

DRENAJE Y LIXIVIADO DE NITRATOS EN UNA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN SISTEMA DE CULTIVO HORTICOLA CON RIEGO POR GOTEO Y ACOLCHADO PLASTICO

N. Vázquez¹, A. Pardo¹, M^a. L. Suso¹, M. Quemada²

¹ Centro de Investigación y Desarrollo Agrario (C.I.D.A.), NA-134, km 88, 26071, La Rioja. agro.cida@larioja.org

² Departamento de Producción Vegetal: Fitotenia. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica. 28040. Madrid. mquemada@pvf.etsia.upm.es

RESUMEN. El objetivo de este trabajo fue la determinación del volumen de agua drenada y de la cantidad de nitrato lavado en sistemas agrícolas no uniformes en cuanto a su distribución espacial. El estudio se realizó en un cultivo de tomate (*Lycopersicon sculentum* Mill) en el que se practicaron cuatro estrategias de riego durante el verano del año 2001 en el Valle del Ebro. El cultivo se plantó sobre mesetas cubiertas de plástico negro. En el centro se enterró la cinta de goteo y a su lado se puso la plántula. Las estrategias de riego utilizadas fueron las siguientes: dosis masiva en plantación con riego diario igual a la ETc durante el periodo de crecimiento (T1R1) o con riego de alta frecuencia igual al 80% de la ETc durante el crecimiento (T1R2), y dosis reducida y alta frecuencia en plantación seguido de riego de alta frecuencia durante el periodo de crecimiento (T2R3 si el agua aplicada era igual al 100% de la ETc, y T2R2 si era del 80%). Para cuantificar la variación de la reserva de agua del suelo se instalaron 6 tubos de 1 m de profundidad para el acceso de una sonda TDR en una sección transversal a la línea de cultivo. Las medidas se realizaron semanalmente en intervalos de 0,20 m de profundidad. El drenaje se calculó aplicando la ecuación del balance de agua: i) a los tubos situados en el centro y el extremo de la sección transversal a la línea de cultivo y ii) a los seis tubos de la sección. Para calcular el lixiviado de nitrato a 1 m de profundidad se multiplicó el drenaje semanal por la concentración de la solución del suelo. Esta solución se recogió con cañas de vacío provistas de una cápsula cerámica a 1 m de profundidad, situadas en el centro y en el extremo de la sección. El drenaje y lavado de nitratos se calcularon para dos fases del cultivo: trasplante y cultivo. Con ambos métodos se observó que la mayoría de las pérdidas de agua y nitrógeno se produjeron durante la fase de trasplante. El empleo del 2º método para el cálculo del drenaje aumentó la precisión y permitió diferenciar el drenaje y el lixiviado de nitrato entre las distintas estrategias de riego empleadas.

was conducted in a field cropped with tomato (*Lycopersicon sculentum* Mill), cultivated under four different irrigation strategies during 2001 in the Ebro Valley. A drip line was buried under the midline of soil beds covered with plastic mulch. A single line of tomato seedlings was planted on the side of the drip line. The four different irrigation strategies were: large dose at planting followed by daily irrigation equal to the ETc during the growth period (T1R1) or followed by daily irrigation equal to the 80% ETc (T1R2), reduced dose and high frequency at planting followed by high frequency during the growth period (T2R3 if water applied was 100% ETc, and T2R2 if it was 80% ETc). Monitoring transversal sections that provide measurements of soil water content were established in each treatment. Each transect represent the spatial distribution of the main components of the agricultural system, and was composed of 6 TDR probe access tubes inserted into the soil at 0.25 m intervals, being the drip line in the centre of the transect. Weekly measurements were made at 0.2 m deep intervals in each tube, starting at 0.1 m and continuing to 1 m. Drainage was calculated by applying the water balance equation: i) to the tubes located at the centre and the extreme of the transect, and ii) to the six tubes of the section. To evaluate nitrate leached to 1 m depth, the drainage volume was multiplied by the nitrate concentration of the soil solution at that depth. The soil solution at 1 m depth was extracted by porous ceramic cups located on the centre and the extremes of the transects. Drainage and nitrate leaching were evaluated for two different crop periods: planting and growth. Both methods of drainage calculation showed that most of the drainage and nitrate losses occurred during the planting period. Calculation of drainage by the second method increased accuracy and allowed to distinguish among the effect of the different treatments on water and nitrogen losses.

ABSTRACT. The objective of our research was to determine drainage and nitrate leaching in agricultural systems that present uneven spatial distribution. The study

1. Introducción

El drenaje y la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas son difíciles de medir y normalmente se recurre a métodos indirectos para su estimación. Podemos encontrar revisiones de los distintos métodos empleados para medir ambas variables en Addiscott (1990), Armstrong y Burt (1993), Ramos y Kücke (1999) y Pampolino *et al.* (2000). Estos métodos se aplican considerando únicamente el movimiento unidimensional del agua. Por ello es necesario definir métodos para poder determinar estas variables en sistemas agrícolas que por su distribución espacial requieran un estudio diferente, como en el caso de sistemas de cultivo con riego por goteo y/o acolchado plástico.

Actualmente la mayor parte de la superficie de cultivo de tomate para industria en el valle del Ebro se realiza con riego por goteo y acolchado plástico. La técnica habitual de riego en este sistema de cultivo consiste en la aplicación de riegos masivos en la fase de trasplante destinados a humectar la parte superior del perfil del suelo para asegurar el arraigo de las plantas. Una vez asegurada ésta, se mantiene el cultivo con riegos de frecuencia entre uno y dos días hasta poco antes de la recolección. Estas prácticas contribuyen a incrementar el riesgo de contaminación de las aguas por el uso ineficiente del agua y nitrógeno.

El objetivo de este trabajo fue definir una metodología para la determinación del volumen de agua drenada y de la cantidad de nitrato lavado en sistemas agrícolas no uniformes en cuanto a su distribución espacial. Se presenta la aplicación de dicha metodología para evaluar el drenaje y el lixiviado de nitratos en un ensayo de tomate para industria realizado en el valle del Ebro.

2. Material y métodos

El ensayo se ha realizado durante el verano del año 2001 en la finca del CIDA en Valdegón (La Rioja) situada en el valle del Ebro, sobre un suelo clasificado como Xerochrept calcixerollico (tabla1).

Tabla 1. Propiedades físico-químicas del suelo.

	Valdegón
Arena (%)	4,4
Limo (%)	57,4
Arcilla (%)	38,2
Textura USDA	Fr-Ac-L
Densidad aparente (g/cm ³)	1,4
M.O. oxidable (%)	1,7
pH (1:2,5)	8,5
C.E. (mmhos x cm ⁻¹)	0,2
N total (p. mil N)	1,7
Relación C/N	5,8
Humedad Cc (-0,3 bar; %)	27,6
Humedad Pm (-15 bar; %)	18,3

En un cultivo de tomate (*Lycopersicon sculentum* Mill) var. Brigade con acolchado plástico negro y riego localizado por goteo, se ensayaron los tratamientos de

riego definidos en la tabla 2, siendo el T1R1 el correspondiente a la práctica habitual en la zona.

Tabla 2. Tratamientos de riego aplicados al cultivo.

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

El diseño experimental se realizó en bloques, de forma que cada uno se correspondía con uno de los tratamientos de riego definidos. Cada bloque (6x30 m) se dividió en tres parcelas sobre las que se establecieron cuatro mesetas de 1 m de ancho, separadas 1,5 m entre ejes, y 0,1 m de alto. Las mesetas, en cuyo centro se enterró (0,05 m) la cinta de goteo, fueron cubiertas con plástico negro en el momento de su establecimiento. El trasplante se realizó a mediados de mayo a una densidad de 33.333 plantas ha⁻¹, colocándose las plantas sobre la meseta a 0,05 m de la cinta de goteo (fig. 1).

El plástico utilizado fue PE negro de 0,030 mm de espesor y 1,20 m de anchura. La cinta de goteo presentaba emisores cada 0,2 m y un caudal unitario de 1 Lh⁻¹ a 0,55 bar. La fertilización consistió en la aplicación de 50-190-90 kg ha⁻¹ de NPK. En fondo se aplicó todo el fósforo y el potasio en forma de complejo 0-14-7, y el nitrógeno se aplicó por fertirrigación en forma de N32, realizándose seis aplicaciones semanales a partir de la cuarta semana desde el trasplante.

La ET₀ fue calculada por FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración del cultivo, ETc, se calculó diariamente a través de la expresión: ETc = Kc x ET₀. Los coeficientes de cultivo Kc aparecen en la tabla 3 y para su aplicación fueron corregidos en función de la velocidad del viento, la humedad relativa mínima y la altura de la planta; se realizó una corrección en función de la fracción de suelo mojada y debido a la presencia del acolchado se consideraron los coeficientes basales, según la propuesta de Allen *et al.* (1997), Pereira *et al.* (1998) y Luc (1998). Se consideró lluvia útil aquella superior a 10 mm en sucesos aislados o superior a 15 mm en periodos de tres días consecutivos, y teniendo en cuenta el riego por goteo y el acolchado plástico, para la programación del riego se utilizó un tercio de su valor (Luc, 1998). El corte del riego se produjo 8 días antes de la recolección.

Tabla 3. Coeficientes de cultivo (Kc) aplicados al cultivo de tomate con acolchado plástico y riego por goteo. sc=suelo cubierto, fm=frutos maduros

Desarrollo del cultivo	Kc	Desarrollo del cultivo	Kc
Trasplante-10% sc	0,15	80% sc-10% fm	1,20
10-30% sc	0,30	10-50% fm	1,05
30-50% sc	0,60	50-80% fm	0,75
50-80% sc	1,00		

Al inicio y al final del ensayo se determinó en cada parcela el contenido de N mineral del suelo en un perfil de 1 m de profundidad, tomándose las muestras cada 0,2 m. Se realizó un extracto con CIK 1 M y se analizó el contenido en nitratos por colorimetría, previa reducción en columna de cadmio (Keeney y Nelson, 1982) y el de amonio según el método descrito por Solórzano (1969).

El nitrógeno absorbido por el cultivo se calculó multiplicando la concentración de nitrógeno determinada por Kjeldahl (AOAC, 1990) en cada una de las partes de la planta por la materia seca producida.

La recolección del tomate se realizó el 29/08/01 con el 80% de frutos maduros. Se controló la producción total y comercial.

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 a través del balance de agua.

Debido a la asimetría del sistema estudiado, tanto por la distribución del cultivo como por la aplicación del agua con la cinta de goteo, se determinó el drenaje a diferentes distancias de la línea de aplicación de agua. Primeramente se planteó el estudio basándonos en dos puntos de medida, uno situado en la vertical del punto de goteo y otro en la del centro de la calle, a priori más húmedo y más seco respectivamente. Posteriormente, con el fin de poder evaluar de una forma más precisa la evolución del bulbo húmedo y la humedad del suelo, se pasó a una malla más amplia formada por seis puntos de medida en una sección transversal a la línea de goteo (figura 1).

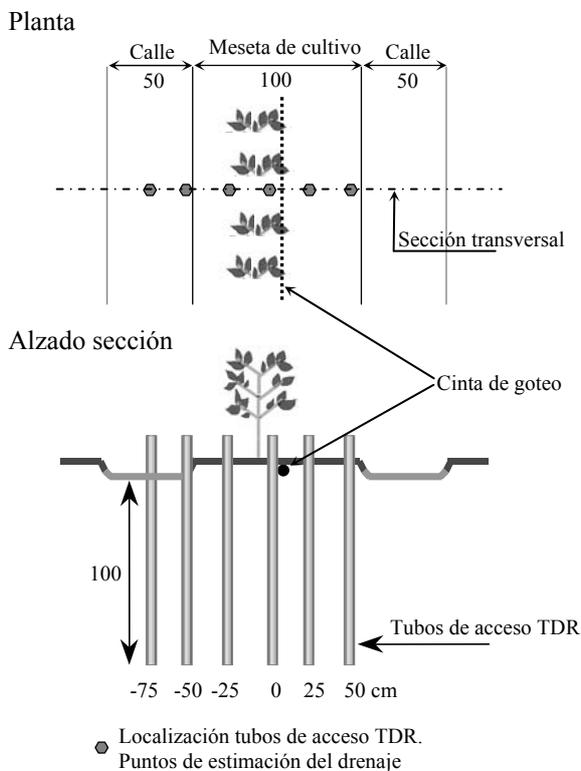


Fig. 1. Sección transversal de la estación de medida de la humedad volumétrica del suelo. Puntos de estimación del drenaje.

El drenaje a 1 m de profundidad se determinó aplicando la ecuación del balance de agua (Luc, 1998) en la vertical de cada uno de los puntos de medida. Posteriormente se calculó el de la sección como la media del drenaje obtenido en los puntos que se consideran en los siguientes casos:

- Método de cálculo 1: empleando el mínimo número de puntos para caracterizar la sección, que correspondería a dos puntos: el situado en la vertical de la cinta de goteo (0) y el situado en el centro de la calle (-75).

- Método de cálculo 2: utilizando los seis puntos situados sobre la línea transversal y separados 25 cm entre sí.

Para cuantificar la variación de la reserva de agua del suelo (VR) se midió semanalmente la humedad volumétrica mediante la técnica TDR (Topp *et al.*, 1980), para lo cual en una de las parcelas de cada bloque se instalaron seis tubos para el acceso de sonda TDR (fig. 1).

Para obtener muestra de la solución del suelo a 1 m de profundidad en cada tratamiento se instalaron seis cañas de vacío provistas de una cápsula cerámica a 1 m (Lord y Shepherd, 1993). En cada parcela se instalaron 2 cañas, una en el eje de la meseta y otra en el de la calle. Semanalmente, de forma simultánea con la medida de TDR, se recogió la solución del suelo y se analizó su contenido en nitratos por colorimetría, previa reducción en columna de cadmio (Keeney y Nelson, 1982).

Tanto el drenaje como el lixiviado de nitrato se calcularon semanalmente y se acumularon en dos fases: la de trasplante, desde el inicio de los riegos de trasplante hasta que la planta estuvo arraigada, y la de cultivo, desde este momento, en que se inicia la programación del riego en función de la evapotranspiración, hasta la recolección.

Los resultados obtenidos han sido analizados estadísticamente por un ANOVA y en caso de detectarse un valor significativo de F, se ha realizado la comparación de medias aplicando el test LSD de Fisher. En el caso de la lixiviación de nitrato se ha realizado la comparación de medias mediante un test-t de Student.

3. Resultados y discusión

3.1. Determinación del drenaje

En la tabla 4 se observan los valores obtenidos del drenaje determinados por los dos métodos de cálculo.

Tabla 4. Drenaje obtenido en las distintas fases del cultivo según el método de cálculo empleado.

Trat.	Método 1			Método 2		
	Trasplante	Cultivo L / m ²	Total	Trasplante	Cultivo L / m ²	Total
T1R1	143± 1 ^b	119± 11 ^b	261± 12 ^c	147± 7 ^b	114± 10 ^b	261± 4 ^c
T1R2	165± 38 ^b	15± 45 ^a	180± 7 ^b	150± 15 ^b	27± 18 ^a	177± 10 ^b
T2R3	59± 19 ^a	121± 12 ^b	180± 7 ^b	63± 11 ^a	108± 8 ^b	171± 6 ^b
T2R2	55± 2 ^a	26± 21 ^{ab}	82± 19 ^a	60± 8 ^a	1± 14 ^a	61± 10 ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna (x ± SE) según la prueba de LSD (α ≤ 0,05)

Al comparar entre los métodos 1 y 2, no se han observado diferencias entre los valores medios del drenaje obtenidos para cada una de las fases de cultivo y para cada uno de los tratamientos.

Como podemos observar en la tabla 4, ambos métodos permitieron detectar diferencias entre tratamientos cuando analizamos el drenaje en el periodo total del cultivo. Así, podemos afirmar que el mayor drenaje se obtuvo para el tratamiento T1R1, mientras que los tratamientos T1R2 y T2R3 supusieron una reducción del drenaje de un 30% con respecto al tratamiento T1R1, y el tratamiento T2R2 supuso una reducción del 70%.

Ambos métodos permitieron identificar la fase de cultivo en la que se producen mayores pérdidas de drenaje, pero el método 2 presentó mayor capacidad para comparar entre tratamientos. Así, utilizando cualquiera de los métodos se observa que en la fase de trasplante, la utilización de un riego de alta frecuencia (T2R3, T2R2) logró reducir el drenaje a una tercera parte del que se obtuvo durante esta fase en aquellos tratamientos en los que se empleó el riego masivo (T1R1, T1R2). Durante la fase de cultivo, el método 2 mostró mayor capacidad para discriminar entre tratamientos, permitiendo distinguir entre el mayor drenaje obtenido al aplicar un volumen de riego del 80 o del 100% de la ETc. Sin embargo, durante esta fase el método 1 no mostró diferencias significativas entre los tratamientos T1R1, T2R3 (100% ETc) y el tratamiento T2R2 (80% ETc), debido probablemente al menor número de grados de libertad asociados al test estadístico.

Por tanto, los dos métodos de cálculo utilizados permitieron cuantificar el drenaje e identificar la fase del cultivo en la que se producen mayores pérdidas de drenaje. Sin embargo, el método 2 nos permite dar un valor más preciso del mismo y realizar una mejor discriminación entre los sistemas de cultivo estudiados.

3.2. Determinación de la lixiviación de nitrato

Comparando los métodos 1 y 2, no se han encontrado diferencias entre los valores medios de N-NO₃ lixiviado obtenidos para cada tratamiento en cada una de las fases del cultivo. Con el método de cálculo 1 no somos capaces de discriminar en cuanto a lixiviación de nitrato entre tratamientos en ninguna de las fases en que dividimos el periodo total del cultivo, mientras que con el método 2, podemos diferenciar el nitrógeno lixiviado entre los tratamientos estudiados (tabla 5), posiblemente debido al número de grados de libertad para la realización del test estadístico asociados a cada método.

Por tanto, utilizar el método de cálculo 2 para determinar el drenaje con el que posteriormente calcularemos la lixiviación de nitrato, nos permite dar un valor más preciso del lavado de nitrato producido al disminuir el error estándar, y discriminar mejor entre los distintos tratamientos analizados.

Tabla 5. N-NO₃ lixiviado en las distintas fases del cultivo según el método de cálculo de drenaje empleado.

Trat.	Método de cálculo de drenaje 1			Método de cálculo de drenaje 2		
	Trasplante	Cultivo	Total	Trasplante	Cultivo	Total
	Kg / ha			Kg / ha		
T1R1	167± 42 ^a	46± 20 ^a	212± 47 ^a	172± 46 ^b	30± 14 ^a	202± 48 ^{ab}
T1R2	213± 48 ^a	19± 16 ^a	232± 50 ^a	194± 32 ^b	20± 7 ^a	213± 33 ^b
T2R3	53± 15 ^a	62± 17 ^a	115± 22 ^a	57± 12 ^a	49± 12 ^a	107± 17 ^a
T2R2	112± 27 ^a	47± 27 ^a	159± 38 ^a	122± 27 ^{ab}	41± 18 ^a	163± 36 ^{ab}

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna (x ± SE) según el test-t (α ≤ 0,05)

3.3. Evolución temporal del drenaje y lixiviado de nitrato

Ambos métodos permiten realizar un seguimiento continuo del drenaje y lixiviado de nitratos durante la campaña de cultivo, observándose una evolución similar para ambas metodologías (Figs. 2, 3, 4 y 5).

Durante la fase de trasplante los tratamientos con dosis masiva de riego (T1R1 y T1R2) producen un drenaje muy elevado. Al inicio del periodo de cultivo prácticamente no se produce drenaje en ninguno de los tratamientos hasta el 10 de julio cuando en los tratamientos con riego al 100% de la ETc (T1R1 y T2R3) se produce un aumento continuo del drenaje mientras que sigue siendo prácticamente nulo en los tratamientos con riego al 80% de la ETc (T1R2 y T2R2). En el momento de la cosecha el drenaje total en los tratamientos T2R3 y T1R2 se igualó (Figs. 2 y 3).

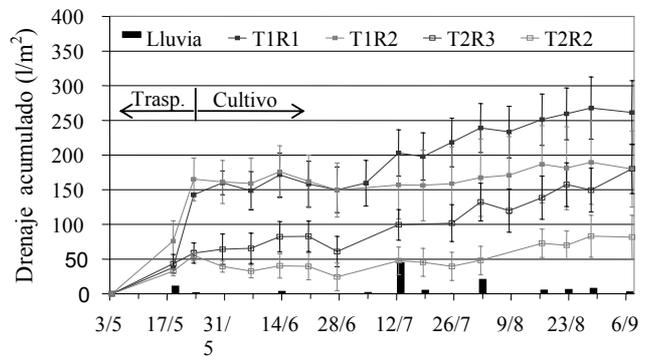


Fig. 2. Drenaje acumulado. Método de cálculo 1.

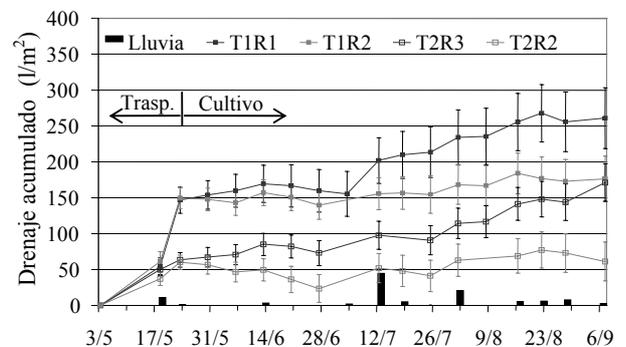


Fig. 3. Drenaje acumulado. Método de cálculo 2.

El lixiviado de nitrato (Figs. 4 y 5) siguió la misma pauta del drenaje, pero con un error mayor debido a la mayor heterogeneidad espacial de la concentración de nitrato en la solución del suelo, que interviene en el cálculo de este valor.

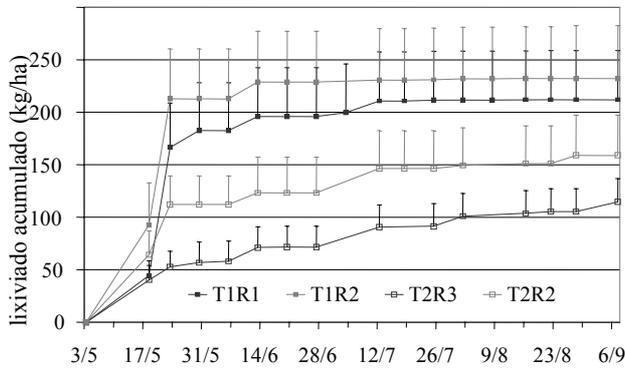


Fig. 4. N-NO₃⁻ lixiviado. Método de cálculo 1.

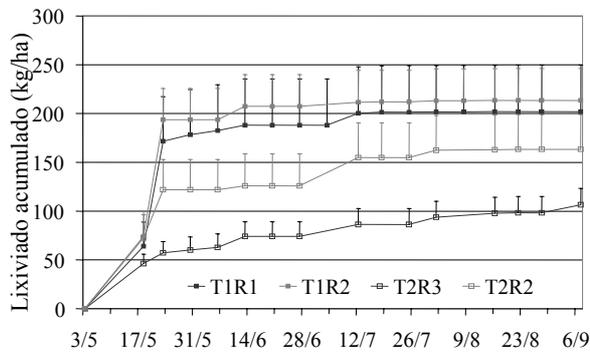


Fig. 5. N-NO₃⁻ lixiviado. Método de cálculo 2.

3.4. Producción

Todos los tratamientos se mostraron más productivos que el considerado como práctica habitual en la zona (T1R1) debido principalmente al mayor número de frutos, en este tratamiento la eficiencia en el uso del agua (EUAr) fue significativamente menor (tabla 6). Los tratamientos de alta frecuencia en el trasplante fueron capaces de asegurar el arraigo de las plantas sin afectar a la producción pero con un menor aporte de agua que los riegos masivos (tablas 6 y 7).

Tabla 6. Resultados de la cosecha de tomate y eficiencia en el uso del agua (EUAr).

Tratamiento	Total (t/ha)	Cosecha comercial		EUAr (Kg/ha mm)
		(t/ha)	(g/fruto) (frutos/m ²)	
T1R1	145,2 ^a	112,9 ^a	67,1 ^c	156,3 ^a
T1R2	157,9 ^{ab}	126,7 ^{ab}	58,7 ^a	198,8 ^b
T2R3	175,7 ^b	134,0 ^b	62,6 ^b	208,9 ^{bc}
T2R2	150,5 ^a	121,5 ^{ab}	60,0 ^{ab}	223,0 ^c

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna según la prueba de LSD ($\alpha \leq 0,05$)

3.5. Balance de agua y nitrógeno

Los resultados obtenidos de la aplicación del balance de agua en las fases de trasplante y cultivo aparecen en las tablas 7 y 8 respectivamente. Como ya hemos indicado la determinación del drenaje con el método de cálculo 2 nos permite una mejor estimación del mismo y por lo tanto los comentarios posteriores sólo hacen referencia a los datos obtenidos por este método de cálculo.

En la fase de trasplante, en los tratamientos de riego con alta frecuencia se aplicó menos del 50% de agua que en los tratamientos de aporte masivo y se produjo un drenaje significativamente menor. En esta fase, debido al escaso desarrollo del sistema radicular del cultivo, es necesario mantener la humedad a un nivel de potencial de agua bajo para asegurar el arraigo del mismo, por ello en todos los tratamientos se superaron ampliamente las necesidades y se incrementó la reserva de agua en el suelo.

Tabla 7. Balance de agua hasta 1 m de profundidad en los diferentes sistemas de cultivo de tomate durante el periodo de trasplante.

Tratamiento	Riego	Lluvia	ETc	VR ⁽¹⁾	Drenaje
			(L / m ²)		
T1R1	160,6	12,4	8,7	17,6	147 ^b
T1R2	162,4	12,4	8,7	16,7	150 ^b
T2R3	78,8	12,4	8,7	19,1	63 ^a
T2R2	73,9	12,4	8,7	17,5	60 ^a

(1) VR: Variación de la reserva de agua en el suelo en 1 m de profundidad.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna según la prueba de LSD ($\alpha \leq 0,05$)

En el periodo de cultivo con los tratamientos de alta frecuencia y riego al 80% de la ETc se redujo significativamente el drenaje. La variación de la reserva disminuyó en todos los tratamientos por el corte de riego realizado días antes de la cosecha.

Tabla 8. Balance de agua hasta 1 m de profundidad en los diferentes sistemas de cultivo de tomate durante el periodo de cultivo.

Tratamiento	Riego	Lluvia	ETc	VR ⁽¹⁾	Drenaje
			(L / m ²)		
T1R1	452,4	97,0	480,4	-45,2	114 ^b
T1R2	365,4	97,0	492,6	-57,2	27 ^a
T2R3	453,4	97,0	494,1	-51,5	108 ^b
T2R2	361,6	97,0	493,3	-35,8	1 ^a

(1) VR: Variación de la reserva de agua en el suelo en 1 m de profundidad.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna según la prueba de LSD ($\alpha \leq 0,05$)

Los resultados del balance global de nitrógeno aparecen en la tabla 9. El contenido de nitrógeno en forma amoniacal en el suelo fue similar al inicio y al final, mientras que el contenido en nitrato se redujo considerablemente. Al comparar las salidas de N del sistema, el absorbido por el cultivo más el lixiviado, con el

N aplicado como fertilizante más la variación de la reserva en el suelo, se deduce que el suelo aportó una gran cantidad de nitrógeno por mineralización que se ve favorecida por las condiciones de humedad y temperatura que proporciona el riego por goteo y el acolchado plástico. En trabajos previos (datos no publicados) se observó que el acolchado con plástico negro provoca un incremento de la temperatura del suelo en la zona radicular con respecto al suelo desnudo. Este incremento fue de 3,5° C hasta el 30% de suelo cubierto por el cultivo, disminuyendo a 1,5° C desde este momento hasta el final del cultivo. La alta temperatura del suelo y la humedad promueve la mineralización de la materia orgánica del suelo (Quemada y Cabrera, 1997; Stanford *et al.*, 1975). Este hecho ya se observó en anteriores estudios (Vázquez *et al.*, 2001)

El lixiviado de nitrógeno siguió la pauta del agua drenada, atenuándose las diferencias debido a la elevada variabilidad espacial de la concentración de nitrato en el suelo.

Tabla 9. Balance de nitrógeno hasta 1 m de profundidad en los diferentes sistemas.

Tratamiento	UF N ⁽¹⁾	$\Delta N^{(2)}$ en suelo		N-NO ₃ lixiviado		N-planta
		N-NO ₃	N-NH ₄	Trasplante	Cultivo	
Kg / ha						
T1R1	52	-79 ^a	-2 ^a	172 ^b	30 ^a	445 ^a
T1R2	53	-59 ^a	0 ^a	194 ^b	20 ^a	423 ^a
T2R3	51	-85 ^a	2 ^a	57 ^a	49 ^a	441 ^a
T2R2	50	-82 ^a	2 ^a	122 ^{ab}	41 ^a	437 ^a

(1) UF N: Unidades de fertilizante nitrogenado aplicado.

(2) ΔN en suelo: Variación de nitrógeno en el suelo entre el inicio y el final del cultivo

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna según el test-t Student en lixiviado y según la prueba de LSD en el resto ($\alpha \leq 0,05$)

El mayor drenaje y lixiviado de nitrato se produce durante la fase de trasplante, excepto en el tratamiento con riego de alta frecuencia en ambas fases al 100% de la ETc, en que se produce a lo largo de todo el cultivo. Como se ha indicado, en la fase de trasplante se pretende crear un horizonte húmedo en la superficie del suelo para asegurar el arraigo de las plantas. En suelos de buena permeabilidad, como son los de este ensayo, esta práctica implica la humectación de buena parte del perfil edáfico y el drenaje del agua aplicada en exceso. En consecuencia, se favorece el lavado del nitrato almacenado en el perfil impidiendo su utilización por el cultivo y deteriorando la calidad del agua drenada.

4. Conclusiones

Calcular el drenaje como la media del determinado en una sección transversal a la cinta de goteo es una herramienta adecuada para medir el drenaje en este tipo de cultivo, además de permitirnos seguir la evolución del mismo a lo largo del tiempo.

En el valle del Ebro, ha permitido identificar los volúmenes de drenaje y lixiviado en la fase de trasplante de un cultivo de tomate y diseñar una estrategia basada en el aumento de la frecuencia de riego y control de la dosis que permite optimizar el uso de agua y N.

Referencias

- Addiscott, T.M. 1990. Measurement of nitrate leaching: a review of methods. En "Nitrates, Agriculture, Eau" Calvet R. (ed) pp.157-168. INRA. Paris.
- Allen, R.G., M. Smith, L.S. Pereira, y W.O. Pruitt. 1997. Proposed revision to the F.A.O. procedure for estimating crop water requirements. *Acta Hort.* 449: 17-33.
- Allen, R.G., L.S. Raes, y D.M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Roma. 300 págs.
- AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15th Ed. Harwitte W. (Ed.) pp. 127-129. Association of official analytical chemist. Washington (EEUU).
- Armstrong, A.C. y Burt, T.P. 1993. Nitrate losses from agricultural land. En: "Nitrate: Processes, Patterns and Management". Burt T.P., Heathwaite A.L. and Trudgill S.T. (eds.). John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, pp:239-267.
- Keeney, D.R. y Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. En A. L. Page et al. (ed.) *Methods of analysis, Part 2. Agronomy 9*: 643-698. ASA and SSSA, Madison, WI, EEUU.
- Lord, E.I. y M.A. Shepherd. 1993. Developments in the use of ceramic cups for measuring nitrate leaching. *Journal of Soil Science 24*: 435-449
- Luc, J.P. 1998. Réserve en eau des sols et bilan pédoclimatique, approche pratique. En J.R. Tiercelin (ed.), *Traité d'irrigation*, pp 191-206. Lavoisier, Paris.
- Pampolino, M.F., Urushiyama, T. y Hatano, R. 2000. Detection of nitrate leaching through bypass flow using pan lysimeter, suction cup, and resin capsule. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 (3), 703-711.
- Pereira, L.S., M. Smith y R. Allen. 1998. Méthode pratique de calcul des besoins en eau. En J.R. Tiercelin (ed.), *Traité d'irrigation*, pp 206-231. Lavoisier, Paris.
- Quemada, M. y Cabrera, M.L. 1997. Temperature and water effects on nitrogen mineralization from surface-applied cover crop residues. *Plant and Soil 189*: 127-137.
- Ramos, C. y Kücke, M. 1999. Revisión crítica de los métodos de medida de lixiviación de nitrato en suelos agrícolas. En: "Estudios de la zona no saturada del suelo". Muñoz-Carpena R., Ritter A. y Tascón C. (eds). ICIA, Tenerife, pp: 25-32.
- Solorzano, L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by phenolhypochlorite medium. *Limnol Oceanogr.* 14: 799-801.
- Stanford, G., Frere, M.H. y Van der Pol, R.A. 1975. Effect of fluctuating temperatures on soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.* 119: 222-226.
- Topp, G.C., J.L. Davis y AP. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582.
- Vázquez, N., M. Quemada, A. Pardo, y M.L. Suso. 2001. Evaluación del lavado de nitratos en un cultivo de tomate en riego por goteo y acolchado plástico. En: López J.J. y Quemada M. (Eds.). *Temas de Investigación en Zona no Saturada*, 25-28. Universidad Pública de Navarra, Pamplona.