

OPTIMIZACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA: PROCEDIMIENTOS DE ANALISIS DE SUELO, TOMA DE MUESTRA Y ELECCIÓN DEL TIPO DE FERTILIZANTE

J. A. DÍEZ LÓPEZ

Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. C/ Serrano 115, 28006 Madrid.
jadiez@ccma.csic.es

Resumen: Los fertilizantes nitrogenados aplicados en exceso, constituyen un riesgo medioambiental. Para evitarlo, debemos conocer el nivel de nitrógeno asimilable del suelo y sobre esta base establecer la dosis optima de fertilizante.

Se hace una revisión de los métodos seguidos para determinar las dosis optimas de fertilizantes nitrogenados. Los principales métodos analizados en el trabajo, son: N min, electroultrafiltración (EUF) y CaCl_2 . Mediante estos procedimientos y basándose en experimentos de campo con diversos cultivos, se presentan algunos sistemas para estimar el nitrógeno asimilable del suelo con objeto de optimizar la dosificación de fertilizantes nitrogenados en orden a minimizar las pérdidas de nitrato por lixiviación.

Se incluye una discusión sobre la necesidad de evaluar el nitrógeno potencialmente mineralizable del suelo, antes del comienzo del cultivo, mediante el N orgánico extraído por EUF ó CaCl_2 , y se comparan los datos de calibración obtenidos en experimentos realizados en países de la UE con los obtenidos en España.

Además se incluye una discusión, sobre el momento de efectuar la toma de muestra de suelo, el tipo de fertilizante nitrogenado más adecuado y el efecto de las dosis de riego.

Palabras Clave: nitrógeno asimilable del suelo, análisis de suelo, N min, electroultrafiltración, dosis de fertilización nitrogenada.

Abstract: Excess of nitrogen fertilizer rates is an environmental hazard. To avoid excess rates, the level of available nitrogen in the soil, must be well known for assessing the nitrogen fertilizer rate.

The methods to determine the optimization of nitrogen fertilization, are revised. The main methods considered in this paper were: N min, electroultrafiltration (EUF) and CaCl_2 . By means of this procedures and field experiments with different crops, some available nitrogen determination systems, are shown. The object is to optimize nitrogen fertilizer rates in order to reduce the losses of nitrate leaching.

A discussion on the necessity of account the potentially mineralizable nitrogen in the soil, before the crop has started, is included. This information, can be obtained by means of organic N extracted by EUF or CaCl_2 . The calibration dates of this parameter, found in experiments realized in several EU countries with the obtained in Spain, has been compared.

Moreover, time of soil sampling, the suitable type of nitrogen fertilizer and the effect of the irrigation rates, are discussed.

Key words: available soil nitrogen, soil test, N min, electroultrafiltration, nitrogen fertilization rates.

INTRODUCCIÓN

La fertilización nitrogenada no sólo persigue obtener un elevado retorno económico de la inversión a través de la calidad y producción optimizada del cultivo, sino también minimizar sus efectos sobre el medioambiente (lixiviación del nitrógeno residual del suelo hacia las aguas subterráneas, pérdidas de nitrógeno por desnitrificación ó volatilización).

Aunque el nitrógeno es, desde un punto de vista cuantitativo, el principal nutriente en la producción de los cultivos, en comparación con el fósforo y el potasio, los procedimientos seguidos para la fertilización nitrogenada han sido durante largo tiempo de resultado incierto y de escasa justificación científica.

Es una práctica bastante común entre los agricultores, la aplicación de dosis excedentarias de nitrógeno con objeto de obtener un máximo de producción (Steinhauser, 1987) sin preocuparse de las consecuencias que el exceso de nitrógeno tiene sobre la lixiviación de nitratos a las aguas subterráneas (Díez *et al.* 1997). Un planteamiento realista para reducir los efectos negativos que los fertilizantes nitrogenados tienen sobre el medioambiente, es incrementar su eficacia mediante la optimización de su dosificación.

Durante mucho tiempo las recomendaciones de fertilizantes nitrogenados, se han basado en el contenido en nitrógeno total, la relación C/N o el contenido en materia orgánica del suelo (Geypens *et al.* 1996). En las décadas de los cincuenta y sesenta, innumerables experimentos con diferentes niveles de fertilizantes, fueron realizados a escala regional en diversos países, con objeto de establecer las dosis óptimas para diversos cultivos. Estas recomendaciones fueron refinadas posteriormente, tomando en consideración características específicas de la zona, tales como: el contenido de sustancias húmicas del

suelo, cultivos previos, etc. (Braun, 1980). Posteriormente, en diversos países se desarrolló un sistema consultivo para las recomendaciones de fertilización, basado generalmente en los resultados obtenidos en experimentos anteriores, seleccionando a su vez otros factores, como: cultivo, clima, y condiciones del suelo. Las dosis recomendadas con este sistema, para un determinado cultivo, no varían con el tipo de suelo, potencial productivo o cultivo precedente. Este impreciso procedimiento, todavía se utiliza en muchos países europeos y también en España (Domínguez-Vivancos, 1990).

El análisis de planta o de savia, puede ser muy útil como base para establecer el estado nutricional de nitrógeno en un cultivo, pero no puede ser considerado como sustitutivo de los análisis de suelo para determinar las recomendaciones de fertilización nitrogenada. Esto se debe a que el análisis de savia refleja muy bien el nitrógeno actual absorbido por la planta, pero no la asimilabilidad de nitrógeno del suelo.

MÉTODO DEL NITRÓGENO MINERAL

Russel (1914) fue probablemente el primero que observó que el contenido en nitrógeno mineral del suelo afecta a los requerimientos de fertilizantes nitrogenados por los cultivos. Sin embargo, hasta bien entrados los años setenta, no se llegó a prestar una atención seria a este planteamiento. A partir de entonces, se ha hecho un gran esfuerzo por parte de los investigadores para desarrollar sistemas de recomendación de nitrógeno, basados en el contenido de nitrógeno mineral del suelo.

El NO_3^- y NH_4^+ disueltos en la solución del suelo, puede ser tomado directamente por las raíces de la planta (Mengel 1991). El nitrato, por su elevada movilidad en el suelo,

debido a que no es adsorbido por los coloides y a que sus sales son solubles, se transporta hasta alcanzar los pelos radiculares por mecanismos de flujo de masa ó por difusión. El NH_4^+ presente en la solución del suelo, que se transporta por difusión solamente, se encuentra en equilibrio con el NH_4^+ adsorbido por los coloides del suelo. En suelos bien aireados, la cantidad de NH_4^+ de la solución el suelo es muy baja y puede ser despreciable a la hora de estimar el nitrógeno disponible en el suelo. Sin embargo, en aquellos suelos con abundante illita o vermiculita como componente de la fracción arcilla, el NH_4^+ penetra en sus espacios interlaminares (= específicamente combinado) en cuya forma pueden contabilizarse varios miles de kg N ha^{-1} hasta una profundidad de 1 m. Este NH_4^+ es sólo parcialmente asimilable para los cultivos. Como estos suelos arcillosos, se presentan con relativa frecuencia en regiones aptas para el cultivo, la asimilabilidad del NH_4^+ interlaminar requiere una atención particular, ya que en ocasiones puede ser más importante para la nutrición del cultivo que el NO_3^- presente en primavera.

El procedimiento del nitrógeno mineral (N min), esta basado en la extracción de la muestra de suelo fresco, con objeto de obtener el NO_3^- y el NH_4^+ no específicamente combinado, a la profundidad radicular del suelo, al comienzo de la estación de crecimiento del cultivo (Wehrmann *et al.*, 1979). Como extractante se han propuesto diversas soluciones. Cotte y Kehane (1946) proponen agitar durante una hora 200 g. de suelo fresco con 500 ml de una solución de NaCl 1M. Por su parte, Wehrmann *et al.* (1979) proponen la extracción de muestra de suelo fresco con una solución diluida de NaCl 0.01M y CaCl_2 0.01M. Las muestras de suelo se toman en primavera antes del comienzo del crecimiento de las plantas, a tres profundidades: 0-30 cm., 30-60 cm. y 60-90 cm. Así mismo,

David *et al.* (1981) proponen el empleo de una solución extractora de KCl M con una relación suelo/solución de 1:5 (peso/volumen) y agitación durante 1h. Diferentes ensayos realizados con trigo de invierno, remolacha, patata, etc. demostraron, que las dosis óptimas de fertilización nitrogenada disminuyen a medida que aumenta el contenido en nitrógeno mineral del suelo (Ris *et al.* 1981; Kolenbrander *et al.* 1981). Esta relación negativa se describe con suficiente confianza mediante una recta cuya ecuación sería la siguiente:

$$\text{Nopt} = C - m \cdot \text{Nmin}$$

en la que C se corresponde con la dosis óptima, en kg N ha^{-1} , si no existe nitrógeno mineral en primavera ($\text{Nmin} = 0$). El valor de este factor se determina específicamente para el tipo de cultivo y para las condiciones de crecimiento. Por ejemplo, en caso de sequía, el desarrollo del cultivo puede ser retardado, resultando más bajos los requerimientos, y en consecuencia también las dosis óptimas de N. Por el contrario, un período húmedo podría estimular el crecimiento, y simultáneamente aumentar la lixiviación o la desnitrificación, lo que afectaría a las dosis óptimas de nitrógeno, que serían más elevadas.

El factor m por el cual se multiplica el Nmin depende de la intensidad con la cual el Nmin del perfil del suelo es absorbido por el cultivo. En consecuencia, la densidad radicular y la profundidad pueden afectarle. Es por otra parte, el coeficiente experimental correspondiente a la pendiente (cambiada de signo) de la recta de regresión. Los resultados obtenidos por Kolenbrander *et al.* (1981) para el factor m, se muestran en la tabla 1.

La dosis de fertilizante propuesta por Wehrmann *et al.* (1979) es la diferencia entre el nivel de nitrógeno establecido como necesario y la cantidad de nitrógeno inorgánico

TABLA 1.- Relación entre la dosis económicamente óptima de nitrógeno (Nop) y la cantidad de nitrógeno mineral (Nmin) en el perfil del suelo en marzo, basado en los resultados de experimentos de campo. Kolenbrander *et al.* (1981).

cultivos	cálculo dosis optima N (kg ha ⁻¹) Nop ⁽¹⁾ = C - m Nmin ⁽²⁾	Profundidad de toma de muestra de suelo
trigo de invierno	Nop = 140 - 1.0 Nmin	0-100
remolacha 1	Nop = 260 - 1.4 Nmin	0-100
remolacha 2	Nop = 220 - 1.7 Nmin	0-60
patatas de siembra (s.arcilloso)	Nop = 140 - 0.6 Nmin	0-60
patatas (suelo limoso)	Nop = 330 - 1.5 Nmin	0-60
patatas (suelo arenoso)	Nop = 440 - 2.5 Nmin	0-60

(1) Nop : dosis óptima de nitrógeno;

(2) Nmin: nitrógeno mineral.

hallado en el suelo en la zona radicular. Pero la cantidad de nitrógeno establecida, es algo más baja que la cantidad de nitrógeno absorbida por el cultivo. Por ejemplo, la remolacha absorbe 250 kg N ha⁻¹, pero el nivel establecido es de 200 kg N ha⁻¹, y sobre suelos con elevada mineralización neta, sólo 160 kg N ha⁻¹, lo que muestra que el método del Nmin tiene en consideración el nitrógeno orgánico que se mineraliza durante el período de cultivo, pero no llega a determinarlo.

NITRÓGENO POTENCIALMENTE MINERALIZABLE

A la vista de lo anteriormente comentado, es necesario desarrollar procedimientos que permitan determinar el nitrógeno potencialmente mineralizable, es decir, el nitrógeno orgánico que se mineralizará durante el período de cultivo, que con toda probabilidad interviene en la nutrición de la planta.

En la reposición de nitrógeno para los cultivos, el nitrógeno orgánico que se mineraliza durante el período de cultivo es todavía más importante que el N mineral. En el suelo, tienen lugar procesos de mineralización de nitró-

geno orgánico que están directamente relacionados con la relación C/N. Cuando dicha relación es elevada, como es el caso de la paja, los microorganismos necesitan nitrógeno adicional, cuya asimilación les permite formar sus propias proteínas. Este proceso, origina un descenso temporal en la concentración de NO₃⁻ (inmovilización), lo que demuestra que la relación C/N juega un papel crucial en relación con el nitrógeno orgánico potencialmente asimilable (Appel *et al.* 1990).

Las proteínas y péptidos adsorbidos a los coloides del suelo, constituyen una importante fuente de nitrógeno orgánico fácilmente mineralizable y de acuerdo a diversos autores (Loll *et al.* 1983, Hütsch *et al.* 1990), la fuerza de adsorción de estos compuestos, es de naturaleza electrostática. Por otra parte, la textura del suelo, puede tener alguna influencia sobre los mecanismos que intervienen en la disponibilidad del nitrógeno. Los suelos arenosos, se caracterizan porque en ellos tiene lugar una rápida mineralización del nitrógeno proteico transformándose en nitratos, preferentemente durante los meses de verano, pudiendo ser lixiviado posteriormente con las lluvias de invierno, mientras que en

los suelos arcillosos, este proceso es mucho más lento.

En consecuencia, la medida del nitrógeno potencialmente asimilable previa al cultivo, tiene dos componentes: la fracción de nitrógeno mineral y la de nitrógeno orgánico fácilmente mineralizable. A su vez en este último, habría que considerar dos aspectos: el primero estaría basado en la determinación de los compuestos nitrogenados de bajo peso molecular que son fácilmente mineralizables (aminoácidos, aminas, etc.), como un índice del que se mineralizará durante el desarrollo del cultivo; mientras que el segundo, se refiere a la necesidad de tomar en consideración las condiciones en las que tendrá lugar la mineralización. Algunas de estas condiciones, pueden ser establecidas antes del comienzo del cultivo, tales como: el pH del suelo y la relación C/N, mientras que otras, como las condiciones climáticas, presentan mayor dificultad para poderse establecer con anterioridad. Sin embargo, pueden definirse en gran medida, por el periodo del año en el que tendrá lugar el cultivo (verano ó invierno) ó bien por las condiciones de explotación (aplicación de riegos, etc.).

Entre las técnicas capaces de facilitar información sobre el nitrógeno potencialmente asimilable, citaremos el método de incubación, propuesto por Stanford y Smith (1972), que aunque facilita información acerca de la velocidad de mineralización del nitrógeno en el suelo, sin embargo, los tiempos de incubación necesarios para su ejecución, han contribuido a que se desechara como método de rutina. Además, este método sobreestima la velocidad de mineralización comparado con la que tiene lugar en el campo, debido a que se realiza en condiciones controladas. Sin embargo, otros métodos como la electroultrafiltración (EUF) y el CaCl_2 han alcanzado mayor aplicación, debido a que tienen en consideración además del nitrógeno mineral del suelo, el nitrógeno potencialmente asimilable.

En el método de electroultrafiltración (EUF), desarrollado por Nemeth (1979), una suspensión de suelo en agua es sometida al efecto de un campo eléctrico, en el que los cationes son transportados hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Los iones NO_3^- y NH_4^+ disueltos en la suspensión migran hacia los electrodos. Durante el proceso, las fuerzas del campo eléctrico originan la desorción de iones inorgánicos y orgánicos. De acuerdo al método propuesto por Nemeth (1979), la extracción se lleva a cabo en dos fracciones: la primera de 30 minutos a 20°C y 200 V.; y la segunda de 5 minutos a 80°C y 400 V.

La naturaleza química de los compuestos orgánicos extraídos por EUF, ha sido sólo parcialmente aclarada. Nemeth *et al.* (1988) hallaron que en cinco suelos diferentes, la proporción de nitrógeno proteico presente en los extractos de EUF, estaba comprendida en un rango entre el 24 y el 46 % del nitrógeno orgánico total extraído, siendo el resto, compuestos orgánicos de bajo peso molecular cuya composición no es del todo conocida.

Por otra parte, han sido halladas correlaciones significativas entre el N mineralizable del suelo, determinado por test de incubación y el nitrógeno orgánico extraído por EUF (Kohl *et al.* 1986). No obstante los coeficientes de correlación obtenidos, no fueron demasiado elevados, debido a que el nitrógeno mineralizado por incubación está sobreestimado. Así mismo, una elevada correlación fue obtenida entre el EUF-Norg y el nitrógeno absorbido por ryegrass (Appel *et al.* 1988). También Appel *et al.* (1990) hallaron una correlación significativa entre el EUF-Norg y el nitrógeno orgánico mineralizado bajo un cultivo de colza en tiestos. Wikilicky *et al.* (1983) por su parte, hallaron en numerosos campos cultivados con remolacha, que la respuesta a los fertilizantes nitrogenados fue menor cuanto más elevados fueron los contenidos de EUF-N (nitrógeno orgánico + NH_4^+ + NO_3^-) en el suelo. Tales relaciones, demuestran que el método de EUF constituye

una buena herramienta para medir el nitrógeno disponible del suelo. Sin embargo, debemos apuntar que estos resultados no han sido obtenidos en todos los casos. Werner *et al.* (1988) destacan, que la cantidad de nitrógeno realmente mineralizado durante el periodo de crecimiento, depende en gran medida de las condiciones climáticas, y bajo condiciones óptimas, puede ser mucho más elevada que la cantidad evaluada mediante el parámetro EUF-Norg.

Las recomendaciones de fertilizantes nitrogenados mediante la técnica de EUF, están basadas en el análisis de la capa arable de suelo desecado a 40°C y tamizado a 1 mm., en muestras tomadas en verano u otoño precedentes al cultivo que se desea fertilizar. Mediante esta técnica, se determinan el nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+) y el nitrógeno orgánico soluble (compuestos orgánicos nitrogenados de bajo peso molecular). Los resultados anteriormente comentados, han permitido establecer la hipótesis de que el nitrógeno obtenido por EUF constituye un índice del N asimilable del suelo ya que permite obtener una buena estimación del nitrógeno orgánico lábil, que previsiblemente será mineralizado durante el próximo período de cultivo (Nemeth *et al.* 1982).

Si bien el parámetro de nitrógeno orgánico obtenido por EUF, representa un gran interés para evaluar el nitrógeno potencialmente asimilable, sin embargo la principal crítica que este método ha recibido, es que las cantidades de nitrógeno orgánico realmente mineralizado durante el período de cultivo, dependen fundamentalmente de las condiciones climáticas (humedad y temperatura) imperantes durante este periodo, mientras que el EUF-Norg obtenido en el laboratorio, obviamente no tiene en cuenta dichas condiciones.

MÉTODO DEL CaCl_2 .

Debido al elevado coste que representa en la actualidad un equipo de EUF, se está

investigando en torno a otros métodos alternativos, que permitan obtener información sobre el nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+) y nitrógeno orgánico del suelo. Para ello se utiliza una solución extractora de CaCl_2 0,01 M (Appel *et al.* 1990) cuyo procedimiento detallado se encuentra recogido en la norma UNE 77306.

Los contenidos de NO_3^- y NH_4^+ extraídos con dicha solución, son virtualmente idénticos a los obtenidos en los extractos de EUF (Mengel 1991). Sin embargo, el nitrógeno orgánico obtenido, es cuantitativamente más bajo (Appel *et al.* 1988). El nitrógeno orgánico obtenido con CaCl_2 ha correlacionado significativamente con el nitrógeno absorbido por planta (Appel *et al.* 1989). Sin embargo, este procedimiento necesita de investigaciones futuras, con objeto de establecer la equivalencia entre los datos de laboratorio y las dosis de fertilizante en el campo.

En contraste con el método del nitrógeno mineral, que utiliza muestras de suelo frescas, las muestras utilizadas para el método de CaCl_2 se desecan a 40°C al igual que con la técnica de EUF. Esta desecación tiene un impacto sobre las concentraciones de NH_4^+ y nitrógeno orgánico que se ven ligeramente incrementadas sobre los valores que muestra el suelo húmedo.

ESTIMACIÓN DEL NITRÓGENO DISPONIBLE POR EUF.

El objetivo de los métodos de análisis de suelo para evaluar el nitrógeno disponible, es conocer las reservas de nitrógeno en el suelo, de modo que se establezca su asimilabilidad de la forma más precisa posible.

El método del nitrógeno mineral (NO_3^- y NH_4^+), facilita información del nitrógeno disponible en el momento del muestreo, solamente. Sin embargo, el problema que presenta mayor dificultad, es la estimación de la cantidad de nitrógeno orgánico que se mineralizará en el suelo desde el momento de la

toma de muestra de suelo hasta la finalización del ciclo de cultivo. El nitrógeno disponible, representa la cantidad de nitrógeno mineral asimilable para el sistema radicular de la planta, más el que se producirá a lo largo del período de cultivo.

En el procedimiento de EUF se han efectuado diversas calibraciones con objeto de calcular las dosis de fertilizante nitrogenado, en base a los datos de EUF-N. La primera estimación se hizo por Wiklicky y Nemeth (1981) de acuerdo a la ecuación:

$$N_{\text{disponible}} = 30 \cdot (\text{EUF-NO}_3^-) + 50 \cdot (\text{EUF-Norg}) \quad [1]$$

con la cual se han obtenido resultados altamente positivos, sobre todo si se tiene en cuenta que las diferentes calibraciones del parámetro b, fueron realizadas preferentemente en Alemania y Austria para el cultivo de remolacha (ver tabla 2) en suelos de loess con una climatología característica de Centro Europa. En dicha ecuación, el nitrógeno disponible se expresa en kg N ha⁻¹ y los valores de EUF obtenidos, en mg N 100g⁻¹ de suelo. De acuerdo a los autores, sus principales ventajas radican en que las muestras de suelo se

toman de la capa arable (30 cm.) en el verano u otoño precedente al cultivo que se va a fertilizar. Esto representa una ventaja, debido a que hay tiempo suficiente para realizar el muestreo y los análisis de suelo y facilitar a los agricultores las recomendaciones de abonado con suficiente antelación.

Sánchez y Díez (1998) han hecho una revisión de la ecuación [1] asignando diversos valores a sus coeficientes en base a una ecuación general:

$$N_{\text{disponible}} = a \cdot (\text{EUF-NO}_3^-) + b \cdot (\text{EUF-Norg}) \quad [2]$$

donde $a = 30 \cdot r$ que corresponde a la transformación de mg N-NO₃⁻ 100 g⁻¹ de suelo a kg N-NO₃⁻ ha⁻¹, en la capa de suelo de 30 cm. (r es la densidad aparente del suelo)

Los valores de b se han calculado en base al nitrógeno mineralizado en el suelo, obtenido mediante balance de nitrógeno (Sanchez y Diez 1998) para cada cultivo y para cada dosis de riego:

$$b = \frac{N_{\text{mineralizado}}}{\text{EUF-Norg}}$$

TABLA 2: Calibración del coeficiente b mediante balances de N en relación a EUF-Norg. (Sanchez y Diez, 1998)

		Nmin ⁽¹⁾	EUF-Norg ⁽²⁾	b
maíz 93	Riego convencional	201,41	1,82	110,66
	Riego optimizado	168,45	1,91	88,19
trigo 94	Riego convencional	57,98	2,18	26,56
	Riego optimizado	75,75	1,96	38,65
maíz 95	Riego convencional	210,42	2,59	81,14
	Riego optimizado	166,98	2,37	70,36

(1) N mineralizado durante el cultivo, calculado por balance.

(2) N org. correspondiente a muestras de suelo tomadas inmediatamente antes del comienzo del cultivo.

En base a estos resultados (Tabla 2), establecieron dos diferentes valores para el parámetro b de la formula [2], uno para el maíz (cultivo de primavera-verano con irrigación) y otro para el trigo (cultivo de invierno-secano) de acuerdo a ambos ciclos. A pesar de haber experimentado con dos dosis de riego diferentes (convencional y optimizado), sin

embargo sólo se estableció un valor para el maíz, ya que no hubo diferencias significativas en el nitrógeno mineralizado con ambas dosis de riego, ni tampoco sobre el factor b . Estableciendo finalmente unos valores medios para b de 87 para maíz irrigado y de 32 para el trigo de invierno en secano.

TABLA 3: Valores de b obtenidos por diferentes autores, para diferentes cultivos.

Autor	Cultivo	Suelo	Ubicación	Riego	Periodo	b
Wiklicky et al (1981)	remolacha	loess	Austria	no	primavera	50
Sánchez & Díez (1998)	maíz	aluvial	España	si	primavera-verano	87
Sánchez & Díez (1998)	trigo invierno	aluvial	España	no	invierno	32
Horn (1990)	maíz	loess	Alemania	no	-	47
Steffens et al (1990)	trigo invierno	-	-	no	-	45

En la tabla 3 se muestran los valores para el parámetro b , obtenidos por varios autores en diversas condiciones y para varios cultivos. Estos resultados, parecen coherentes con las condiciones climáticas donde se realizó la experimentación. En España donde el cultivo de maíz tiene lugar durante el verano con temperaturas elevadas y alta humedad debida al riego y el trigo en inviernos secos y fríos. En contraste, el cultivo de remolacha y maíz en Europa Central se realiza también en verano con temperaturas mas suaves y sin irrigación artificial. Sin embargo, destaca significativamente, el elevado valor obtenido por Sanchez y Diez (1998) para el maíz en verano cultivado en regadío en España, lo que por otra parte parece lógico, teniendo en cuenta las elevadas condiciones de temperatura y humedad predominantes en estas condiciones. También debemos destacar el bajo valor

obtenido para el trigo cultivado en secano y en invierno ($b=32$), especialmente si le comparamos con el obtenido por Steffens *et al* (1990) de $b=47$ para el trigo de invierno, que es apreciablemente mas elevado que los valores obtenidos en España, cuyas diferencias se explican probablemente, porque las condiciones de humedad centroeuropeas son mas elevadas.

CÁLCULO DE LA DOSIS DE FERTILIZANTE.

Una vez que se ha determinado el nitrógeno disponible del suelo, el cálculo de la dosis de fertilizante, se basa en aportar el nitrógeno necesario para complementar el nitrógeno disponible del suelo, de modo que se alcance el nitrógeno que previsiblemente exportará el cultivo. El valor de nitrógeno

necesario para el cultivo o el nitrógeno exportado, dependerá de la producción esperada, la cual es necesario estimar en el momento de calcular las dosis de fertilizante (ejemplo, cada tonelada de grano de trigo se necesitan 30 kg de N ha⁻¹). En ocasiones puede aparecer una severa desviación entre las recomendaciones de abonado basadas en EUF y las dosis óptimas de nitrógeno, especialmente cuando los suelos presentan elevados contenidos de NO₃⁻ en las capas más profundas del suelo, debido a que las muestras de suelo para EUF se toman de la capa arable.

$$\text{Nfertilizante} = \frac{\text{Nexportado por el cultivo} - \text{Ndisponible}}{0,7 \text{ (70 \% de eficacia del fertilizante)}} \quad [3]$$

El cálculo anteriormente comentado, deberá ser corregido por un factor que se corresponde con la eficacia del fertilizante, el cual es variable dependiendo de las necesidades de nitrógeno del suelo, pero en general se establece en un valor del 70%, el cual tiende a aumentar a medida que desciende la dosis de N aportado al suelo. La fórmula final corresponde a la ecuación [3].

MOMENTO DE TOMA DE MUESTRA.

Como han demostrado diversos autores (Nemeth et al. 1985; Díez et al. 1997), la materia orgánica del suelo experimenta importantes cambios a lo largo del año como consecuencia de la mineralización, dependiendo de las condiciones climáticas, lo que afecta a la predominancia de unos compuestos nitrogenados sobre otros. El trabajo de Nemeth et al. (1985) realizado en Alemania, revela simultáneamente un incremento de NO₃⁻ y un descenso de Norg en verano, cuyos valores se invierten en invierno. El trabajo de Díez et al. (1997) en el centro de España, cuyos experimentos se han realizado sobre suelo desnudo irrigado en verano, muestra un incremento de Norg al comienzo

de primavera al cual sigue un aumento de NO₃⁻ en verano, mientras ambas formas de nitrógeno descienden en invierno, como consecuencia de las pérdidas por lixiviación originadas por las lluvias de invierno.

En consecuencia, si las muestras de suelo se toman varios meses antes del comienzo del cultivo, como proponen Wiklicky et al. (1981) para Europa Central, se puede cometer un importante error no imputable a la metodología, el cual estaría originado por los cambios que experimentan en el suelo los compuestos nitrogenados y por las pérdidas de nitrógeno por lixiviación ó desnitrificación, que pueden haber acontecido durante el periodo transcurrido entre la toma de muestra de suelo y el comienzo del cultivo.

Dado que el nitrógeno disponible es esencialmente una estimación del nitrógeno mineral inmediatamente asimilable y del nitrógeno orgánico mineralizado, lo más adecuado es que se reduzca al máximo el tiempo transcurrido entre la toma de muestra del suelo y el comienzo del ciclo de cultivo, y si es posible, que aquella se realice inmediatamente antes de la siembra.

TIPO DE FERTILIZANTE Y DOSIS DE RIEGO.

No parece suficiente, con establecer la dosis óptima de nitrógeno, sino que se deben tener en cuenta otros factores que pueden afectar muy directamente a la eficacia del fertilizante aplicado, como son la dosis de riego (en los cultivos irrigados) y la elección del tipo de fertilizante nitrogenado.

En un experimento de cuatro años en un suelo franco-arenoso del centro de España, con una rotación maíz-trigo-maíz-avena (maíz irrigado), en el que probaron varios fertilizantes nitrogenados, con riego optimizado comparado con riego convencional (pérdidas del 20% de agua por drenaje), Díez et al. (1997 y 1999), demuestran que la dosis de riego y el tipo de fertilizante nitrogenado,

afectan directamente a la lixiviación de nitratos. El riego optimizado, consistente en compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración (sin drenaje), originó durante el periodo experimental, una reducción de las pérdidas de NO_3^- por lixiviación a la tercera parte de la producida con riego convencional. En lo que respecta a los fertilizantes, con riego convencional y dosis de nitrógeno moderadas (150 kg ha^{-1} en maíz y 100 kg ha^{-1} en trigo), urea e IBDU (isobutilendidiurea) originaron pérdidas de nitrato por lixiviación del 44 y 32% del nitrógeno aplicado, respectivamente. Con el riego optimizado, las pérdidas se redujeron al 10 y 3 % para urea y IBDU, respectivamente. El compost de RSU, por su parte, mostró importantes cualidades para la fertilización nitrogenada, debido a que se comporta como un fertilizante de liberación controlada, ya que con el riego optimizado, la lixiviación de nitratos se redujo a valores similares a las del testigo sin fertilizar. Tanto la dosis de riego como el tipo de fertilizante, no mostraron diferencias significativas en las producciones de grano.

CONCLUSIONES

Es importante aprovechar al máximo el nitrógeno residual del suelo, para lo que es preciso disponer de procedimientos que permitan evaluar con la mayor precisión posible, los contenidos de nitrógeno disponible en el suelo. De los métodos de evaluación del nitrógeno en el suelo, discutidos en este trabajo, los que muestran mejores perspectivas de futuro, son aquellos que permiten evaluar el nitrógeno potencialmente asimilable, como una fracción importante del nitrógeno total disponible (EUF y CaCl_2).

Para su utilización a efectos prácticos, es necesario que estos métodos sean adecuadamente calibrados (establecimiento de la equivalencia entre datos de laboratorio y dosis en campo) mediante balances de nitrógeno, para una zona climática y tipo de cultivo, con lo

que se pueden corregir las limitaciones atribuidas por algunos investigadores al método EUF.

A la vista de los resultados mostrados por diversos autores, en relación a la evaluación del nitrógeno potencialmente mineralizable a través de la calibración del parámetro b, los factores que presentan mayor influencia sobre el mismo son: la época del año en que tiene lugar el ciclo de cultivo (verano; invierno) y la aplicación de riego artificial. En el caso de cultivos de regadío, en general más exigentes en nitrógeno, las dosis de riego deben estar ajustadas a la evapotranspiración (riego optimizado), lo que presenta una importante reducción de las pérdidas de nitrato por lixiviación.

En lo que respecta al momento para efectuar la toma de muestra de suelo para su análisis, el más adecuado sería el más próximo a la siembra del cultivo a fertilizar.

Los fertilizantes nitrogenados de liberación controlada (CDU, IBDU) junto con el compost de RSU combinado con el riego optimizado, presentan mayores ventajas en relación a los fertilizantes solubles (urea, nitrato amónico), ya que su periodo de actuación es más largo y se acomodan mejor a la fase de máxima absorción del cultivo y reducen apreciablemente las pérdidas de nitrato por lixiviación.

Las conclusiones extraídas en el presente trabajo en relación a las características del suelo, son aplicables especialmente a suelos con $\text{pH} \geq 6,5$ y relación C/N baja (12-14), ya que en otras condiciones, es precisa una experimentación.

REFERENCIAS

- Appel C., Steffens D. (1988). Vergleich von Elektroultrafiltration (EUF) und Extraktion mit $0,01 \text{ M CaCl}_2$ - Lösung zur Bestimmung des Pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Boden. *Z. Pflanzenernähr Bodenk* 151, 127-130.

- Appel T., Mengel K. (1989) Untersuchung der N Dynamik von Sandböden in Feldversuchen mit Getreide mittels EUF- und CaCl_2 Methode. Presentation of the VDLUFA Congress Beyreuth.
- Appel T., Mengel K. (1990). Importance of organic nitrogen fractions in sandy soils, obtained by electroultrafiltration or CaCl_2 , for nitrogen mineralization and nitrogen uptake of rape. *Biol. Fert. Soils* 10, 97-101.
- Braun H. (1980). Die stickstoffdüngung des Getreides. DLG-Verlag, Frankfurt/M, Germany.
- Cotte J., Kahane E. (1946). Sur une nouvelle methode de la reduction pour le dosage des nitrates. *Bull. Sol. Chim. Fr.* 542-544.
- Díez J. A., Caballero R., Román R., Sánchez L. (1997) Seasonal variations of organic-N mineralization in irrigation bare land soils under a continental mediterranean environment. In Proc. Int. Symp. Fertilization and environment. Technion-Israel Inst. of Technology: Haifa. p 407-414.
- Díez J. A., Román R., Caballero R., Caballero A. (1997). Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence, two irrigation schedules and three types of fertilizers. *Agric. Ecos. Environ.* 65, 189-199.
- Díez J. A., Caballero R., Román R., Tarquis A., Cartagena M.c., Vallejo, A. (1999). Integrated fertilizar and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *J. Environ. Qual.* (in press).
- Domínguez Vivancos A. (1990). El abonado de los cultivos. Mundi- Prensa, Madrid.
- Geypens M., Vandendriessche H. (1996). Advisory systems for nitrogen fertilizer recommendations. *Plant Soil* 181, 31-38.
- Horn D. (1990). Die Erstellung eines Stickstoffdüngungs-modells für Mais auf der Basis von Feldversuchen und der Elektroultrafiltrations-methode. P.h D. Thesis. FB 17 Justus Liebig-Universität-Giessen.
- Hüstch B, Mengel K. (1990) Effect of tillage practice on nitrogen dynamics in soils. Poster presentation at the International Symposium on "Nitrogen metabolism in Plants". Giessen.
- Kohl A. Werner W. (1986). Untersuchungen und zur saisonalen veränderung der EUF-fraktionen und zur charakterisierung des leicht mobilisierbaren. Bodenstickstoffs durch Elektroultrafiltration (EUF). VDLUFA-Schriftenreihe 20, 333-341.
- Kolenbrander G. J., Neeteson J.J., Wijnen G. (1981). Investigation in the Netherlands of optimun nitrogen fertilization on the basis of the amount of Nmin in the soil profile. *Pedologie* 31, 365-377.
- Loll M.J., Bollag J.M. (1983). Protein transformation in soil. *Adv. Agron.* 36, 351-382.
- Mengel K. (1991). Available nitrogen in soils and its determination by the Nmin method and by electroultrafiltration (EUF). *Fert. Res.* 28, 251-262.
- Nemeth K. (1979) The availability of nutrients in the soil as determined by electroultrafiltration (EUF) *Adv. Agron.* 31. 155-188.
- Nemeth K., Wiklicky L. (1982). Bestimmung pflazenverfügbarer Stickstoff-fraktionen im Bodem und Beurteilung des Stickstoff-Düngebedarfs für die Zuckerrübe mit EUF. *Zuckerindustrie* 107, 558-5562.
- Nemeth K., Fürstenfeld F. (1985) Changes of EUF-N and EUF-K fractions in three deep grey -brown luvisols during 18 months under fallow. *Plant Soil* 86. 249-256.
- Nemeth K., Bartels R., Vogel M., Mengel K. (1988). Organic nitrogen compounds extracted from arable and forest soils by electroultrafiltration and recovery rates

- of amino-acids. *Biol. Fertil. Soils*. 5, 271-275.
- Norma UNE 77306. Determinación de nitrógeno nítrico, nitrógeno amoniacal y nitrógeno soluble total en suelos secados al aire utilizando cloruro de calcio como disolución extractora.
- Ris J., Smilde K.W., Wijnen G. (1981). Nitrogen fertilizer recommendations for arable crops as based on soil analysis. *Fert. Res.* 2, 21-32.
- Russel E.J. (1914) The nature of amount of the fluctuation in nitrate contents of arable soils. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 6, 18-57.
- Sánchez L., Díez J.A., Vallejo A., Cartagena M.C., Polo A. (1998). Estimate of mineralized organic nitrogen in soils using nitrogen balances and determining available nitrogen by the electroultrafiltration technique. Application to Mediterranean Climate soils. *J. Agr. Food Chem.* 46, 2036-2043.
- Stanford G., Smith S.J. (1972) Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci Soc. Amer Proc.* 36, 465-472.
- Steffens D., Barezai A., Bohring J., Poos F. (1990). Die EUF-löslichen Stickstoffgehalte in Ackerböden des Landkreises Giessen. *Agrobiol. Res.* 43, 319-329.
- Steinhauser H. (1987). Economic aspects. In *Fertilizers*. Vol. A 10, p. 411-414. Ullmann's Encycl. Industrial Chemistry VHC. Verlagsgesellschaft. D6940 Weinheim.
- Wehrmann J., Scharpf H.C. (1979). Der mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf (Nmin - methode). *Plant Soil* 52, 109-126.
- Werner W, Kohl A. (1988) Mehrjährige Erfahrungen mit Prognosemethoden des Stickstoffdüngerbedarfs zu Zuckerrüben im Rheinland. EUF Symposium 1988 "Klostensenkung und Umweltschutz" vol 2: 649-661.
- Wiklicky L., Nemeth K. (1981). Düngungsoptimierung mittels EUF-Bodenuntersuchung bei der Zuckerrübe. *Sonderdruck aus Band* 106, 982-998.
- Wiklicky L., Nemeth K., Recke H. (1983). Beurteilung des Stickstoff-Düngebedarfs für die Zuckerrübe mittels EUF. Symposium "Stickstoff und Zuckerrübe". Int. Institut für Zuckerrübenforschung. Brüssel (ed), p 533-543.