptimas de mineralización.

Aunque en el año 2002 la acumulación de nitrato inicial en el perfil del suelo fue muy superior a la del año 2001, en am-

bos años se produjo una mineralización aparente elevada. Por tanto, en el valle del Ebro, en los sistemas hortícolas estudiados, la mineralización del nitrógeno de la materia orgánica del suelo es un factor muy importante de entrada de nitrógeno en el sistema suelo planta. Por ello, es necesario profundizar en su estudio para así optimizar el uso del nitrógeno y disminuir los efectos nocivos que su pérdida por percolación profunda puede provocar sobre las aguas subterráneas.

Conclusiones

El sistema habitual de cultivo del tomate para industria en el valle del Ebro, con riego por goteo y acolchado plástico, conduce a unas pérdidas elevadas de agua y nitrógeno, fundamentalmente en la fase de trasplante.

Con los riegos de alta frecuencia en la fase de trasplante se consigue redu-

cir de modo notable el agua drenada (más del 50%) y el lixiviado de nitrato (más del 30%), asegurando el establecimiento del cultivo de modo similar a los riegos continuos aplicados normalmente en este sistema.

Los riegos de alta frecuencia combinados con una reducción del riego, aportando el equivalente al 80% de la ETc, durante la fase de cultivo permiten reducir el drenaje sin que la producción se vea afectada.

La mineralización de N observada en los suelos fue muy elevada, lo que sugiere que es necesario profundizar en su estudio para aumentar la eficiencia del N disponible y disminuir la lixiviación de nitratos.

Por lo tanto, aumentar la frecuencia de riego ha permitido reducir la aportación de agua manteniendo la producción y optimizando el uso de agua y nitrógeno.