

ESTIMACIÓN DEL DRENAJE Y LAVADO DE NITRATOS EN UN SISTEMA DE CULTIVO DE CEREAL DE INVIERNO EN CONDICIONES DE SECANO Y CLIMA MEDITERRÁNEO HÚMEDO

L.M. Arregui¹, I. Maeztu¹ y M. Quemada²

¹ Dpto. Producción Agraria. ETSIA. Universidad Pública de Navarra. Campus de Arrosadía s/n 31006 Pamplona (España); arregui@unavarra.es

² Dpto. Producción Vegetal: Fitotecnia. ETSIA. Universidad Politécnica de Madrid. 28040. Madrid (España); miguel.quemada@upm.es

RESUMEN. Los objetivos de este trabajo fueron estudiar la influencia de: i) la dosis de fertilizante, ii) el fraccionamiento de la dosis, y iii) el uso de un fertilizante nitrogenado de liberación controlada (ENTEC[®]), en la lixiviación de nitratos. Para ello, en un suelo franco-arcillo-limoso situado en la Finca de Prácticas e Investigación de la ETSIA en Pamplona, y durante las campañas 2002-03 y 2003-04, se estableció un experimento factorial según un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones. La primera campaña se sembró trigo (*Triticum aestivum* L. var. Soissons) y la siguiente, cebada (*Hordeum vulgare* L. var. Puffin). Las necesidades de N de cada cultivo se calcularon como el producto del rendimiento esperado (6 t ha⁻¹) y un coeficiente de extracciones de N (trigo = 30 kg N t⁻¹ y cebada 26 kg N t⁻¹). La dosis fertilizante de referencia se obtuvo descontando de las necesidades del cultivo, la cantidad de nitrógeno mineral (nitrato y amoniacal) presente en el suelo (0-60 cm) previamente al aporte de la primera cobertera. El nitrato lixiviado a 1 m de profundidad se calculó como el producto del drenaje diario por la concentración de nitratos en la solución del suelo a esa profundidad.

Nuestros resultados nos permitieron distinguir tres fases del cultivo: i) Fase I: desde la siembra hasta GS25, caracterizada por un elevado riesgo de drenaje y un lavado de los nitratos del perfil del suelo, ii) Fase II: desde GS25 hasta GS30, caracterizada por pequeños drenajes y lavados, y iii) Fase III: desde GS30 hasta recolección, en donde no existe drenaje ni lavado.

Ni la dosis de N, ni su fraccionamiento, ni ENTEC[®] indujeron diferencias significativas en el N lixiviado, probablemente debido a que la dosis de referencia fue ajustada a la cantidad de nitrógeno mineral disponible en el suelo (N_{min}).

La lixiviación de nitratos en los cereales de invierno de zonas con clima mediterráneo húmedo, estuvo relacionada con el contenido de nitratos del suelo en el momento de la siembra, y con las precipitaciones durante el periodo siembra-encañado.

ABSTRACT. The objectives of this work were to analyze the effect on nitrate leaching of: i) nitrogen fertilizer rate, ii)

fertilizer splitting, and iii) the use of a nitrogen controlled released fertilizer (ENTEC[®]). To achieve our goal we established a factorial experiment in a completely randomised block design with four replications at the Experimental and Investigation Field of ETSIA (Pamplona-Navarra). Winter wheat (*Triticum aestivum* L. var. Soissons) was planted during the first year and winter barley (*Hordeum vulgare* L. var. Puffin) during the second. Nitrogen (N) crop demand was calculated as the product of expected yield (6 t ha⁻¹) and a N coefficient extraction (wheat 30 kg N t⁻¹ and barley 26 kg N t⁻¹). N reference dose was calculated as N crop demand minus soil mineral N (N_{min}) at presidedress (0,6 m depth). Nitrate leaching (1m depth) was calculated as the product of daily drainage and nitrate concentration of soil solution at the same depth.

Our results allowed us to distinguish three crop phases: i) Phase I: from seeding to GS25, with high risk of drainage and nitrate leaching, ii) Phase II: from GS25 to GS30, with low drainage and leaching, and iii) Phase III: from GS30 to harvest, when drainage and nitrate leaching were not relevant.

Nitrate leaching in winter cereals under humid Mediterranean climate was mainly related to soil nitrate at planting, and to rainfall from planting to GS-25. Nitrogen fertilizer rate, N fertilizer splitting, and the use of controlled released fertilizer did not affect nitrate leaching. Application of N fertilizer at GS-25, and adjusting N fertilizer rate to available soil mineral N allowed to minimized nitrate leaching during the cropping season.

1. Introducción

La estrecha relación entre la disponibilidad de N y el rendimiento de los cultivos ha ocasionado en muchas zonas agrícolas problemas de contaminación relacionados con la sobrefertilización (Addiscott et al. 1991). La lixiviación de nitratos hacia zonas no explorables por el sistema radical, disminuye la disponibilidad de N para los cultivos y puede ocasionar contaminación de cuerpos de agua. En los cereales de invierno el riesgo de lavado es mayor en otoño-

invierno y está asociado a un elevado drenaje (Webb et al. 2000). En general, se ha observado que las pérdidas de nitrato por lixiviación aumentan con la dosis aportada (Rasse et al. 1999; Zhu y Fox 2003). Por lo tanto, realizar un buen ajuste de la dosis de fertilizante nitrogenado es una de las claves para mantener rendimientos sostenibles y minimizar el impacto ambiental (Halvorson et al. 2004).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el drenaje y la lixiviación de nitratos en un sistema de cultivo de cereal de invierno en clima Mediterráneo subhúmedo. Los objetivos específicos fueron estudiar la influencia de: i) la dosis de fertilizante, ii) el fraccionamiento de la dosis, y iii) el uso de un fertilizante nitrogenado de liberación controlada (ENTEC[®]), en la lixiviación de nitratos.

2. Material y Métodos

El ensayo se llevó a cabo en la Finca Experimental de la ETS de Ingenieros Agrónomos en Pamplona-Navarra, en la misma parcela, durante las campañas 2002-2003 y 2003-2004. El suelo fue clasificado como Calcixerollic Xerochrept y sus características más importantes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas más relevantes del suelo al comienzo del experimento.

| | Profundidad (cm) | | |
|---|------------------|------------|---------|
| | 0-30 | 30-60 | 60-90 |
| Arena (g kg ⁻¹) | 14 | 13 | 12 |
| Limo (g kg ⁻¹) | 48 | 46 | 46 |
| Arcilla (g kg ⁻¹) | 38 | 41 | 42 |
| Textura USDA | Fr-arc-lim | Fr-arc-lim | Arc-lim |
| pH (1:2,5) | 7,8 | 7,9 | 8 |
| Carbono org (g kg ⁻¹) | 14,5 | 10,5 | 8,1 |
| N total (g kg ⁻¹) | 1,6 | 1,1 | 0,9 |
| Relación C/N | 9,1 | 9,5 | 9 |
| Fósforo ¹ (P) (mg kg ⁻¹) | 19,1 | 7,4 | 3,5 |
| Potasio ² (K) (mg kg ⁻¹) | 350 | 273 | 246 |
| C.E. (1:1) (dS m ⁻¹) | 0,37 | 0,3 | 0,27 |

¹ Método Olsen.

² Método del acetato amónico.

La primera campaña se cultivó trigo de invierno (*Triticum aestivum* L. cv. Soissons) y la segunda, cebada de invierno (*Hordeum vulgare* L. cv Puffin). La siembra se realizó el 28 de octubre el primer año y el 6 de noviembre, el segundo. La densidad de plantas fue de 350-400 pl m⁻².

Durante ambas campañas se realizó un experimento factorial con un diseño de bloques completos al azar y cuatro repeticiones. El área del ensayo fue dividida en 28 parcelas elementales de 5 x 8 m², con unos pasillos de 0,8 m entre bloques, quedando una banda borde de 5 m en torno al ensayo. En cada bloque se ensayaron 7 tratamientos distintos de fertilización nitrogenada (Tabla 2). La dosis de referencia (X) se calculó estimando un rendimiento en grano de 6 t ha⁻¹ y un coeficiente de extracción de 30 kg N t⁻¹ y 26 kg N t⁻¹, para trigo y cebada respectivamente, y descontando la cantidad de Nmin (N-

NO₃⁻ y N-NH₄⁺) presente en el suelo (0-60 cm) en el momento de aportar la primera cobertera. El Nmin (0-60) en precobertera, fue determinado y resultó ser igual para todos los tratamientos el primer año (60 kg N ha⁻¹). El segundo año tampoco se encontraron diferencias significativas, por lo que se utilizó la media de Nmin de todas las parcelas (50 kg N ha⁻¹).

Los fertilizantes utilizados aparecen en la Tabla 2. La fertilización de los tratamientos 2 a 5 se fraccionó en dos coberteras: un tercio de la dosis total en pleno ahijamiento (GS-25) (Zadoks 1974) y dos tercios en inicio de encañado (GS-30). Las fechas fueron el 18-2-2003 y 29-1-2004 para la primera campaña, y el 25-3-2003 y 17-3-2004 para la segunda.

Tabla 2. Dosis y fraccionamiento del fertilizante (kg N ha⁻¹).

| Tratam ¹ | Fertilizante ² | 2002-2003 | | | 2003-2004 | | |
|---------------------|---------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | | Total | Cob 1 | Cob 2 | Total | Cob 1 | Cob 2 |
| 1 Testigo | NSA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 X-2A | NSA | 40 | 13 | 27 | 35 | 12 | 23 |
| 3 X-A | NSA | 80 | 26 | 54 | 70 | 23 | 47 |
| 4 X | NSA | 120 | 40 | 80 | 110 | 37 | 73 |
| 5 X+A | NSA | 160 | 53 | 107 | 140 | 48 | 97 |
| 6 INH | ENTEC [®] | 120 | 120 | 0 | 110 | 110 | 0 |
| 7 UNI | NSA | 120 | 120 | 0 | 110 | 110 | 0 |

¹ X = dosis de referencia (extracciones - Nmin (0-60) en precobertera); A = cantidad arbitraria para establecer los tratamientos

² NSA = nitrosulfato amónico (26% N 32% S); ENTEC[®] = nitrosulfato amónico + DMPP (3'4 dimetil pirazol fosfato)

La recolección se llevó a cabo con una cosechadora especial para microparcels y recogiendo una superficie de 1,6x8 m² en cada parcela elemental (2-7-2003 y 4-7-2004). El rendimiento se obtuvo extrapolando el dato de la cosechadora a una hectárea y refiriendo todos los resultados al 12% de humedad.

En cada campaña se realizaron tres muestreos del perfil del suelo para analizar el contenido de nitrato y amonio del mismo. Para la toma de muestras se emplearon barrenas helicoidales de 4,5 cm de diámetro (Eijkelkamp[®]). Los muestreos realizados fueron:

- Presiembra: realizados el 16-10-2002 y 27-10-2003
- Precobertera 1: realizados el 16-1-2003 y 12-1-2004
- Postcosecha: realizados el 4-7-2003 y 2-7-2004

En cada ocasión se muestrearon tres puntos por parcela elemental hasta una profundidad de 0,9 m, y se dividieron en intervalos de 0-0,3; 0,3-0,6 y 0,6-0,9 m. Las tres muestras de cada parcela se homogeneizaron por horizontes y en una submuestra de suelo fresco (guardado a 4°C durante un máximo de 4 d después del muestreo) se realizó una extracción con KCl 1M (20 g suelo/ 100 ml KCl). En el extracto se determinó la concentración de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ mediante un analizador de flujo (Alpkem, EE.UU.). El N-NO₃⁻ se determinó por colorimetría previa reducción en columna de cadmio por el método de Griess-Ilosvay (Keeney y Nelson 1982). El N-NH₄⁺ se determinó mediante el método de salicilato-hipoclorito (Crooke y Simpson 1971).

El drenaje se calculó diariamente a una profundidad de 1 m aplicando el método del balance de agua (Luc 1998). Para ello se aplicó la ecuación unidimensional del balance de agua simplificada para sistemas agrícolas de secano:

$$P = ETc \pm VR + D \tag{1}$$

siendo P la precipitación (mm), ETc la evapotranspiración del cultivo (mm), VR la variación de la reserva de agua del suelo (mm) y D el drenaje (mm). El drenaje diario puede presentar valores ligeramente negativos, debido, al desfase en el registro de los componentes del balance hídrico. La pendiente del terreno es inferior al 3% por lo que se considera que no se produce escorrentía. De los términos considerados en (1), la lluvia se midió mediante la lectura de un pluviómetro de impulsos HOBO con registro cada 0,2 mm de lluvia instalado a pie de parcela y la temperatura, mediante un registrador electrónico de datos HOBO, programado para realizar lecturas cada 10 minutos. El resto de los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana (5 km).

La determinación de la ETc diaria, se llevó a cabo según la ecuación

$$ETc = Kc \times Et_0 \tag{2}$$

siendo Et₀ la evapotranspiración de referencia calculada por el método FAO Penman-Monteith y Kc el coeficiente sencillo del cultivo (Allen et al. 1998). Los valores diarios de Kc se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores diarios adoptados para el coeficiente del cultivo (Kc) según el periodo fenológico y el cultivo ensayado (Allen et al. 1998).

| Cultivo | Periodo fenológico | Kc |
|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Trigo | Siembra – 30 dds | 0,71 |
| | 30 dds – Hoja bandera | 0,71 + 0,003212 N |
| | Hoja bandera – Floración+3semanas | 1,15 |
| | Floración+3semanas - Recolección | 1,15 – 0,0236 N |
| Cebada | Siembra – 30 dds | 0,63 |
| | 30 dds – Hoja bandera | 0,63 + 0,003768 N |
| | Hoja bandera – Floración+3semanas | 1,15 |
| | Floración+3semanas - Recolección | 1,15 – 0,0333 N |

N = número de días desde el fin del periodo anterior

Para cuantificar la VR del suelo se midió la humedad volumétrica del suelo mediante la técnica FDR (Frequency Domain Reflectometry) (Fares et al. 2000). El equipo utilizado fue un FDR-Enviroscan® (Sentek Pty. Ltd., Australia), que obtiene sus lecturas a partir de sensores instalados a distintas profundidades en el interior de un tubo de PVC, que denominaremos sonda. En cada parcela elemental de los tratamientos Testigo y X, se instaló una sonda FDR-Enviroscan® con sensores de humedad colocados a 0,2-0,5-0,7-1 m de profundidad, a los que se les asignó los horizontes del suelo 0-0,3 m, 0,3-0,6 m, 0,6-0,8 m y 0,8-1 m, respectivamente.

El drenaje a 1 m de profundidad se determinó en cada una de las parcelas del tratamiento Testigo y del tratamiento

X aplicándose la ecuación (1) a la vertical de cada uno de los puntos de medida de humedad. Con los datos obtenidos se construyeron cuatro curvas de drenaje diario acumulado para el tratamiento Testigo (una por repetición) y otras cuatro para X. La curva de drenaje acumulado para cada tratamiento se calculó como la media diaria de las cuatro repeticiones, junto con su correspondiente error estándar. La curva de drenaje para todo el ensayo, independientemente del tratamiento, se obtuvo al hacer la media diaria de las dos anteriores.

El momento de fin de drenaje se consideró cuando el descenso de humedad del suelo correspondió exclusivamente a la ETc. Para ello, se utilizó el concepto de Fracción de Capacidad de Campo (Fcc), que es el contenido de humedad del suelo en un momento dado respecto a su contenido de humedad a capacidad de campo (Williams 1991). En nuestro caso se calculó para cada uno de los momentos de lectura y para cada uno de los sensores del equipo Enviroscan®, mediante la ecuación:

$$Fcc_{i,k} = (\theta_{v i k} \times CC_i^{-1}) \times 100 \tag{3}$$

siendo,

Fcc_{i,k} = fracción de la capacidad de campo para la profundidad i, en un momento de lectura k.

i = profundidad a la que se encuentran los sensores en cada sonda de humedad (0,2; 0,5; 0,7 y 1m).

k = cada uno de los momentos de lectura del equipo Enviroscan®. La frecuencia de toma de datos por el equipo de humedad del suelo en el periodo próximo al fin de drenaje fue cada seis horas en 2002-03 y cada una hora en 2003-04.

θ_{v i k} (mm) = media de la humedad volumétrica registrada por los sensores situados a la profundidad i, en un momento de lectura k.

CC_i (mm) = medida de la θ_v a capacidad de campo de los sensores situados a la profundidad i. Fue determinada basándose en las medidas del equipo Enviroscan®, y se define como la θ_v cuando el suelo se encuentra lleno de agua y bien drenado. Los valores obtenidos para cada sensor fueron:

$$CC_{0,2} = 35 \text{ mm}, CC_{0,5} = 45 \text{ mm}, CC_{0,7} = 47 \text{ mm}, CC_1 = 40 \text{ mm}$$

Para determinar el momento de fin de drenaje, se analizaron los valores de Fcc registrados por los sensores, para cada profundidad. Se comenzó por el más superficial, de tal modo que cuando se produjo un descenso de Fcc en un horizonte superior y al mismo tiempo Fcc ≤ 1 en los horizontes inferiores, (θ_v era igual o menor que capacidad de campo), se tomó como fin de drenaje.

Las pérdidas de nitrato con el agua de percolación se determinaron en los tratamientos Testigo, X, X+A, INH y UNI. Para conocer la concentración de nitrato en la solución del suelo, se instalaron dos cañas de succión a 1 m de profundidad (Lord y Shepherd 1993) en cada una de las parcelas de los tratamientos a estudiar. Se instalaron justo después de la nascencia del cultivo y se mantuvieron sometidas a un vacío de 0,4-0,5 bar durante el periodo de drenaje, pasado el cuál se retiraron.

Las cañas de succión fueron muestreadas cada quince días, o bien cuando se registraba una lluvia superior a 25 mm. En cada muestreo, una alícuota de la solución extraída se llevaba al laboratorio para determinar la concentración de $N-NO_3^-$. El $N-NO_3^-$ se determinó por colorimetría, previa reducción en columna de cadmio por el método de Griess-Ilosvay (Keeney y Nelson 1982), utilizando un analizador de flujo (Alpkem, EE.UU.).

Para cada periodo de muestreo de las cañas, la cantidad de nitrógeno nítrico perdido por lixiviación (N_{lix}) se obtuvo multiplicando el volumen de drenaje de cada tratamiento en dicho periodo, por la concentración de $N-NO_3^-$ del mismo. El N_{lix} acumulado se determinó sumando el N_{lix} obtenido en cada periodo.

3. Resultados y discusión

3.1. Rendimiento

En ambas campañas la dosis X fue superior a la dosis óptima obtenida en los modelos (Fig. 1), lo que indica que en las dosis más altas empleadas, el N no era factor limitante.

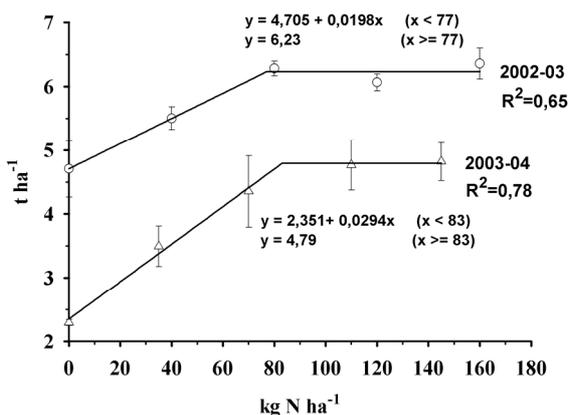


Fig. 1. Rendimiento obtenido en cada campaña. Cada punto corresponde a la media de las 4 repeticiones y las barras de error muestran el error estándar de dicha media.

3.2. Nmin del suelo

En la Fig. 2 se observa cómo las variaciones de Nmin están directamente relacionadas con variaciones de $N-NO_3^-$, salvo en el momento de recolección. De entre los momentos estudiados, los máximos valores de Nmin en suelo corresponden con momentos de acumulación de nitrógeno nítrico y coinciden con la época de presiembra. El $N-NH_4^+$ se mantuvo casi constante para los momentos de muestreo.

Desde el punto de vista de las formas nítrica o amoniacal, el abono con inhibidor de la nitrificación se comportó igual que el abono sin dicha molécula.

3.3. Balance de agua, drenaje y lixiviación de nitratos

La diferencia entre el drenaje medio del tratamiento Testigo y el drenaje medio del tratamiento X, no fue significativa en ninguna fecha durante las dos campañas (no mostrado). Por esta razón, se calculó un drenaje medio para todo el ensayo basado en las medidas de VR de todas las parcelas instrumentalizadas. El balance hídrico resultante para cada año queda representado en la Fig. 3, calculándose un volumen de 286 mm en 2002-03 mientras que en 2003-04 correspondió a 144 mm (Fig. 3 A₁ y B₁).

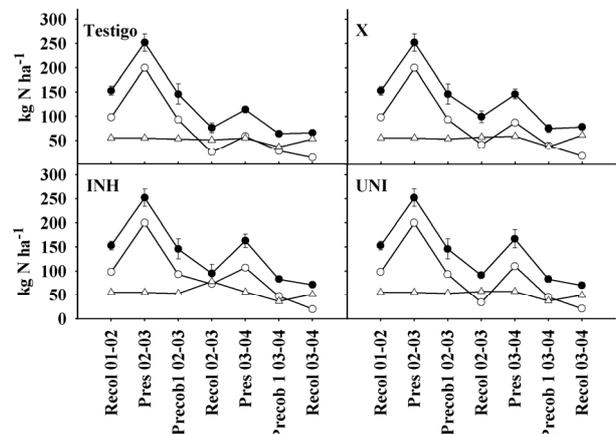


Fig. 2. Evolución de la cantidad de nitrógeno mineral (●), nitrógeno nítrico (○) y nitrógeno amoniacal (△) para una profundidad de 0,9 m, en los tratamientos Testigo, X, INH y UNI. Las barras indican el error estándar, pero se han incluido únicamente en el caso de Nmin.

La fecha de fin de drenaje fue el 1 de abril para 2002-03 y el 22 de abril en 2003-04 (Fig. 3 A₃ y B₃). Previamente a estas fechas, la demanda de ETC se suplió con la humedad presente en los 0,3-0,4 m superficiales de suelo mostrándose un descenso en el sensor situado a 0,2 m. A partir de las fechas de final de drenaje transcurrió un periodo de 4 días en 2002-03 y 22 días en 2003-04, en el que la humedad del suelo siguió descendiendo como consecuencia de un consumo hídrico del cultivo en los 0,3-0,4 m superiores y con los horizontes inferiores, próximos a capacidad de campo. Posteriormente al 5 de abril en la primera campaña y al 14 de mayo en la segunda, el cultivo comenzó a extraer agua situada a 0,5 m y quince días más tarde, la extracción comenzaba a un metro de profundidad (Fig. 3 A₃ y B₃).

Durante el periodo de drenaje de la campaña 2002-03, la precipitación acumulada fue de 492 mm, mientras que durante 2003-04, fue de 347 mm (Fig. 3A₄ y B₄). La ETC fue muy semejante en ambos años, tanto desde el punto de vista de su distribución, como de los valores máximos (537 mm en 2002-03 y 494 mm en 2003-04). Del mismo modo, en la Fig. 3 A₂ y B₂, también se puede ver cómo el contenido de agua del suelo (R) fue semejante para el Tratamiento Testigo y la dosis X. Ello confirma la decisión de utilizar una única curva de drenaje para todo el ensayo.

En 2002-03, la humedad del suelo (R) en el momento de la siembra fue de 23% (Fig. 3 A₂). Las precipitaciones registradas durante noviembre e inicio de diciembre (175 mm), no ocasionaron drenajes ya que se acumularon en el perfil del suelo, aumentando su contenido en humedad (R).

A partir del 5 de diciembre las lluvias caídas se tradujeron en un incremento del drenaje debido a que el suelo se encontraba saturado y a los valores bajos de ET_c (*Fase I*). Un hecho muy relevante se puede observar en la Fig. 3A, analizando el periodo transcrito desde el 24 de enero hasta el 7 de febrero de 2003.

En él se registraron un total de 145 mm como precipitaciones, de los cuáles 40 mm fueron determinados

como incremento de R , y el resto (100 mm) se contabilizaron como drenaje. A partir de GS25 (*Fase II*), la ET_c se incrementó notablemente y las precipitaciones originaron drenajes inferiores al periodo anterior (Fig. 3A₁, 21 de febrero de 2003 a 7 de marzo de 2003). A partir del 1 de abril de 2003 (*Fase III*) no existió drenaje, debido una elevada ET_c y un descenso de R .

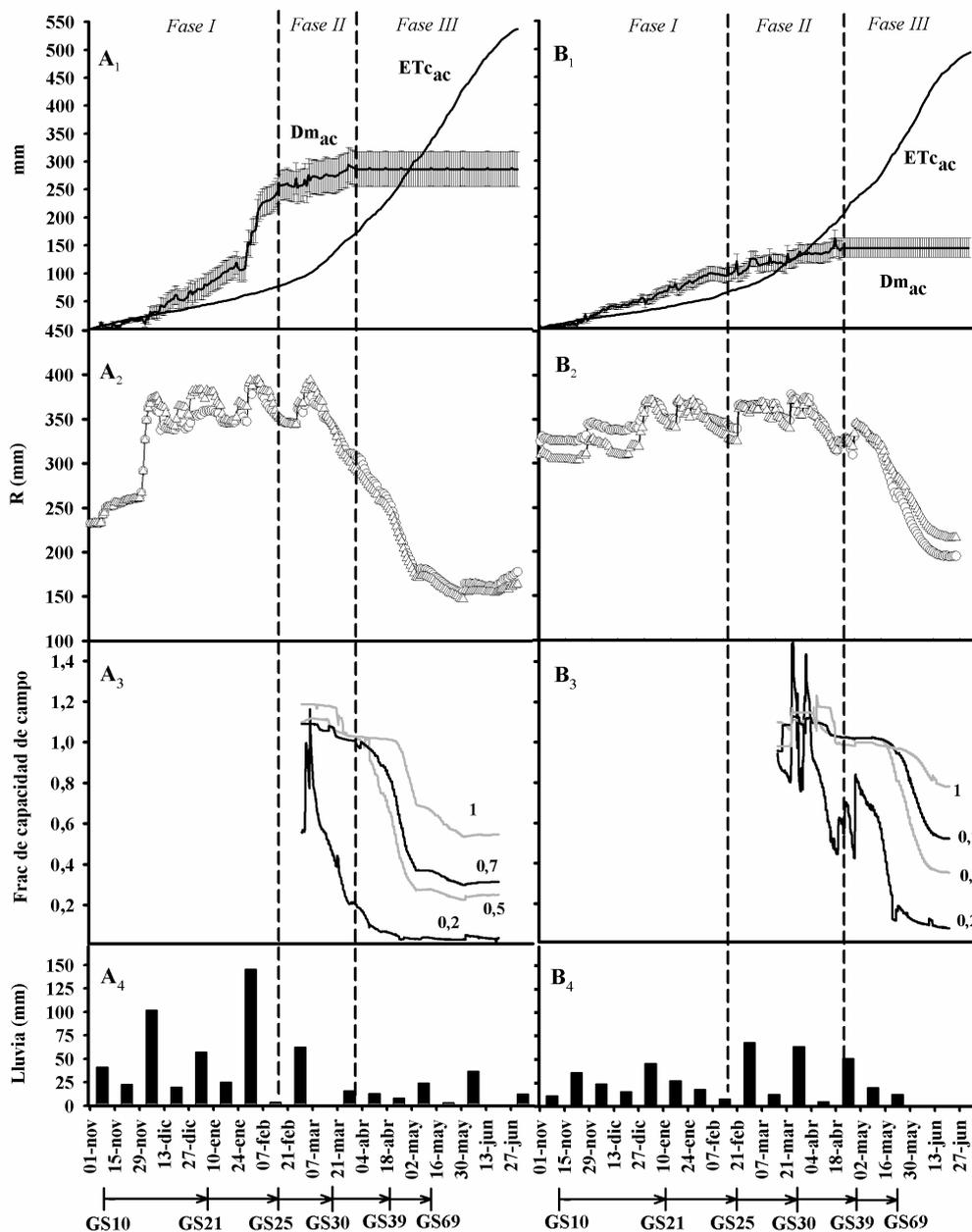


Fig. 3. Evolución de los principales componentes del balance hídrico durante las campañas 2002-03 (A) y 2003-04 (B).

A₁-B₁ = Evapotranspiración acumulada del cultivo ($ET_{c_{ac}}$) y Drenaje medio acumulado (Dm_{ac}).

A₂-B₂ = Evolución del contenido de agua en el suelo para una profundidad de un metro (R), en función del tratamiento (Testigo Δ y Fertilizado \circ).

A₃-B₃ = Evolución de la Fracción de Capacidad de Campo (Fcc) a partir del mes de marzo para cada profundidad estudiada (0,2-0,5-0,7-1 m).

A₄-B₄ = Precipitación quincenal (Precip).

En 2003-04 (Fig. 3 B₂), inicialmente el suelo se encontraba con una R superior a la campaña anterior. Sin

embargo, las precipitaciones que se dieron en el inicio de 2003-04 fueron sensiblemente inferiores a las de 2002-03 y por tanto los drenajes estimados para la *Fase I* también

fueron inferiores. A partir de GS25 (*Fase II*) se incrementó la ETc, y a pesar de que se registraron precipitaciones importantes y el suelo estaba saturado, no se detectó un incremento notable del drenaje. A partir del día 22 de abril de 2004 (*Fase III*) no se consideró drenaje, debido a una elevada ETc y un descenso de R.

En la campaña 2002-03, todos los momentos de muestreo registraron concentraciones de nitrato en los drenajes, superiores a la campaña siguiente (Fig. 4). Las diferencias entre los tratamientos no fueron significativas ($p > 0,05$), independientemente del momento analizado.

En 2003-04, se detecta una tendencia (no significativa) al aumento de la concentración de nitratos en el drenaje para las dosis superiores, incluso antes de la aplicación de las coberteras (Fig. 4), manifestando un efecto residual de la campaña precedente.

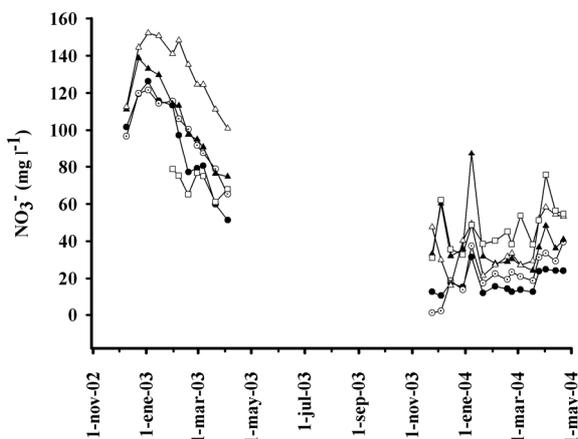


Fig. 4. Evolución de la concentración de NO_3^- en la solución de drenaje, en los tratamientos (● Testigo, ⊙ X, ▲ X+A, △ INH, □ UNI). Cada punto corresponde a la media de las cuatro repeticiones para cada tratamiento, en un momento de muestreo.

Respecto a la lixiviación de N-NO_3^- (kg ha^{-1}), la campaña tuvo un efecto muy marcado (Fig. 5). En el primer año, se calcularon unas pérdidas por lixiviación próximas a $73\text{-}76 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$, mientras que en el segundo oscilaron entre $6\text{-}16 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.

Fue posible distinguir tres fases del ciclo de los cereales de invierno, con un comportamiento diferente:

- Fase I (desde la siembra hasta GS25): En términos absolutos, el factor año tiene un efecto considerable en la cantidad de nitrato que se lixivia en esta fase, cumpliéndose de manera general que este periodo es el de mayor riesgo (Armstrong y Burt 1993; Webb et al. 2000), sobre todo si partimos de cantidades elevadas de nitrógeno nítrico al inicio del cultivo (Mitchell et al. 2001). Ha llegado a representar hasta un 36% del nitrógeno nítrico presente en el suelo, en la siembra.

- Fase II (desde GS25 hasta fin de drenaje): En esta fase: i) se reduce el volumen de drenaje (Fig. 3) y ii) se reduce el N_{lix} a pesar de que se trata del periodo en el que se aportaron las dos coberteras (Fig. 5). A partir de este momento, mejora mucho la eficiencia de utilización del N por el cultivo (Thomsen 2005).

- Fase III (desde fin de drenaje hasta recolección): baja pluviometría, elevada ETc y como consecuencia de ello, ausencia de drenaje y de lixiviación (Fig(s). 3 y 5).

4. Conclusiones

Ni el fraccionamiento, ni el uso de un fertilizante de liberación controlada, redujeron la lixiviación de nitratos frente a la aportación única o a un fertilizante convencional. Se observó una tendencia a aumentar el nitrato lavado según se incrementó la fertilización. El método utilizado para el ajuste de la dosis de fertilizante fue capaz de garantizar rendimientos máximos sin aplicar dosis excesivas.

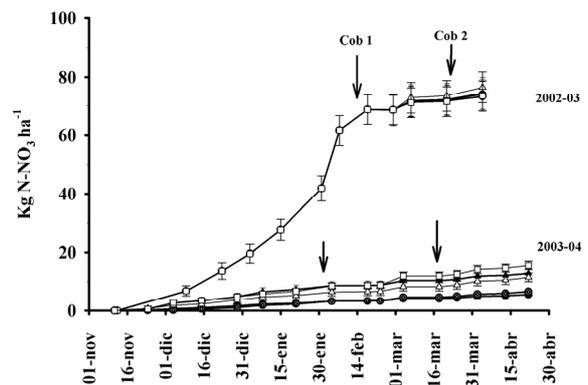


Fig. 5. Lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado (● Testigo, ⊙ X, ▲ X+A, △ INH, □ UNI). Las flechas indican los momentos de aplicación de cada una de las coberteras.

Referencias

Addiscott, TM, Whitmore, AP y Powlson, DS 1991. *Farming, fertilizers and the nitrate problem*. CAB International. Wallingford, UK.

Allen, RG, Pereira, LS, Raes, D y Smith, M. 1998. *FAO 56 Irrigation and drainage paper: crop evapotranspiration*. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.

Armstrong, AC y Burt, TP 1993. Nitrate losses from agricultural land. En Burt, T. P., et al. *Nitrate, processes, pattern and management*: 239-267. John Wiley & Sons. Chichester.

Crooke, W.M. y W.E. Simpson. 1971. Determination of ammonium on Kjeldahl digests of crops by an automated procedure. *J. Sci. Food. Agric.* 22: 9-10.

Fares, A, y Alva, AK. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science* 19: 57-64.

Halvorson, AD, Nielsen, DC, Reule, CA. 2004. Nitrogen fertilization and rotation effects on no-till dryland wheat production. *Agronomy Journal* 96: 1196-1201.

Keeney, DR y Nelson, DW 1982. Nitrogen - inorganic forms. En Page, A L. *Methods of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties*: 643-698. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.

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 pédo-climatique, approche pratique. En J. R. Tiercelin (ed.), *Traité d'irrigation*, : 191-206. Lavoisier, Paris.

Mitchell, R, Webb, J y Harrison, R 2001. Crop residues can affect N leaching over at least two winters. *European Journal of Agronomy*. 15: 17-29.

- Rasse, DP, Ritchie, JT, Peterson, WR, Loudon, TL y Martin, EC 1999. Nitrogen management impacts on yield and nitrate leaching in inbred maize systems. *Journal of Environmental Quality*. 28: 1365-1371.
- Thomsen, IK. 2000. Crop nitrogen utilization and leaching losses as affected by time and method of application of farmyard manure. *European Journal of Agronomy* 22: 1-9.
- Webb, J, Harrison, R y Ellis, S.2000. Nitrogen fluxes in three arable soil in the UK. *European Journal of Agronomy* 13: 207-223.
- Williams JR 1991. Runoff and water erosion. En Hanks R J and Ritchie J T (Eds.) *Modeling plant and soil systems*.: 439-455. Agronomy monograph no.31. ASA, Madison, WI, EE.UU.
- Zadoks, JC, Chang, TT y Konzak, CF 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*. 14: 415-421.
- Zhu, Y y Fox, RH 2003. Corn-Soybean rotation effects on nitrate leaching. *Agronomy Journal*. 95:1028-1033.