G. Pardo, J. Aibar, F. Villa, C. Zaragoza

EFECTO DE DISTINTOS TIPOS DE FERTILIZANTES SOBRE LA EVOLUCIÓN DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y EN LA PRODUCCIÓN DE CEREALES EN SECANO

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **101** N.º 2 (145-166), 2005

Efecto de distintos tipos de fertilizantes sobre la evolución de nutrientes en el suelo y en la producción de cereales en secano

G. Pardo*, J. Aibar**, F. Villa***, C. Zaragoza*

* CITA Depto. de Ciencia, Tecnología y Universidades. Gobierno de Aragón
** EPS Huesca. Univ. de Zaragoza
*** CTA Depto. de Agricultura. Gobierno de Aragón

Resumen
Se ha comparado el efecto de un abonado orgánico frente a otro químico y un testigo sin abonar sobre el mantenimiento de la materia orgánica, del fósforo y del potasio en el suelo a largo plazo, la evolución y pérdida de nitratos durante distintos periodos, el contenido total de nitrógeno en el cereal y la producción de grano en trigo duro (*Triticum durum* Desf.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) en una rotación con veza (*Vicia sativa* L.) y barbecho en secano semiárido. Los altos niveles de materia orgánica y fósforo iniciales se han mantenido después de 6 años de ensayos, incluso en las parcelas sin fertilizar, mientras que el potasio descendió ligeramente. Esto indica que la rotación llevada a cabo, junto con el enterrado de los restos de cosecha, ha sido suficiente para mantener los contenidos iniciales de nutrientes. Durante el periodo de cultivo la fertilización química incrementó significativamente el contenido de nitratos en los 30 primeros cm de suelo, respecto al fertilizante orgánico o la no fertilización. Sin embargo, las pérdidas de nitrógeno durante el periodo ensayado fueron similares en los tres niveles de fertilización, así como las extracciones de nitrógeno por parte de la biomasa total producida. Por último, la cosecha tampoco se incrementó al aplicar fertilizante químico u orgánico, ya que en las parcelas sin abonar se obtuvo una cosecha similar.

Palabras clave: compost, nitrato, semiárido.

Summary
Effect of different types of fertilizer on soil nutrient evolution and cereal yield in rainfed
An organic fertilizer was applied to durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) crops in a rotation with vetch (*Vicia sativa* L.) and fallow in a semiarid dryland. The organic, chemical and no fertilizer effects on the long-term evolution of O.M., P and K, nitrate loss and crop nitrogen total content were compared during different periods. The high level of O.M. and P were maintained after 6 years of experiments even in the unfertilized plots while K slightly decreased. Thus, the rotation and straw and stubble burying were enough to maintain the initial nutrient contents. During the crop period, chemical fertilization significantly increased the nitrate content in the first 30 cm of soil, compared with organic fertilizer or no fertilization. However, the estimated nitrogen losses during the test period were similar in the three levels of fertilization, as well as the nitrogen extraction for the total biomass produced. Finally the crop yield was not increased after applying chemical or organic fertilizer, since the unfertilized plots production was similar.

Key words: compost, nitrate, semiarid.

Introducción

La aparición de los fertilizantes químicos produjo, junto a otras innovaciones tecnológicas, una auténtica revolución en la agricultura con incrementos notables en rendimiento de los cultivos. Sin embargo, un aporte excesivo y reiterativo de los mismos macronutrientes en forma mineral ha producido, en ocasiones, no pocos fracasos agronómicos por desequilibrios nutricionales y aparición de algunas carencias de elementos esenciales. Otras veces la aplicación inoportuna de nutrientes favorece la aparición de diversas fisiopatías en los cultivos (Labrador, 2001). Además su aplicación en determinadas zonas como son secanos semiáridos puede no ser efectiva (o incluso contraproducente) ya que los incrementos de producción, si se producen, son a menudo escasos e irregulares y dependientes de unas lluvias al final de la primavera que no se suelen producir. Así, por ejemplo, Van Herwaarden *et al.* (1998) en zonas semiáridas de Australia encontraron que el rendimiento de trigo disminuía al aumentar la dosis de nitrógeno aplicada.

Por otra parte, estos fertilizantes no son inocuos, y como compuestos salinos que son, pueden contaminar el suelo y los acuíferos en el caso de no ser absorbidos por las plantas, a la vez que contribuyen a disgregar las partículas del suelo favoreciendo la erosión (Ordóñez *et al.*, 1997).

En este sentido, la sustitución de estos abonos químicos por otros orgánicos (estiércoles o compost) contribuiría a reducir algunos de los inconvenientes mencionados. De estos productos orgánicos, el compost es considerado como el producto de mayor interés que restituye la materia orgánica en los suelos, ya que contiene los distintos nutrientes en formas más estables que los estiércoles. Lógicamente, la aplicación de compost conllevará, en mayor o menor medida, todos aquellos efectos beneficiosos que desde distintos puntos de vista se atribuyen a la materia orgánica (Labrador, 2001):

• Físico: mejora la estructura, y favorece la formación de agregados del suelo por lo que se reduce la erosión. Además aumenta la capacidad de retención de agua y la permeabilidad hídrica y gaseosa.

• Químico: produce un suministro equilibrado de nutrientes y tiene un efecto regulador sobre el pH y la salinidad.

• Biológico: incrementa la cantidad y diversidad de microorganismos, puesto que proporciona carbono para la formación de estructuras orgánicas y fuente de energía, nitrógeno para la síntesis de las proteínas y otros elementos esenciales para los seres vivos.

Como efecto desfavorable cabe esperar dificultad en sincronizar las necesidades de los cultivos con el pase a formas minerales de estos nutrientes a partir de las formas orgánicas, con lo que en unos casos podría producirse carencias (y quizás pérdidas de rendimiento) y en otros lixiviados si no son absorbidos por el cultivo (Ryser y Pittet, 2000). Otro inconveniente de estos tipos de fertilizantes radica en la mayor dificultad a la hora del aprovisionamiento y distribución en campo.

En este trabajo se ha comparado la influencia de un abonado orgánico frente a otro químico y un testigo sin abonar sobre la evolución de nitratos del suelo, pérdidas de éstos, contenido total de nitrógeno en planta y su efecto en la producción de cereales de invierno.

Material y métodos

Localización del ensayo

El ensayo de campo se inició en la campaña 1996-1997 en una parcela de la localidad de

Sádaba (Zaragoza), comarca de las Cinco Villas (Aragón, España), cuyas coordenadas son: 42º 17' de latitud Norte, 2º 25' de longitud Este y 454 metros de altura sobre el nivel del mar (MAPA, 1987).

La parcela había sido manejada con anterioridad de manera convencional, con abonado y desherbado químico para cultivo de cereal como habitualmente se realiza en la zona. Se eligió un área mayor de 1 ha que se subdividió en dos parcelas en las que se empezó a desarrollar la rotación barbecho-cebada-veza-trigo duro en 1996, tabla 1:

El presente trabajo incluye los datos de los cuatro últimos años (fondo oscuro de la tabla 1) trascurridos ya dos años de ensayo necesarios para reconvertir un suelo manejado anteriormente de manera convencional, a un manejo sin agroquímicos en algunos tratamientos

Tabla 1. Alternativa de cultivos desarrollada en el ensayo
Table 1. Crop rotation developed at the trial

	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002
Parcela 1	Cebada→	Veza→	Trigo duro→	Barbecho→	Cebada→	Veza
Parcela 2	Barbecho→	Cebada→	Veza→	Trigo duro→	Barbecho→	Cebada

Clima

La zona de estudio esta considerada como de clima semiárido, donde la precipitación anual media en el periodo 1968-1998 fue 516 mm y la temperatura media de 14 ºC (tabla 2). La precipitación y temperatura en el periodo de ensayo se muestra en la figura 1.

El año agrícola 98-99, fue similar al año medio. Sin embargo en 99-2000, noviembre y enero fueron mucho más fríos de lo normal, siendo febrero y, sobre todo mayo, más cálidos de lo habitual. La campaña 2000-2001 se caracterizó por un invierno muy suave, prácticamente sin heladas, mientras que en la última campaña 2001-2002, las temperaturas en noviembre y, sobre todo, en diciembre, fueron mucho más bajas de lo habitual.

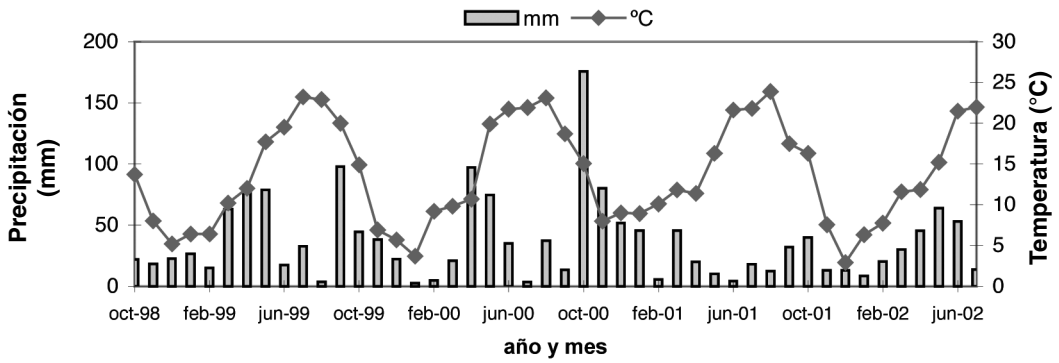


Figura 1. Precipitación (mm) y temperatura (ºC) registrada en el ensayo 1998-2002.
Figure 1. Rainfall (mm) and temperature (ºC) registered at trial's location (1998-2002).

Tabla 2. Datos climáticos históricos en el ensayo (1968-1998)
Table 2. Historic climatic data at trial's location (1968-1998)

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Pluviometría media (mm)	46	43	46	5	61	51	24	27	54	50	60	49	516
ET. potencial media (mm)	10	15	35	55	94	134	167	150	106	60	25	12	865
Temperatura media (ºC)	5,2	6,8	10	12,6	16,4	20,5	23,4	22,9	20	14,7	9,3	6	14

Caracterización edáfica

La tabla 3 muestra el análisis de suelo para las dos parcelas que se llevó a cabo en el Laboratorio Agroambiental de Zaragoza (Gobierno de Aragón), y que fundamenta la descripción del estado inicial del suelo que se comenta a continuación.

Las dos parcelas presentaron valores similares en la mayoría de los aspectos cuantificados. El suelo tiene en los primeros 60 cm una textura franco-arcillosa de tipo fino (suelo pesado), que le confiere una alta capacidad de retención de humedad y de nutrientes, aunque también puede presentar como factores negativos una baja permeabilidad (fácil encharcamiento), una alta compacidad (dificultad de penetración de las raíces) y la dificultad del laboreo, si bien estos aspectos negativos quedan compensados por la elevada presencia de elementos gruesos.

Tabla 3. Análisis de suelo inicial en 1997
Table 3. Initial soil analysis (1997)

	Parcela 1			Parcela 2		
Profundidad (cm)	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Retención de humedad						
A 1/3 de atm. %	21,41	24,14	22,69	24,21	25,39	23,34
A 15 atm. %	12,10	11,74	9,12	10,96	10,61	8,31
Granulometría						
Elementos gruesos (>2mm) % sobre total	14,78	17,07	20,91	11,01	13,17	17,24
Arena total (0,05-2mm) %	39,95	42,21	46,65	39,42	42,34	49,21
Limo grueso (0,02-0,05mm) %	8,03	10,58	8,71	8,47	9,37	7,98
Limo fino (0,002-0,2mm) %	18,06	20,67	22,41	18,90	20,68	22,87
Arcilla (<0,002mm) %	33,83	26,55	22,23	33,03	27,12	19,95
Fertilidad						
pH al agua 1:2,5	8,08	8,17	8,16	7,82	7,98	7,98
Salinidad (C.E. 1:5) dS/m a 25 ºC	0,29	0,24	0,27	0,29	0,24	0,26
Materia orgánica %	2,62	1,76	0,94	2,72	1,84	0,94
Fósforo Olsen, ppm.	21,93	9,65	5,61	21,88	10,27	5,71
Potasio (extracto acetato amónico) ppm	325,50	174,50	101,00	328,50	174,0	87,00
Carbonatos totales %	31,33	45,36	56,38	30,96	46,75	52,58
Catión de cambio						
Magnesio %	0,76	0,49	0,51	0,77	0,56	0,39

Con respecto a la zona más profunda, el suelo goza de una textura más bien franca, lo cual constituye la combinación óptima de arena, limo y arcilla, con una buena capacidad de retención de humedad, de nutrientes y poco propensa a la compactación. Esta textura implica capacidades de intercambio catiónico medias en función del contenido de arcilla y de materia orgánica (si bien va disminuyendo con la profundidad).

Con los datos de contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez, así como con el porcentaje de pedregosidad se calculó la reserva máxima útil para cada parcela de cultivo, hasta los 90 cm considerados, resultando ser de 135 mm para la parcela 1 y 170 mm para la parcela 2.

Tanto los valores de fósforo como los de potasio son muy altos en superficie, situándose muy por encima de los valores medios habituales. El magnesio se encuentra en un valor medio. Los tres nutrientes disminuyen su valor en profundidad, sobre todo el fósforo, que llega a ser bajo entre 60 y 90 cm, el magnesio es bajo a partir de los 30 (Urbano, 1995).

Diseño experimental

Cada uno de los 4 años, la parcela en que se sembró cereal se dividió en parcelas elementales de 91 m^2 según un diseño "split-plot" o parcela dividida con cuatro repeticiones. Se estudiaron dos factores (fertilización y escarda), y tres niveles para cada factor, haciendo coincidir el mismo tipo de fertilización y escarda en el mismo espacio físico desde el inicio del experimento (año 1996), con el fin de estudiar el efecto continuado de ambos tratamientos en el tiempo (figura 2).

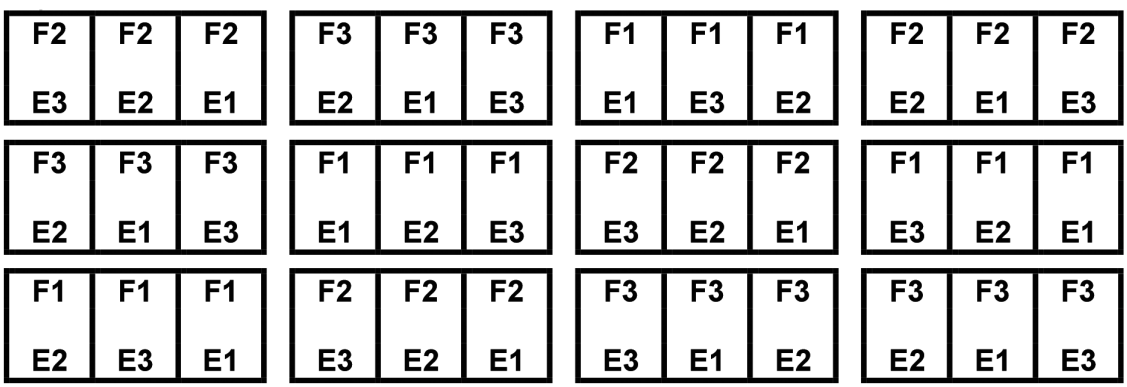


Figura 2. Croquis del ensayo.
Figure 2. Illustration of the experimental design.

Los distintos tipos (niveles) de fertilización aplicados en cada factor se describen brevemente a continuación:

a) *Factor principal (fertilización):*

F1: Testigo sin fertilización.

F2: Fertilización con abono orgánico: 2500 kg/ha de compost aplicado en sementera. Este compost fue proporcionado por el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) de Soria, con características adecuadas para la

agricultura ecológica. Los análisis determinaron que se aplicaron al suelo, como media de los 4 años, unas 67 U.F./ha de nitrógeno. Se incorporó al suelo con la labor de siembra.

F3: Fertilización con abono químico (100-60-60 U.F./ha de N, P, K, en 1998-1999 y 1999-2000 y 70-60-60 U.F./ha en 2000-2001 y 2001-2002) el N fraccionado en fondo (38 U.F/ha incorporadas al suelo con la labor de siembra) y resto en cobertera (tabla 4).

b) *Factor secundario (escarda):*

E1: Testigo sin escarda, E2: Escarda mecánica, E3: Escarda química.

Los datos relativos al tipo de escarda no se muestran en este trabajo.

Material vegetal

El material vegetal utilizado fue trigo duro, *Triticum durum*, variedad 'Antón', en 1998-1999 y 1999-2000. En 2000-2001 la cebada (*Hordeum vulgare*) utilizada fue de la variedad 'Graphic',. En 2001-2002, se utilizó la variedad de cebada 'Hispanic'. La veza (*Vicia sativa*) utilizada ambos años fue de la variedad 'Senda'.

Muestras recogidas

Los datos de suelo, biomasa y cosecha se tomaron en cada una de las 36 parcelas elementales de la siguiente manera:

Suelo

Los muestreos de suelo en todo el perfil (90 cm) para la determinación de $N\text{-}NO_3^-$ se realizaron antes de la siembra, antes del abonado de fondo, y tras la cosecha. Durante el periodo de cultivo y después del abonado químico en las parcelas correspondientes se efectuaron dos análisis adicionales, únicamente hasta 30 cm de profundidad.

Finalmente en marzo de 2003 se realizó un último muestreo para estudiar como han variado distintos macronutrientes (P,K) y la materia orgánica tras estos 7 años de ensayo en la capa más superficial de suelo (0-30 cm) para compararlos con los iniciales (tabla 3).

Biomasa

En este tipo de muestreos se recogieron tanto las plantas de cultivo como las de malas hierbas (parte aérea) existentes en el momento de la cosecha. A partir de estos muestreos se determinaron las extracciones de nitrógeno según el tipo de fertilización.

Cosecha

La cosecha se realizó mediante microcosechadora de cereal, diseñadas especialmente para ensayos, marca "Wintersteiger", modelo "Nurserymaster", con un ancho de corte de 1,55 m. El resultado de la superficie cosechada se extrapoló a kg/ha con 14% de humedad.

En la tabla 4 se muestra un calendario de las labores más relevantes efectuadas en cada campaña con fechas aproximadas en parcelas de cereal.

Análisis de nitrógeno

Los nitratos se extrajeron del suelo con una solución saturada de $SO_4Ca.\ 2H_2O$. Una vez extraídos los nitratos se separaron por centrifugación, se eliminó la interferencia de carbonatos presentes en la muestra por adición de ácido (HCl 1N) hasta un pH inferior a 5 y se leyeron por medio de un espectrofotómetro de U.V. La lectura de los nitratos se realizó a 220 nm pero, para minimizar el efecto de la posible presencia de materia

Tabla 4. Fecha de las labores llevadas a cabo en el ensayo en parcelas de cereal
Table 4. Date of the different tasks conducted on the cereal plots

	1998-1999 Parcela 1	1999-2000 Parcela 2	2000-2001 Parcela 1	2001-2002 Parcela 2
Labores preparatorias de siembra cereal	18/10/98	9/11/99	4/2/01	4/11/01
Marcado y estaquillado definitivo del ensayo	20/10/98	10/11/99	5/2/01	31/10/01
1ª toma de muestras de suelo (0-90)	26/10/98	13/9/99	3/11/00	5/11/01
Abonado de fondo (químico y orgánico, según corresponda)	16/11/98	10/11/99	5/2/01	5/11/01
Siembra cereal	23/11/98	11/11/99	5/2/01	5/11/01
Abonado de cobertera	16/3/99	22/3/00	3/4/01	27/3/02
2ª toma de muestras de suelo (0-30)	19/4/99	15/5/00	17/501	30/4/02
3ª toma de muestras de suelo (0-30)	14/5/99	30/5/00	4/6/01	23/5/02
3º control de biomasa	2/7/99	28/600	19/6/01	2/7/02
Cosecha	5/7/99	5/7/00	20/6/01	3/7/02
4ª toma muestras de suelo (0-90)	2/9/99	12/7/00	4/7/01	17/7/02

orgánica en la muestra, se lee ésta a una longitud de 275 nm y el doble de este valor se resta a la lectura obtenida a 220 nm. La determinación de nitratos (mg/l) se realizó con una recta de calibrado y mediante los oportunos cálculos se determinó el nitrógeno de nitratos ($N\text{-}NO_3^-$) presente en cada capa de suelo (MAPA, 1994).

En cuanto a los análisis de nitrógeno en planta el método de análisis utilizado fue el Dumas (Helrich, 1990) con un equipo LECO FP 528. El resultado final se muestra como porcentaje en peso de nitrógeno.

Balance parcial del nitrógeno

Con los datos del $N\text{-}NO_3^-$ del suelo antes de la siembra y tras la cosecha, el N aportado como fertilizante y las extracciones en N de la plantas en su totalidad (paja, grano y malas hierbas) se calculó el balance parcial de pérdidas de nitrógeno para cada tipo de fertilización y periodo de cultivo. Es parcial porque no se pudo conocer el nitrógeno mineralizado a partir de la materia orgánica, considerándose similar para los tres niveles de fertilización. Las pérdidas de nitrógeno se han calculado por medio de un balance en el que se tuvieron en cuenta los contenidos de nitrógeno al principio (N_{ini}) y al final (N_{final}), las extracciones realizadas por la planta (N_{planta}) y el nitrógeno aplicado como fertilizante (N_{fert}).

$$P = N_{ini} - N_{final} - N_{planta} + N_{fert}$$

Para los cálculos de las extracciones vegetales, la biomasa de las raíces se estimó en un 20% del total de la biomasa aérea y el porcentaje de nitrógeno la mitad del de la parte aérea (Mitchell y Teel, 1997). No se consideró el N amoniacal pues representa una pequeña fracción del N mineral en estas condiciones.

Estas pérdidas de nitrógeno pueden ser de diversos tipos, aunque lo más frecuente es que sean por lixiviación cuando hay agua de percolación y en menor medida por desnitrificación en suelos saturados. Ambas condiciones no son frecuentes en secanos semiáridos pero pueden darse y resulta muy complicado medirlo (Lezáun *et al.,* 2001).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se efectuó de acuerdo al diseño establecido en campo mediante el paquete estadístico SYSTAT 7.0. Cuando los datos no se distribuyeron normalmente se realizaron las trasformaciones oportunas, que fueron normalmente, $\sqrt{y+0,5}$, $1/\sqrt{y}$ ó Ln (y+1) y que resultaron eficaces para conseguir esa normalidad.

Por último cuando se detectó un efecto significativo del factor de estudio se procedió a la separación de medias mediante el test LSD o mínima diferencia significativa.

Resultados y discusión

Evolución del contenido de N-NO_3^- en los 30 primeros cm de suelo

En octubre del 98 (figura nº 3), pese haber transcurrido ya dos años del inicio del ensayo, había una gran cantidad de nitrógeno nítrico en ambas parcelas. Las razones que explicarían este alto contenido de nitratos serían el elevado contenido de materia orgánica del suelo (se había realizado un gran aporte de estiércol en 1995) y que el cultivo precedente fue veza para enterrar, ya que ésta puede aportar de 100 a 120 kg/ha de N al suelo aun en condiciones de secano (Fernández-Pascual *et al.*, 2002). En nuestro caso el nitrógeno incorporado con la veza fue menor, de 52 kg/ha en 1998 (parcela 1) y de 49 kg/ha en 1999 (parcela 2), no apreciándose el efecto residual de los abonados aplicados en campañas anteriores. En los tres años siguientes las cantidades de N, aún siendo altas, fueron de menor cuantía.

El contenido de nitratos en las parcelas testigo y fertilizadas con compost siguió una evolución muy similar en todos los casos. Para ambos tratamientos, se observó un descenso del contenido de nitrógeno del suelo conforme avanzaba el ciclo del cultivo, consecuencia lógica de la extracción vegetal y del lavado de la lluvia, que aun siendo escasa, si fue suficiente para superar ese espesor de suelo pedregoso (30 cm). El descenso fue menos evidente en el ultimo año, ya que las precipitaciones fueron muy escasas en toda la campaña, y las extracciones del cultivo, como veremos, también fueron menores. Estos hechos sugieren que el compost no tuvo efecto sobre el contenido de nitratos del suelo. Parece evidente que el contenido de nitrógeno del compost, aplicado en las respectivas campañas (67, 70, 72,5 y 58,2 kg nitrógeno total/ha), no se transformó a nitrato, al menos de manera apreciable en ningún año ni etapa de cultivo. Wadman y Neeteson (1992) cifran la eficiencia del nitrógeno de fertilizantes orgánicos de 30-60%, pero en nuestro caso parece que ni siquiera se han alcanzado estas cifras. Tampoco a más largo plazo, es decir, en las últimas campañas, parece incrementarse el contenido de N-nítrico con este tipo de fertilización.

Por el contrario, el nitrógeno aportado mediante el abonado químico si tuvo influencia significativa en el contenido total de nitratos del suelo, para esa profundidad, en algunas fechas. En todos los años los dos análisis posteriores al abonado de cobertera detectaron una significativa mayor cantidad de nitratos, en las parcelas abonadas químicamente respecto a los otros dos tratamientos, como consecuencia lógica del abonado nitrogenado de fondo y cobertera (100, 100, 70 y 70 kgNmineral/ha) aplicado en estas parcelas. Además, en el caso de la parcela 2 esta aplicación sirvió para incrementar el contenido inicial, a pesar de las extracciones del cultivo y las pérdidas. Sin embargo en la parcela 1, se creé que estas perdidas fueron mayores, ya que por un lado, se trata de un suelo con menor capacidad de retención de agua, y por otro, las lluvias entre ambos

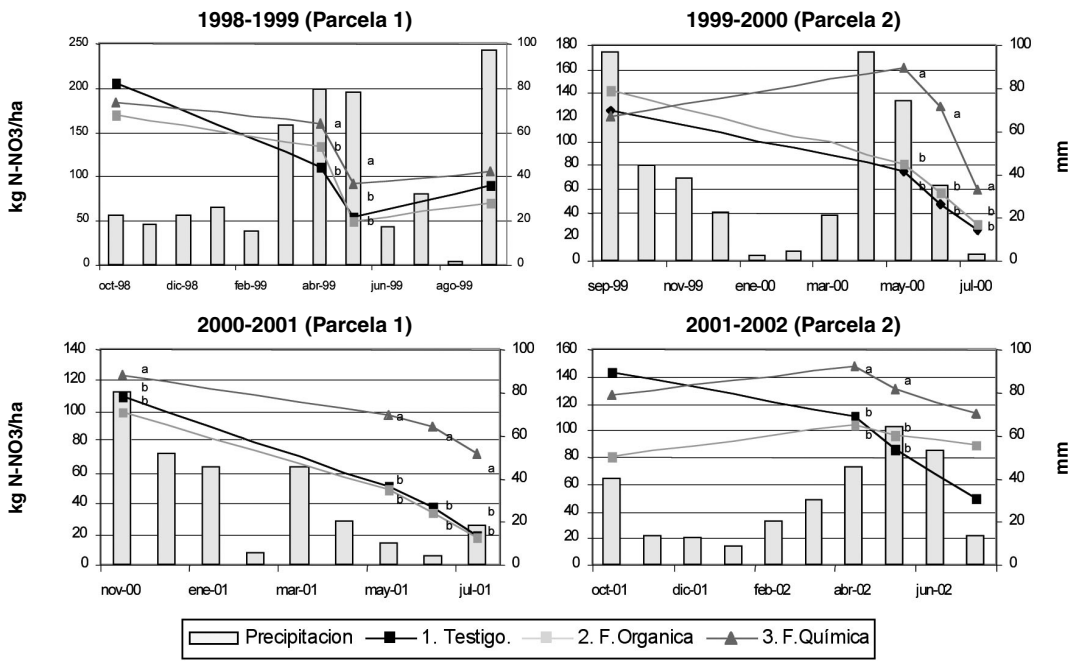


Figura 3. Evolución de N-NO_3^- en los primeros 30 cm de suelo según el tipo de abonado durante los cuatro años de ensayo.
Puntos con letras distintas en una misma fecha difieren significativamente ($p<0,05$) en el test LSD.
Figure 3. Changes of nitrate in soil (depth 0-30 cm) depending on the year and the fertilization type. At the same date, points with different letters differ signifficantly ($p<0.05$) in the LSD test.

muestreos fueron mayores, tal y como se aprecia en los gráficos. De ahí que el contenido del segundo muestreo sea menor que el inicial, a pesar de la cantidad aportada.

Con el transcurso del tiempo, estas diferencias entre tratamientos fueron haciéndose menores a partir del tercer muestreo, en amabas parcelas, llegando a no ser significativas en el último muestreo de 1999 (que se hizo muy tarde, y en el cual ya se observan síntomas de recuperación de los niveles de N tras la cosecha) y de 2002. Esto supone que se produce un mayor descenso de N-NO_3^- en parcelas fertilizadas químicamente, que en el resto. Sin embargo, y como veremos, ese nitrógeno no fue a parar al cultivo, pues sus extracciones, fueron similares para los tres tipos de fertilización, por lo que se deduce que se perdió a capas de suelo más profundas por lixiviación, a la atmósfera por desnitrificación (MacKenzie *et al.,* 1997) o incluso por volatilización del amonio (Fenn y Hosner, 1985) ya que, según estos autores, tanto las pérdidas por desnitrificación como por volatilización ocurren en mayor medida con mayor contenido de nitratos en suelo. Generalmente las pérdidas de nitrógeno a la atmósfera por desnitrificación ocurren en suelos saturados de agua y las pérdidas por lixiviación ocurren cuando hay agua de percolación. Ambas condiciones no son frecuentes en secanos semiáridos pero tampoco pueden descartarse.

Contenido inicial y final de N-NO_3^- en todo el perfil del suelo (90 cm)

Las figura nº 4 muestra el contenido de nitrógeno nítrico en todo el perfil del suelo considerado (90 cm) antes de la siembra y tras la recolección del grano en cada año.

La precipitación total registrada entre ambos muestreos fue de 357 mm en 1999, 441 en 2000, 262 en 2001 (partiendo de suelo saturado, pues se recogieron 175 mm en octubre de 2000) y 247 en 2002.

Se observó, al igual que en los primeros 30 cm de suelo, un alto contenido de nitratos en todo el perfil del suelo sobre todo el primer año de estudio. Se considera que este contenido es poco habitual en zonas semiáridas y, por ejemplo, Angás (2001) partió de contenidos de NO_3^- mucho menores (250 kg N-NO_3^-/ha en los mejores casos) en estudios realizados en el valle del Ebro leridano y oscense. Abad *et al.* (1996) en Belloc (Lérida) también partieron de niveles más bajos (317 kg N-NO_3^-/ha). Sin embargo, nuestro caso tampoco puede considerarse de niveles excepciona-

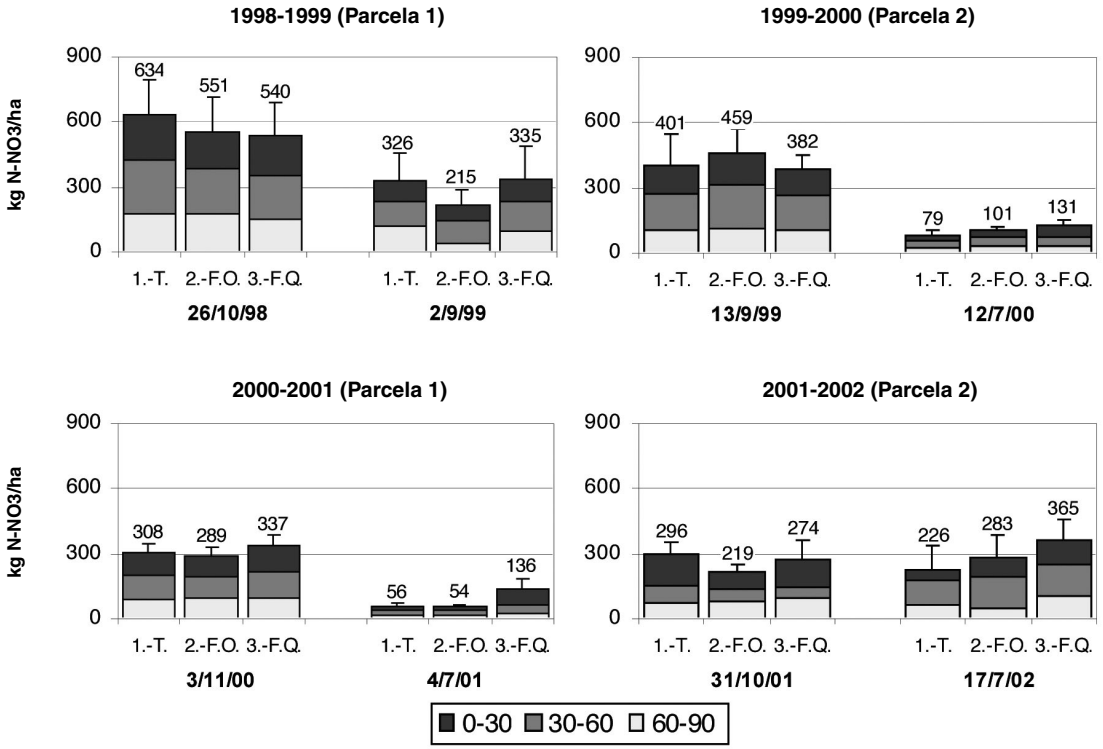


Figura 4. Contenido de N-NO_3^- en el perfil del suelo (0-90 cm) antes y después del periodo de cultivo. Se muestra la cifra del contenido total de N-NO3-. Las barras verticales indican la desviación típica. Sin diferencias significativas (p<0,05) en el test LSD entre tratamientos en una misma fecha. T: Testigo, F.O: Fertilización orgánica, F.Q: Fertilización química

Figure 4. N-NO_3^- content in the soil profile (0-90 cm) before and after the crop season. Numbers indicate total content of N-NO_3^-. Vertical bars indicate the standard deviation. At the same date, differences between fertilization type were not signifficant in the LSD test (p<0,05). T: Check, F.O.: Organic fertilizer. F.Q.: Chemical fertilizer.

les, pues en la zona de Monegros (sur de Huesca) se han encontrado valores similares (J. Cavero, comunicación personal).

Asimismo en todas las campañas, salvo en la última, se produjeron importantes descensos en el contenido de nitratos en el suelo entre siembra y cosecha, estas reducciones no se pueden atribuir, al menos en su totalidad, a las extracciones del cultivo, que fueron mucho menores que la diferencia entre contenido inicial y final, lo que indica que se produjeron importantes pérdidas de nitratos, por la razón que fuera, como veremos en apartados siguientes. Este descenso se produce a pesar incluso de aplicar fertilizantes de una forma moderada-alta (100 ud los dos primeros años y 70 los dos últimos). Cantero Martínez *et al.* (1995), por el contrario, mantuvieron los niveles de nitratos entre inicio y fin de campaña, con dosis moderadas de nitrógeno (65 kg/ha) en zonas semiáridas de Australia y también lo hicieron sin fertilizar, pero obteniendo menor cosecha. La diferencia está en el contenido inicial, que fue mucho menor que en nuestro caso.

En 2001-02 esta tendencia no fue del todo similar, pues en las parcelas fertilizadas (de ambas formas) hubo más cantidad de nitratos al final que al inicio de la campaña. Esto es algo diferente de los tres casos anteriores, aunque hay que decir que entre ambos muestreos de suelo sólo se registraron 247 mm, por lo que se deduce que ese año se limitaron las diversas pérdidas de nitrógeno que se producen con más facilidad con suelo húmedo o saturado. Ello haría que prevaleciera el nitrógeno aportado por la fertilización (mayor que las extracciones, al menos en el caso de la fertilización química como se verá en el apartado siguiente) y quedara acumulado en el suelo, pues las extracciones de los cultivos, debido a esas escasas precipitaciones, también fueron pequeñas, coincidiendo, en este caso, con Angás (2001) cuando aplicó las dosis más altas de nitrógeno (125 kg/ha).

Otra característica común en las cuatro campañas, y en cierta manera lógica, fue que quedó mayor contenido de nitratos en las parcelas fertilizadas químicamente. Ello supondría que una fracción de nitrógeno aportado no ha sido utilizado por el cultivo quedando acumulado en el suelo en el momento del muestreo, hecho también observado por Abad *et al.* (1996) y, como se ha dicho, por Angás (2001). Esto no ocurre de forma tan clara en el primer año, ya que parcelas sin fertilizar tuvieron prácticamente el mismo nivel de nitrógeno, aunque hay que tener en cuenta que también en estas parcelas se partía de mayor cantidad de nitratos (figura 4).

Por último cabe reseñar el mantenimiento de los niveles de nitratos durante el periodo de barbecho de la parcela de cultivo 1, y el incremento importante en el caso de la parcela 2. En el primer caso (del 2/9/99 al 3/11/00) los niveles de nitrato permanecen prácticamente invariables en las parcelas sin fertilizar y las fertilizadas químicamente. Lo que quiere decir que el nitrógeno mineralizado de la materia orgánica y de los restos de cosecha fue compensado por las pérdidas que hubiera. En el caso del abonado orgánico los niveles de NO_3^- incluso aumentaron (de 215 a 289 kg de N-NO_3^-) y ello sería consecuencia de una mayor mineralización, ya que en este caso, a parte de los restos de la cosecha habría otros, procedentes del compost que quizás no se mineralizaron en su totalidad durante el periodo del cultivo o incluso, se pudo inmovilizar alguna fracción de N-NO_3^- del suelo no apareciendo por tanto en los análisis del 2/9/99, y sí un año más tarde. Los abonados orgánicos pueden, en periodos más o menos largos, aparte de no poner a disposición de las plantas todo el N que poseen, inmovilizar

fracciones minerales del suelo (Jenkinson, 1982; Smith y Chambers, 1993).

En la parcela 2 se produjeron unas ganancias mucho más notables durante el periodo de barbecho. En este caso los procesos de mineralización primaron sobre las pérdidas de nitrato y se produjo un incremento muy importante en los niveles de nitrato entre (12/7/00 y 31/10/01) en todos los tratamientos. No obstante hay que tener en cuenta en el caso de esta parcela, que los análisis se efectuaron inmediatamente después de la cosecha, cuando el suelo está más esquilmado y con niveles de nitrógeno mineral más bajos (12/7/00) mientras que en el caso de la parcela 1 estos se efectuaron tras el verano cuando los niveles de nitrógeno se habían recuperado al cesar la extracción (ver figura 3 de evolución a 0-30). Esto unido al hecho de que esta parcela de cultivo posea mayor capacidad de retención de agua que la parcela 1 (limitando por tanto las pérdidas de N por lixiviación) explicaría la diferencia de comportamiento entre las dos parcelas.

Extracciones de nitrógeno por el cultivo y las malas hierbas

La figura nº 5 muestra las extracciones de nitrógeno llevadas a cabo por el cultivo (raíz-paja y grano) y las malas hierbas en el momento de la cosecha.

Los dos primeros años, de crecimiento aceptable de trigo, las extracciones fueron mayores y estas estuvieron alrededor de 150 kg N/ha. La diferencia entre ambos años radicó en la menor extracción por parte del grano en 1999, ya que como consecuencia de los problemas de asurado quedó en la paja gran cantidad de nitrógeno. En 2000 las extrac-

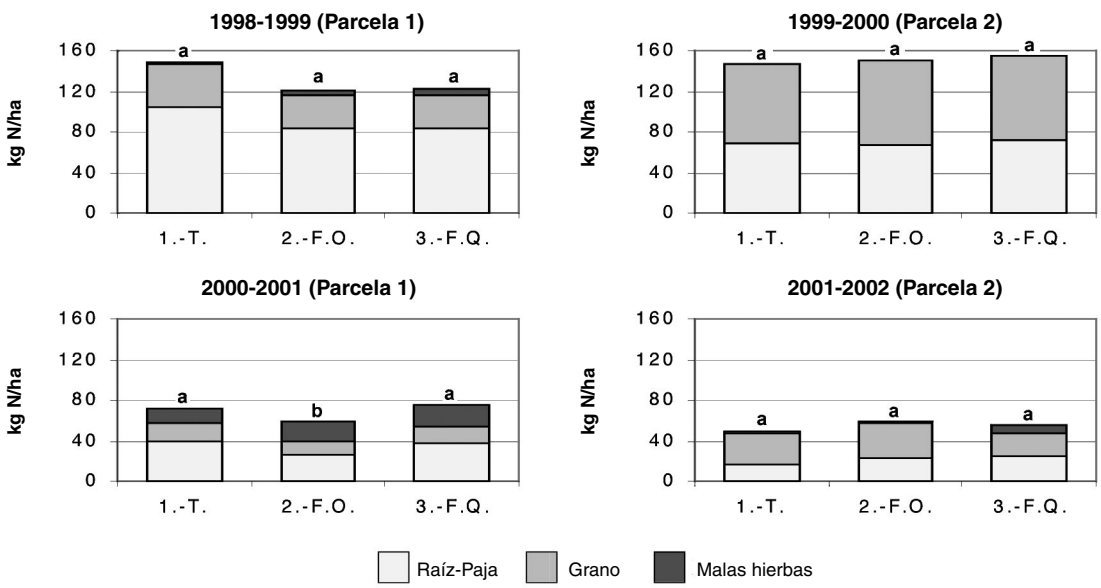


Figura 5. Extracciones de nitrógeno (kg/ha) de las distintas fracciones de biomasa (raíz-paja, grano y malas hierbas). T: testigo, F.O.: fertilización orgánica, F.Q.: fertilización química.
Columnas con letras distintas en cada año difieren significativamente (p<0,05 en el test LSD).
Figure 5. Nitrogen extraction (kg/ha) of the different biomass fractions (Root - straw, grain and weeds). T: Check, F.O.: Organic fertilizer. F.Q.: Chemical fertilizer. Columns with different letters at each year differ significatively (p<0.05) in the LSD test.

ciones del grano fueron mayores a las de la paja ya que se dieron unas mejores condiciones climáticas para el llenado de éste.

En los años de cebada (2000-01 y 2001-02) las extracciones fueron menores, consecuencia del escaso desarrollo del cultivo por los problemas climáticos que se describirán. En 2000-01 se produjeron menos extracciones significativamente con abonado orgánico, sin una explicación muy clara, ya que, aunque ese año el periodo de cultivo fue muy corto, de febrero a junio, y es posible que el nitrógeno del compost no pasara a formas asimilables por el cultivo, los contenidos iniciales y finales de $N\text{-}NO_3^-$ en el suelo fueron muy similares a los de las parcelas sin fertilizar (figura 4) y no parece que existan carencias de este elemento en ningún momento. Este año, las malas hierbas extrajeron una importante fracción del nitrógeno total dando idea del poder competitivo de éstas si no son controladas adecuadamente.

Respecto al contenido en nitrógeno de las distintas fracciones de biomasa (tabla 5) sólo un año se observaron diferencias significativas a favor de la fertilización química (caso de la raíz-paja en 2002). Pero, además, también hubo mayor porcentaje de nitrógeno en el resto de años y fracciones de biomasa (incluyendo el grano, la parte más importante a tener en cuenta) cuando se aplicó fertilizante químico, si exceptuamos el caso de las malas hierbas en 1999 que representaron una parte muy escasa. Van Herwaarden *et al.* (1998) en condiciones semiáridas, observaron mayor porcentaje de nitrógeno en grano al incrementar la dosis de nitrógeno y ello sin aumentar la cosecha, coincidiendo estos resultados con los nuestros en ambos aspectos. Sin embargo, el compost tampoco hizo incrementar el contenido de nitrógeno en el conjunto de la biomasa. Ciria *et al.* (1998) estudiaron la influencia de fertilizantes orgánico o químico en el porcentaje de proteína en cebada, no encontrando efecto del fertilizante orgánico (11,06%) frente al testigo (10,58%) pero sí del abonado químico (13,01%) estando por tanto estos datos, en consonancia con nuestros resultados generales.

Tabla 5. Porcentaje de N de las distintas fracciones de biomasa (raíz-paja, grano y malas hierbas)
Table 5. Percentage of nitrogen of the different biomass fractions (Root - straw, grain and weeds)

Año	1998-1999 (Parcela 1)			1999-2000 (Parcela 2)		
Tipo fertilización	Raíz-paja	Grano	Malas hierbas	Raíz-paja	Grano	Malas hierbas
Trigo						
1. Testigo	1,17 a	3,33 a	1,69 a	0,86 a	2,75 a	-
2. F. orgánica	1,11 a	3,27 a	1,87 a	0,86 a	2,79 a	-
3. F. química	1,23 a	3,41 a	1,67 a	0,91 a	2,95 a	-
Año	2000-2001 (Parcela 1)			2001-2002 (Parcela 2)		
Tipo fertilización	Raíz-paja	Grano	Malas hierbas	Raíz-paja	Grano	Malas hierbas
Cebada						
1. Testigo	1,15 a	2,11 a	1,22 a	0,85 b	1,96 a	3,23 a
2. F. orgánica	1,03 a	1,99 a	1,08 a	1,11 b	2,00 a	3,18 a
3. F. química	1,14 a	2,22 a	1,23 a	1,40 a	2,07 a	3,40 a

Cifras con letras distintas en cada fracción y año difieren significativamente ($p<0,05$) en el test LSD.
Numbers with different letters in every biomass fraction and year differ significatively ($p<0.05$) in the LSD test.

En resumen se puede decir que las extracciones han sido fundamentalmente iguales y que sólo en un año se vieron afectados por el tipo de fertilización. Esto es lógico, ya que analizando los datos de suelo, en ningún momento, ni bajo ningún tipo de fertilización, se considera que haya existido déficit de nitrógeno que limitara el desarrollo de cultivo. Ello explica de manera clara por qué no se han producido diferencias en el resto de parámetros de biomasa y productivos como se verá. Las condiciones climáticas han sido las que han condicionado los rendimientos y no los diferentes tipos de fertilización que aportaron un pequeño porcentaje de nitrógeno respecto al que ya poseía el suelo en el momento de la siembra en todos los años.

Balance parcial de N-NO_3^- según el tipo de fertilización y parcela de cultivo

Las dos parcelas de cultivo presentan una dinámica algo diferente. Mientras en la 1 las pérdidas acumuladas y en cada periodo analizado por separado son muy grandes, en la 2 las pérdidas globales son mucho más moderadas y en periodos parciales existen incluso ganancias (figura 6). El hecho que justifica este comportamiento sería el distinto contenido de nitratos de partida, bastante más alto en el caso de la parcela de cultivo 1 que en la 2, ya que, aún en condiciones de secano, con cantidades tan altas de nitratos, se pueden producir importantes pérdidas por lixiviación de este elemento (López Bellido *et al.*, 1997), pues sólo hace falta una lluvia de cierta intensidad (normalmente en esta zona en otoño-invierno) que supere la zona de raíces. Otro hecho que justificaría este comportamiento diferente vendría determinado por la capacidad de retención de agua estimada para la parcela 1 en 136 mm mientras que en la 2 fue de 170 mm. Lógicamente se produce antes percolación en la parcela 1 y por tanto, mayor riesgo de perdidas por lixiviación. Así parece confirmarse ya que a parte de las pérdidas globales las hay en los tres periodos parciales considerados.

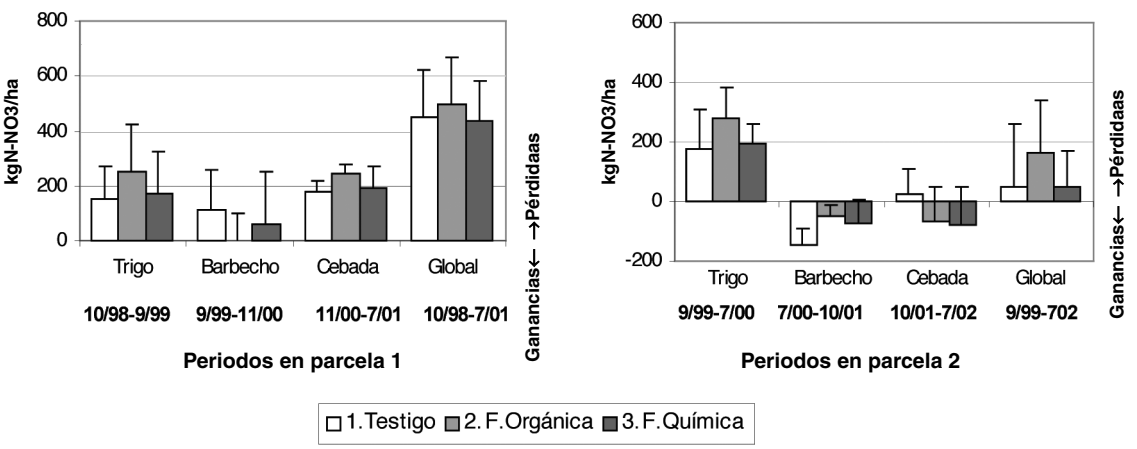


Figura 6. Balance parcial de N-NO_3^- según fertilización, periodo de cultivo y parcela. Las barras verticales muestran la desviación estándar. Sin diferencias significativas (p<0,05) en el test LSD.
Figure 6. Partial balance of N-NO_3^- according to the fertilization type, crop period and plot. Vertical bars indicate the standard deviation. In the same date, differences between fertilization type were insignificant in the LSD test (p<0,05).

En la parcela 2 las pérdidas son menores y limitadas prácticamente al primer periodo considerado, que si fueron importantes. Por el contrario, en los otros dos casos predominaron las ganancias de nitrato. La mineralización del elevado contenido de materia orgánica, unido a la falta de extracción vegetal al estar en periodo de barbecho, hicieron posible una ganancia neta de este nutriente que quedó en disposición para el cultivo siguiente de cebada. En este último periodo, se produjeron ganancias de nutrientes en parcelas fertilizadas de una u otra forma, ya que parte del abonado aplicado quedó acumulado en el momento de la cosecha, favorecido por las escasas extracciones del cultivo, aunque podría perderse posteriormente si no es aprovechado por otro cultivo. Abad *et al.* (1996) y Angás (2001) también observaron acumulación de nitrato en el momento de la cosecha con las dosis más altas de nitrógeno al no ser extraído por el cultivo.

Respecto a las pérdidas según el tipo de fertilización aplicada, cabe destacar que se producen muy pocas diferencias en las dos parcelas de cultivo. El hecho que quede mayor cantidad de nitrógeno en parcelas fertilizadas químicamente en las dos parcelas de cultivo (aún a riesgo de ser perdido posteriormente) hace que el balance quede igualado con las parcelas sin fertilizar. En contra de lo que cabría esperar, las mayores pérdidas se producen con el abonado orgánico y en las dos parcelas. Este hecho podría deberse a dos razones, a pérdidas directas en el N orgánico aplicado por percolación, ya que se aplica el abonado en noviembre, que es cuando el perfil del suelo puede contener más agua, o que la aplicación de este compost tuviera un efecto de inmovilización (Jenkinson, 1982) sobre el N presente (lo cual no debería considerarse una pérdida propiamente dicha) aunque esto teóricamente no debería ocurrir de acuerdo a la baja relación C/N del compost aplicado, como se vio en el apartado de Material y Métodos.

Los abonados orgánicos pueden ser fuente de pérdidas por lixiviado de nitrato más frecuentemente que mediante la aplicación de fertilizantes químicos, ya que es más difícil sincronizar las necesidades de los cultivos con la puesta a disposición del nitrógeno en forma asimilable. Puede ocurrir que los nitratos procedentes de fuentes orgánicas aparezcan cuando el cultivo ya ha sufrido la carencia, y aparte de la repercusión negativa en el rendimiento, estos quedan en el suelo sin ser utilizados, con el riesgo de ser lixiviados si se producen lluvias (Cavero *et al.,* 1997).

Influencia del tipo de fertilización en la evolución de la materia orgánica, el fósforo y el potasio

Se efectuó un análisis final de la materia orgánica, de fósforo y de potasio en los 30 primeros cm de suelo para estudiar como han influido los distintos tipos de fertilización en la evolución de estos parámetros tras más de 6 años de ensayo. Se consideró que de producirse cambios importantes en estos parámetros se producirían principalmente en la capa arable del suelo. Los resultados de partida y actuales se muestran en la tabla 6.

En general se observaron pocos cambios en estos tres parámetros. Se ha producido un ligero incremento en el porcentaje de materia orgánica en las parcelas fertilizadas de la parcela 1 y un ligero descenso en toda la parcela 2. Esto quizás pueda explicarse, en parte, por la mayor cantidad de restos incorporados en la parcela 1 y por el hecho de que la rotación en esa parcela ha incluido un periodo más de veza enterrada (tabla 7). El contenido de materia orgánica está influenciado, a largo plazo, por la cantidad de residuos devueltos, como explican Unger (1968) y Karlen *et al.* (1994).

Tabla 6. Evolución de la materia orgánica (M.O.), fósforo (Olsen) y potasio de 1997 a 2003 según el tipo de fertilización
Table 6. Changes in the organic matter, phosphorus and potassium (1997 to 2003) according to the fertilizer type

Fecha	Parcela cultivo 1 1997			Parcela cultivo 2 1997		
Tipo fertilización	M.O.(%)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)	M.O.(%)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)
-	2,62	21,93	325	2,72	21,88	328,5
Fecha	Abril 2003			Abril 2003		
Tipo fertilización	M.O.(%)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)	M.O.(%)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)
1. Testigo	2,52	23,83	241	2,44	20,76	265
2. F. orgánica	2,79	25,47	361	2,48	21,56	267
3. F. química	2,82	32,83	307	2,35	22,54	266

En 2003, las cifras en cada parámetro no difieren significativamente (p<0,05 en el test LSD).
In 2003, the numbers in each parameter were insignificant in the LSD test (p<0,05).

Tabla 7. Cantidades de materia seca devueltas al suelo (kg/ha) en cada campaña en el periodo 1997-2002 en cada parcela de cultivo y tipo de fertilización (M.h.: malas hierbas).
Table 7. Dry matter (kg/ha) incorporated into the soil in each year in the 1997-2002 period according to the plot and to the fertilization type (M.h.: weeds).

Año	1997		1998	1999		2001		2002	97-02
Tipo fertilización	Paja cebada	M.h.	Veza	Paja trigo	M.h.	Paja cebada	M.h.	Veza	Total
Parcela 1									
1. Testigo	7446	52	6991	8912	123	2567	1348	1978	**29418** (±5718)
2. F. orgánica	7615	80	7304	7426	258	1807	1745	1971	**28208** (±6862)
3. F. química	6789	52	6024	6679	449	2621	1900	1597	**26113** (±4508)

Año	1998		1999	2000		2002		98-02
Tipo fertilización	Paja cebada	M.h.	Veza	Paja trigo	M.h.	Paja cebada	M.h.	Total
Parcela 2								
1. Testigo	5934	1	5078	8026	0	2358	147	**21543** (±2915)
2. F. orgánica	6747	2	4850	7838	0	2240	137	**21813** (±1344)
3. F. química	6147	0	3863	7942	0	1753	136	**19842** (±2390)

Entre paréntesis la desviación estándar.
In brackets, standard deviation.

Respecto al fósforo, se observó un incremento de su cantidad en la fertilización química y en la parcela 1, aunque no lo hizo de forma significativa frente a los otros tipos de fertilización que también lo hicieron (incluso el testigo) aunque de forma más ligera. Ello

unido a que no se confirma la tendencia en la parcela de cultivo 2, en la que se mantienen los niveles iniciales para los tres tipos de fertilización, hace pensar que no han existido variaciones de importancia afectadas por el paso del tiempo ni por el tipo de fertilización en el contenido de fósforo en el suelo.

El potasio sólo se vio incrementado por la fertilización orgánica en la parcela 1, aunque tampoco mostró diferencias significativas respecto a los otros dos tratamientos que presentaron valores más bajos que los iniciales, al igual que en los tres tipos de fertilización en la parcela 2. Quizás la tendencia general de este macronutriente sea a la baja, algo lógico dado los altos valores iniciales, y tampoco se vio afectado de forma significativa por el tipo de fertilización aplicada.

Como resumen global se puede decir que los tres elementos estudiados han mantenido los altos niveles iniciales, que la rotación llevada a cabo y el enterrado de la veza y residuos de cosecha han servido para mantener esta alta fertilidad inicial, considerando además que las bajas cosechas obtenidas en tres de los cuatro años han implicado bajas extracciones de estos macronutrientes.

Influencia del tipo de fertilización en los componentes del rendimiento

Los componentes del rendimiento no se vieron prácticamente afectados por el tipo de fertilización aplicada en tres de los cuatro años estudiados. Sólo en 2001-02 en parcelas fertilizadas químicamente hubo un significativo menor número de espigas por metro cuadrado en relación a la menor biomasa obtenida con ese tipo de fertilización en el último muestreo de biomasa. Sin embargo, otros autores han observado una mayor densidad de espigas al aumentar las dosis de N aplicado (Fowler *et al.,* 1989; Campbell *et al.,* 1993), aún en condiciones de escasez de agua.

A pesar de que no se produjeron diferencias significativas en el peso de 1000 granos, hay que indicar que este fue menor con aplicación de abonado químico en los cuatro años sin excepción, por lo que es posible que el nitrógeno aportado en estas condiciones de sequía fuera perjudicial, al menos, para este parámetro del rendimiento. Cantero-Martínez *et al.* (1995) y Le Gouis *et al.* (1999) observaron también un menor peso de los 1000 granos al incrementar la dosis de N en estos ambientes.

Comparando los dos años de trigo duro 98-99 y 99-00, el componente que marcó las diferencias del rendimiento final entre ambos años fue el peso de 1000 granos, pues en el primer año apenas se produjeron lluvias del 15 de mayo al 15 de junio lo que, unido a las altas temperaturas de final de mayo, produjo resultados negativos para el llenado del grano. Así, frente a los 23,5 gramos obtenidos como media de los tres tratamientos, la Asociación Española de Técnicos Cerealistas (1998) afirma que la media en Aragón para trigo duro 'Antón' es de 39 gramos. Por el contrario, en 1999-00 con una evolución de la biomasa del cultivo similar hasta mayo, y esta vez con las lluvias mejor distribuidas, se obtuvo un peso aceptable.

En cuanto a la cebada, en 2000-01, el número de espigas por metro cuadrado fue bajo, pero más lo fueron el de granos por espiga y el peso de los 1000 granos. La fecha tardía de siembra, la escasísima precipitación durante el cultivo y la infestación de vallico contribuyeron a que se obtuvieran estos resultados tan pobres, ya que prácticamente no se produjo ahijamiento y el vigor del cultivo fue muy reducido. En la campaña siguiente, aunque el número de espigas por metro cuadrado fue menor y también el número de granos por espiga, un peso de 1000 granos aceptable hizo que se obtuviera una cosecha algo mejor, sobre

Tabla 8. Componentes del rendimiento del cultivo según el tipo de fertilización
Table 8. Cereal yield components according to the fertilization type

Año	Parcela cultivo 1 1998-1999			Parcela cultivo 2 1999-2000		
Tipo fertilización	Nº espigas/m^2	Nº granos/ 10 espigas	Peso 1000 (g)	Nº espigas/m^2	Nº granos/ 10 espigas	Peso 1000 (g)
Trigo						
1. Testigo	281 a	242 a	24,3 a	338 a	272 a	34,7 a
2. F. orgánica	283 a	225 a	24,3 a	336 a	275 a	33,9 a
3. F. química	283 a	233 a	22,2 a	342 a	263 a	33,7 a
Año	2000-2001			2001-2002		
Tipo fertilización	Nº espigas/m^2	Nº granos/ 10 espigas	Peso 1000 (g)	Nº espigas/m^2	Nº granos/ 10 espigas	Peso 1000 (g)
Cebada						
1. Testigo	393 a	162 a	23 a	300 a	146 a	32,0 a
2. F. orgánica	329 a	148 a	24 a	336 a	145 a	32,0 a
3. F. química	358 a	164 a	22 a	233 b	140 a	30,4 a

Cifras con letras distintas en cada componente de rendimiento y año, difieren significativamente ($p<0,05$) en el test LSD.
Numbers with different letters in every yield component and year differ significantly ($p<0.05$) in the LSD.

todo en lo que respecta a la calidad de grano. En este caso la sequía durante todo el periodo del cultivo fue la causa determinante de que hubiera poca densidad de espigas y pocos granos por espiga. Sin embargo la aparición de cierta cantidad de lluvia en mayo-junio (117 mm) hizo que el llenado del grano fuera aceptable a pesar de que la cosecha obtenida, que como se verá, fue escasa.

Influencia del tipo de fertilización en la producción de grano

Los datos de producción obtenidos apenas reflejaron diferencias importantes entre tratamientos en ninguno de los cuatro años analizados. Lo más destacable fue que no se obtuvo mayor cosecha mediante el uso de fertilizante químico en ningún caso sino que, paradójicamente, en las parcelas sin fertilizar se obtuvo la mejor cosecha durante dos años (parcela de cultivo 1) y en la media general de los cuatro años, aunque sin diferencias significativas.

Así pues, la fertilización convencional química resultó, en todo caso, contraproducente para la cosecha en esa situación. El componente de rendimiento que explicaría esto sería el menor peso 1000 granos, también menor en todos los años para la fertilización química, como se vio en el apartado anterior. En el último año, además se unió el hecho de obtener una menor densidad de espigas. Angás (2001) explica que en zonas semiáridas del valle del Ebro, el abonado nitrogenado a final del invierno favorece el ahijado del cultivo con relativa humedad. Sin embargo, la habitual escasez de agua al final del periodo del cultivo no permite un correcto llenado de grano para ese mayor número de espigas generado y es la razón de ese menor peso del grano. No

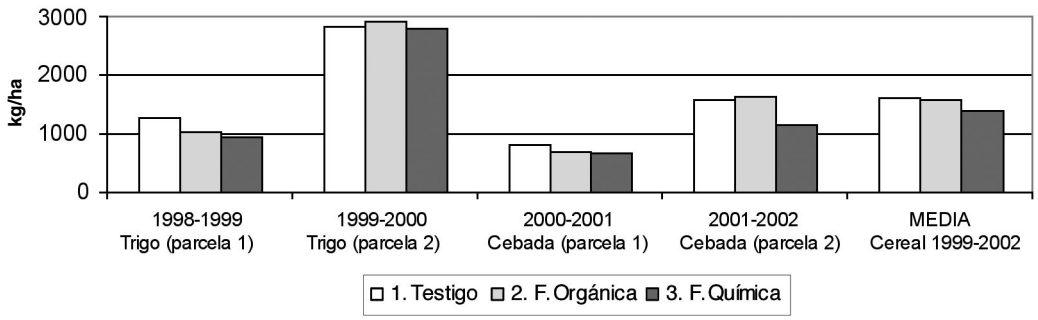


Figura 7. Producción de grano según el tipo de fertilización.
Las columnas en cada año no difieren significativamente (p<0,05) en el test LSD.
Figure 7. Cereal yield according to the fertilization type.
In each year, differences between fertilization type were not signifficant in the LSD test (p<0,05).

obstante, en sus estudios, sí obtuvo mayor cosecha con dosis moderadas de N (50 kg N/ha) que sin aplicar abono, ya que el mayor número de espigas compensó el menor peso de los granos. Sin embargo, esta tendencia se paralizó al aplicar 125 kg N/ha. En nuestro caso no apreciamos esa mayor densidad de espigas y de ahí que el rendimiento fuera menor con fertilización química. Ni siquiera el año de climatología más favorable (99-00) en el que se obtuvo mejor cosecha globalmente, resultó favorable a este tipo de fertilización.

La fertilización orgánica obtuvo una ligera mejor cosecha en la parcela de cultivo 2, indistintamente en trigo y cebada, aunque es difícil atribuir esto a las propiedades del compost dada la evolución del nitrógeno observada en apartados anteriores. De forma más clara, González *et al.* (1992) obtuvieron mejores cosechas con compost que con abonado químico, a su vez mayor que el testigo, pero con aplicaciones mucho mayores de 20 t/ha.

Por último, hay que destacar que sin aplicar ningún tipo de fertilización se obtuvo igual cosecha, cuando no mejor, que aplicando cualquier tipo de fertilizante. Algunos autores (Smith *et al.*, 1987; Christian *et al.*, 1992; Shennan, 1992) afirman que mediante el enterrado en verde de una leguminosa se pueden incorporar de 10 hasta 200 kg N/ha para el siguiente cultivo. En este caso el aporte de 100 u. adicionales de N puede quedar enmascarado o resultar excesivo por el nitrógeno ya existente en el suelo. Así, algunos autores afirman que incluyendo leguminosas en las rotaciones se puede incluso eliminar el aporte de fertilizantes nitrogenados sin merma de cosecha (Neely *et al.*, 1987; Granstedt, 1990; Matheson *et al.*, 1991; Campbell *et al.*, 1991). No obstante hay que decir que algunos autores tampoco han obtenido respuesta positiva a la fertilización química, sin enterrado previo de ninguna leguminosa, en zonas semiáridas de Aragón (Betrán y Pérez Berges, 1997) o de Australia (Van Herwaarden *et al.*, 1998), donde la producción de trigo disminuyó conforme se aumentó la dosis de nitrógeno aplicada. Estos hechos indicarían que existen pocas ocasiones, en las condiciones de nuestros ensayos, en las que un abonado, químico u orgánico, incremente

la cosecha de forma significativa como ya se ha indicado Pardo *et al.* (2004).

De los resultados referentes al nitrógeno y otros parámetros de fertilidad del suelo, se deduce que el nivel de nutrientes generados por los restos del cultivo y por la mineralización de la materia orgánica durante el periodo de barbecho o veza (muy elevada para tratarse de una zona semiárida), fue suficiente para mantener las producciones que normalmente son bajas. Ni siquiera en el único año en que se obtuvo una buena cosecha (1999-00) se resintió la producción en parcelas sin fertilizar.

Conclusiones

1. En los 30 primeros cm de suelo, las parcelas fertilizadas orgánicamente no lograron incrementar el contenido de nitrato a la salida del invierno en relación a las parcelas sin fertilizar. Sin embargo, las fertilizadas químicamente tuvieron un contenido de este nutriente significativamente mayor que aquellas en que se aplicó compost o no se abonó.

2. El balance parcial de nitrógeno mostró importantes pérdidas de nitrato en la parcela de cultivo 1, incluso en parcelas sin fertilizar y moderadas en la parcela 2, para todos los sistemas de fertilización aplicados.

3. Los altos niveles de materia orgánica (2,67%) y fósforo (21,90 ppm) iniciales se han mantenido tras más de 6 años de ensayos, incluso en las parcelas sin fertilizar. El potasio descendió ligeramente. Se considera que la rotación llevada a cabo, junto con el enterrado de los restos de cosecha, ha sido suficiente para mantener los contenidos de nutrientes.

4. Las extracciones de nitrógeno por parte de la biomasa total producida (grano, paja y malas hierbas) no se vieron influidas significativamente por el tipo de fertilizante utilizado o su no utilización.

5. Los componentes del rendimiento (número de espigas/m^2, número de granos/espiga y peso de 1000 granos) no se vieron afectados por los niveles de fertilización estudiados. Únicamente en 2002 en número de espigas/m^2 fue significativamente menor al aplicar fertilizante químico.

6. En los cuatro años ensayados, la aplicación de fertilizante químico u orgánico no indujo incremento alguno de producción de grano en las condiciones ensayadas. Los nutrientes de partida existentes en el suelo fueron suficientes para mantener unas producciones bajas, limitadas por las condiciones semiáridas, y los aportes suplementarios en formas químicas u orgánicas no se tradujeron en aumento de cosecha, en este suelo con alto contenido inicial de materia orgánica y macronutrientes.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación de los proyectos INIA SC 96081 y RTA 01-108.

También queremos expresar nuestra gratitud al Dr. Bonilla del Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón en Zaragoza por su amable disposición y facilidad para realizar los análisis de nitrógeno en planta y suelo, así como a Fernando Arrieta y Maria León por su inestimable ayuda.

Bibliografía

Abad A, Lloveras J, Michelena A, 1996. Efecto del abonado nitrogenado en la producción y calidad del trigo y en el contenido de nitratos

residuales del suelo. Seminari Dinamica del Nitrogen en el Sòl. 31 d'octubre 1996. En el marc del 2º curs d'Engenyeria Ambiental: Eliminació biológica de nutrients en aigües residuals. Lleida, 49-53.

Angás P, 2001. Análisis de la influencia de las técnicas de laboreo y fertilización nitrogenada sobre la dinámica del agua y del nitrógeno en el suelo en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en zonas áridas o semiáridas del Valle del Ebro. Agronomía y modelización. Tesis doctoral. ETSEA, Lérida. 151pp.

Asociacion Española de Técnicos Cerealistas, 1998. Encuesta de Calidad de los trigos españoles. Cosecha 1998. AETC, Madrid.

Betran JA, Pérez Berges M, 1997. "Respuesta del cereal en secano al abonado N P K". Dirección General de Tecnología Agraria. Diputación General de Aragón. Información Técnica nº 30, 16 pp.

Campbell CA, Selles F, Zetner RP, Mcconkey BG, 1993. Available water and nitrogen effects on yields componets and grain nitrogen of zero-till spring wheat. *Agronomy Journal*, 85: 114-120.

Campbell CA, Schnitzer M, Lafond GP, Zetner RP, Knipfel JE, 1991. Thirty year crop rotation and management practices effects on soil amino nitrogen. *Soil Science of America Journal*, 55: 739-745.

Cantero-Martínez C, O'leary GJ, Connor DJ, 1995. Stubble retention and nitrogen fertilization in a fallow-wheat rainfed cropping systems. Soil water and nitrogen conservation, crop growth and yield. *Soil and Tillage Research*, 34: 79-94.

Cavero J, Plant RE, Shennan C, Friedman DB, 1997. The effect of nitrogen source and crop rotation on the growth and yield processing tomatoes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 47: 271-282.

Christian DG, Goodlas G, Powlson DS, 1992. Nitrogen uptake by cover crops. *Aspects of applied Biology*, 30: 291-300.

Ciria MP, Sánchez MR, Moyano A, 1998. Contenido proteínico en grano y su relación con el aporte de nutrientes. *Actas del III Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica SEAE*. 479-485.

Fenn LB, Hosner LN, 1985. Ammonia volatilisation from ammonium or ammonium nitrogen fertilizers. In Advances in Soil Science. Volume 1. En Stewart, B.A. (ed.) New York: Springer-Verlag. 124-157.

Ferández-Pascual M, De Maria N, De Felipe M, 2002. Fijación biológica del nitrógeno: Factores limitantes. En Fernando Valladares (editor) Ciencia y medio ambiente. CSIC, España. 195-202.

Fowler DB, Brydon J, Baker RJ, 1989. Nitrogen fertilization of no-till and winter wheat and rye I. Yield and agronomic responses. *Agronomy Journal* 81: 66-72.

González JL, Benítez IC, Pérez IM, Medina M. 1992. Pig slurry compost as wheat fertilizers. *Bioresource Technology*, 40: 125-130.

Granstedt A, 1990. The supply and conservation of nitrogen in alternative farming –ecological agriculture– *Proceedings of the ecological agriculture*. Uppsala (Sweden) 163-177.

Helrich K, 1990. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemist (AOAC). Edit. AOAC. 1.297 pp

Jenkinson DS, 1982. The nitrogen cycle in long term field experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 296: 563-571.

Karlen DL, Vervel GE, Bullock DG, Cruse RM, 1994. Crop rotations for 21 st century. *Advances in Agronomy*, 45: 1-45.

Labrador J, 2001. La materia orgánica en los agroecosistemas. MAPA. Ediciones Mundiprensa. Madrid. 293 pp.

Le Gouis J, Delebarre O, Beghin D, Heumez E, Pluchard P, 1999. Nitrogen uptake and utilization efficiency of two-row and six-row winter barley cultivars grown at two N levels. *European Journal Agronomy*. 10: 73-79.

Lezaun JA, Lafarga A, Armesto AP, Irañeta J, 2001. Nutrición nitrogenada de los cereales. *Navarra Agraria*, 126: 24-31.

López-Bellido L, López-Garrido FJ, Fuentes M, Castillo JE, Fernández EJ, 1997. Influence of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on soil organic matter and nitrogen under rain-fed Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 43: 277-293.

Mackenzie AF, Fan MX, Cadrin F, 1997. Nitrous oxide emission in three years as affectd by tillage, corn-soybean-alfalfa rotation, and nitrogen fertilization. *Journal of Environmental Quality*, 27: 698-703.

Mathenson N, Kirschenmann F, 1991. Cereal legume cropping systems: nine farm case studies in the dryland Northern Plains, Canadian Prairies and Intermountain Northwest. Alternative Energy Resources Organization, 75 pp. USA.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1987. Caracterización agroclimática de la provincia de Zaragoza. Madrid. 1987.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1994. Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III.

Mitchell WH, Teel MR, 1997. Winter annual cover crops for no tillage corn production. *Agronomy Journal*, 69: 569-573.

Neely CL, Mcvay KA, Hargrove WL, 1987. Nitrogen contribution of winter legumes to no-till corn grain sorghum. In the Role of Legumes in Conservation Tillage Systems, J.F. Power (ed). SCSA. Ankeny. Iowa, 48-49.

Ordóñez R, González P, Giráldez JV, 1997. Deterioro de la calidad nítrica de los acuíferos de una cuenca agrícola en el valle del Guadalquivir. XV Congreso Nacional de Riegos 25-27 Jun. Lérida.

Pardo G, Aibar J, Ciria P, Cristóbal MV, De Benito A, Estalrich E, García Martín A., García Muriedas G, Labrador C, Lacasta C, Lafarga A, Lezaún JA, Meco R, Villa F, Zaragoza C, 2004. Influencia del tipo de fertilización y desherbado en una rotación de cereales en secano. *ITEA*. Vol. 100: 1, 34-50.

Ryser J, Pittet P, 2000. Influence du sol et de la fumure sur les cultures et le drainage des éléments fertilisants. *Revue Suisse Agriculture* 32(4): 159-164.

Shennan C, 1992. Cover crops, nitrogen cycling, and soil properties en semi-irrigated vegetable production systems. *HortScience*, 27: 749-754.

Smith MS, Frye WW, Varco JJ, 1987. Legume winter cover crops. *Advances in Soil Science*, 7: 95-139.

Smith, KA, Chambers BJ, 1993. Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms- problems and practical solutions. *Soil Use Management* 9: 105-112.

Unger PW, 1968. Soil organic matter and nitrogen change during 24 years of dryland wheat tillage and cropping practices, *Soil Science Society American. Procedures* 32: 426-429.

Urbano P, 1995. Tratado de Fitotecnia General. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Van Herwaarden AF, Farguhar GD, Angus JF, Richards RA, Howe GN, 1998. "Haying-off" the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. I. Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research* 49, 7: 1067-1081.

Wadman P, Neeteson JJ, 1992. Leaching losses from organic manures-the Dutch experience. In: Archer *et al.* (eds) Aspects of Applied Biology Nº 30. Nitrate and Farming Systems, 117-126.

(Aceptado para publicación el 29 de abril de 2005)