

RECUPERACIÓN DEL ¹⁵N-UREA APLICADO A LA SIEMBRA O AL MACOLLAJE EN TRIGO EN UN SUELO SOMERO

C VIDELA^{(1)#}, H ECHEVERRÍA⁽¹⁾, S LÓPEZ⁽²⁾, M MELAJ⁽²⁾, N BÁRBARO⁽²⁾

⁽¹⁾ Unidad Integrada INTA-UNMdP Balcarce CC 276 (7620) Balcarce. Argentina. e_mail: cvidela@balcarce.inta.gov.ar ⁽²⁾ Comisión Nacional Energía Atómica. Av. del Libertador 8250 (1429) Buenos Aires, Argentina.

Recibido 21 de abril de 2004, aceptado 23 de diciembre de 2004

THE FATE OF LABELLED ¹⁵N UREA APPLIED AT SOWING OR TILLERING OF A WHEAT CROP IN A SHALLOW SOIL

Fertilization at sowing or tillering is used to improve the efficiency of fertilizer nitrogen. The ¹⁵N enriched fertilizers help to accurately follow the fate of N from fertilizers and to find out the utilisation efficiency by plants. A field experiment was conducted to investigate the dynamic of urea applied (labelled ¹⁵N-urea) at sowing or at tillering to a wheat crop. Aboveground plant N and organic and mineral soil N were analyzed on tillering, stem extension, flowering and physiological maturity. The treatments included 80 kg ha⁻¹ urea-N at sowing (80S), 80 kg ha⁻¹ urea-N at tillering (80T) and no N (0N). Grain production was 2130, 3740 and 3970 kg ha⁻¹ for 0N, 80S and 80T treatments, respectively. There were significant differences between fertilized and 0N treatments (p<0.001). The proportion of plant-N derived from fertilizer had a decreasing trend toward the end of the growing cycle while total N did not decline, suggesting that plants lost labeled N from aerial parts and they simultaneously took non labeled N from the soil. High NO₃⁻-N accumulation in soil was not found after fertilizations probably due to a fast uptake by plants sustained by high water contents at these samplings time. There was an important N immobilization from fertilizer N in the organic pool for 80S (30 kg Ndff ha⁻¹) and 80T (43 kg Ndff ha⁻¹) treatments and a subsequent drop, in synchrony with the take-off in the plant-N accumulation rate.

Key words: Nitrogen recovery, wheat crop, labelled ¹⁵N urea, inorganic-N, organic-N.

INTRODUCCION

Los suelos agrícolas del Sudeste de la provincia de Buenos Aires poseen niveles elevados de materia orgánica, no obstante lo cual, el rendimiento de cultivos de trigo aumenta cuando se fertilizan con nitrógeno (Gonzalez Montaner *et al.* 1997, Calviño *et al.* 2002), posiblemente debido a que una gran proporción de la materia orgánica se encuentra en fracciones muy estables (Studdert *et al.* 1997), las que presentan tasas de mineralización muy lentas. Esta última situación se ha agravado con la intensificación de la agricultura sin inclusión de pasturas en las rotaciones, por lo cual se ha generalizado la práctica de la fertilización nitrogenada. Un uso eficiente de la fertilización es importante desde el punto de vista económico como del ambiental, ya que se han informado niveles elevados de nitrato en aguas subterráneas provenientes de áreas donde se cultivó maíz con aplicaciones excesivas de nitrógeno (Costa *et al.* 2002). A

fin de lograr una eficiente utilización del nitrógeno es necesario tener una adecuada comprensión y conocimiento de los procesos de pérdidas, ganancias y transformaciones involucrados en el ciclo de este nutriente en el sistema suelo-planta.

La aplicación de fertilizantes a la siembra o al macollaje es una práctica de manejo normalmente usada por los agricultores para mejorar la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUN) (Wuest, Cassman 1992). El momento de aplicación del nitrógeno puede ser una estrategia adecuada para asegurar su disponibilidad en el momento en que los cultivos lo necesitan o cuando el agua esté disponible para mejorar su consumo. Es posible obtener mayor producción de granos y elevada EUN (kg grano kg⁻¹ aplicado) cuando se realizan fertilizaciones retrasadas (Videla *et al.* 1996). Este efecto es mayor en años con alto suministro de agua, cuando el período crítico para las plantas coincide con adecuada

disponibilidad de nitrógeno. Otros investigadores han mostrado que fertilizaciones a la siembra o divididas (siembra y macollaje) resultaron en EUN iguales o mayores que fertilizaciones al macollaje (García *et al.* 1998), y estaría asociado a años con limitada disponibilidad de agua. El efecto aparentemente contradictorio del momento de fertilización sobre la EUN enfatiza la necesidad de estudiar la distribución del nitrógeno del fertilizante en las diferentes fracciones del suelo, las que determinan su disponibilidad para las plantas.

Videla *et al.* (1996) encontraron que aunque las fracciones de nitrógeno mineral no presentaron grandes variaciones entre macollaje y atesis, el consumo de nitrógeno por plantas de trigo incrementó a medida que el nitrógeno en la biomasa microbiana disminuía. La información disponible actualmente para esta región a cerca de los procesos de hidrólisis de urea, dinámica de las fracciones minerales, inmovilización del N-urea en la biomasa microbiana (Ferrari *et al.* 1997), pérdidas por volatilización de amoníaco (Videla 1994) y desnitrificación (Picone, Videla 1998) fueron estimados indirectamente usando el método de la diferencia (tratamiento fertilizado menos testigo). El uso de fertilizantes enriquecidos con el isótopo ^{15}N ayuda a mejorar la comprensión de los procesos del ciclo del nitrógeno y a seguir el destino del nitrógeno del fertilizante. La ecuación del nitrógeno derivado del fertilizante (Nddf) (Hauck, Bremner 1976) puede usarse para estimar la recuperación del fertilizante marcado con ^{15}N en la planta, en las fracciones de nitrógeno mineral, en la materia orgánica del suelo y eventualmente, en los gases liberados desde la superficie del suelo.

Cuando se aplicó urea enriquecida con ^{15}N a la siembra del trigo en varias localidades de la Región Pampeana, la EUN presentó una tendencia a aumentar desde el oeste al este, con valores entre 19,7 y 61,2%. En particular, para suelos de Balcarce, la EUN fue de 52,6% (Echeverría, Videla 1998). Existe poca información a cerca de EUN directa para fertilizaciones al macollaje de cultivos de trigo para el área del SE bonaerense.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) medir y comparar la recuperación del

nitrógeno del fertilizante en el cultivo de trigo fertilizado a la siembra o al macollaje y b) hacer un seguimiento en la parte aérea del cultivo y en las fracciones inorgánicas y orgánicas del suelo de los destinos del ^{15}N del fertilizante aplicado.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio y diseño experimental

El experimento fue conducido en el campo experimental de la EEA Balcarce del INTA (37° 45' S, 58° 18' W, 130 m snm, 870 mm de precipitación media anual, 13.7°C de temperatura media anual), Buenos Aires, Argentina, durante la estación de crecimiento de 1997. El campo experimental estuvo bajo rotaciones agrícolas los últimos veinte años y el cultivo previo al ensayo fue maíz. El tipo de suelo es un Paleudol Petrocálcico, con pH superficial 5,7 (suelo: agua 1:2,5), textura franca, contenido de carbono orgánico 33,06 g kg⁻¹, y fósforo disponible 12 mg kg⁻¹ (Bray, Kurtz I). La profundidad efectiva del suelo en el sitio experimental es de 40 cm, debido a una capa de tosca (carbonato de calcio), la cual representa una seria restricción al movimiento de agua y al desarrollo de raíces.

El diseño experimental fue bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. Los tratamientos de fertilización fueron: 80 kg ha⁻¹ como urea a la siembra (80S), 80 kg ha⁻¹ como urea a la mitad del macollaje (80M) y un testigo sin fertilizar (0N). El tamaño de las parcelas fue de 3m x 15m. El trigo (*Triticum aestivum* L., cv. ProINTA Federal) fue sembrado el 18 de julio de 1997 con una densidad de 300 semillas m⁻² usando un sistema de preparación del suelo convencional (arado de reja, rastra de discos y de dientes). Toda el área experimental se fertilizó con 20 kg ha⁻¹ de fósforo (0-46-0) a la siembra. Dentro de las parcelas fertilizadas, se instalaron microparcels de cuatro líneas de 3,5 m de largo, con 17 cm de espaciamiento entre líneas (1,785 m²) para la aplicación de urea enriquecida con ^{15}N . Se utilizó urea con un enriquecimiento de 4,953 % átomos de ^{15}N en exceso.

Análisis de suelo y planta

Se midió la producción de material seca (MS), N-total y ^{15}N sobre muestras tomadas al macollaje (9 de septiembre), elongación de pseudotallos (24 de octubre), floración (11 de noviembre) y madurez fisiológica (12 de diciembre), cortando a nivel del suelo todas las plantas a lo largo de 0,50 m de las dos filas centrales de cada microparcels. Se dejaron 0,25 m entre muestreos. Para los muestreos de elongación de pseudotallos y floración, las plantas fueron separadas en paja y espigas y, para el muestreo de madurez fisiológica, en hojas más tallos, broza (raquis más glumas y

aristas) y granos. El rendimiento en grano fue determinado cosechando un área de 2 m² en la parcela principal. Todas las muestras fueron secadas a estufa a 60°C, pesadas, cortadas y molidas (1 mm). La concentración de N-total fue determinada por Kjeldhal en 0,5 g de muestra desecada a 60° en estufa y molidas; la relación isotópica fue analizada con un espectrómetro de emisión óptica NOI 6PC (Fisher Analisen Instrumente GmbH).

Las muestras de suelo fueron extraídas con un muestreador de 3-cm de diámetro en las microparcels a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm. Para cada muestreo, se tomaron 15 submuestras en el mismo momento y lugar en que se habían tomado las muestras de plantas. El contenido de agua fue determinado gravimétricamente en cada muestreo. El balance de agua del suelo se estimó usando un modelo simple que asume al suelo como un reservorio y en el cual el contenido de agua varía entre los límites inferior y superior, utilizando los coeficientes del cultivo de trigo (Della Maggiora *et al.*, 2003). Para la determinación del N-inorgánico, las muestras de suelo fueron tamizadas por 4 mm, 50 g de suelo húmedo fueron extraídas con 1M KCl (200 mL), agitadas 30 min y centrifugadas a 10.000 rpm durante 3 min. Los extractos centrifugados fueron congelados hasta su análisis. El contenido de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ de los extractos fue determinado por destilación por arrastre de vapor en presencia de MgO y aleación Devarda (Bremner 1965a). La contaminación cruzada fue prevenida destilando 25 mL etanol entre muestras y permitiendo el pasaje

de la corriente de vapor a través del destilador con el refrigerante cerrado (Pruden 1985). Otra alícuota del extracto fue concentrada para los análisis de ¹⁵N-NH₄⁺, colocando 50 mL del extracto en recipientes plásticos de 125 mL, agregando MgO y permitiendo la microdifusión durante seis días (Brooks *et al.* 1989). El amoníaco producido por este procedimiento fue atrapado en pequeños discos de microfibras de vidrio de 0,5 cm de diámetro (Wathman GF/D) acidificados con 10 µL de 2,5M KHSO₄ ubicados con un gancho de acero ubicado en la tapa del recipiente. Para los análisis de ¹⁵N-NO₃⁻, el recipiente se dejó abierto 24 h después de la difusión del ¹⁵N-NH₄⁺ y posteriormente se colocó un nuevo disco de microfibras y se dejó otros seis días para la difusión del nitrógeno que inicialmente estaba como NO₃⁻. Los análisis de ¹⁵N de los discos de difusión fueron realizados con un espectrómetro de masas de relación isotópica (IRMS) Optima Micromass System (Micromass UK, Wythenshaw) conectado a un analizador de C-N por combustión Carlo Erba Strumentazione 1500 (Milan, Italy).

El contenido de nitrógeno orgánico soluble del mismo extracto el KCl fue determinado realizando una digestión microKjeldahl (Bremner 1965b). Este extracto mineralizado fue destilado en presencia de NaOH evitando la contaminación cruzada y se determinó ¹⁵N en igual forma como se describió para el nitrógeno inorgánico. Los valores resultantes de nitrógeno orgánico soluble derivado del fertilizante fueron muy bajos, por lo que se decidió sumarlos a los datos de nitrógeno orgánico

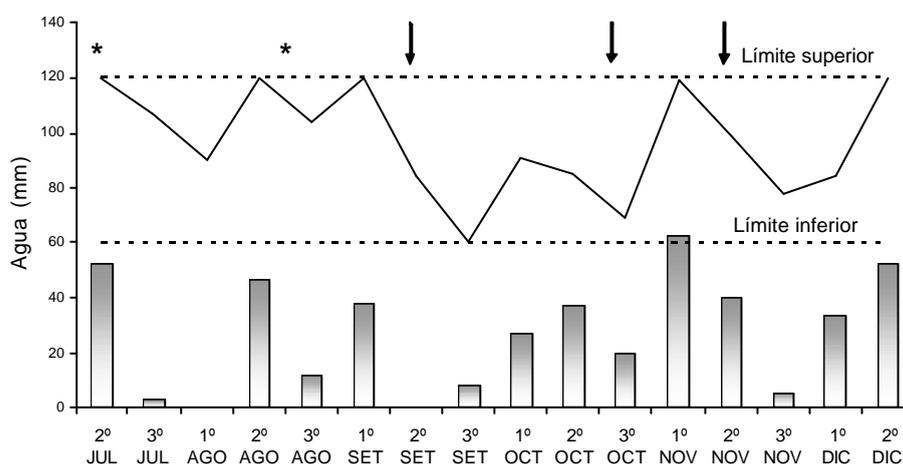


Figura 1. Precipitaciones (en columnas) y acumulación de agua en el suelo (línea continua) en la estación de crecimiento del trigo durante 1997 en Balcarce-Argentina. Líneas punteadas indican el agua disponible para las plantas, los asteriscos indican las fechas de fertilización y las flechas, los muestreos de macollaje, extensión de pseudotallos, floración y madurez fisiológica.

Figure 1. Precipitations (columns) and soil water accumulation (continue line) at wheat crop grown during 1997 in Balcarce-Argentina. Dot lines show the plant available water, stars shows fertilization dates and arrows shows tillering, stem elongation, flowering and physiological maturity samplings moment.

del suelo.

El contenido de nitrógeno orgánico del suelo fue determinado sobre el suelo extraído con KCl, el que fue lavado con KCl, luego secado a 60°C y molido. Posteriormente se realizó una digestión Kjeldahl, se destiló y se determinó el ^{15}N en igual forma que para el resto de las muestras de suelo.

Se utilizó la ecuación de Hauck, Bremner (1976) para el cálculo del porcentaje de nitrógeno derivado del fertilizante:

$$\text{Ndff (\%)} = 100 \left(\frac{a' \text{ fracción}}{a' \text{ fertilizante}} \right)$$

(Ecuación 1)

Donde

a' fracción = Exceso de átomos de ^{15}N en la fracción de proveniente de la microparcela fertilizada (N-planta, nitrógeno orgánico del suelo, N-nitrato del suelo o N-amonio del suelo)

a' fertilizante = Exceso de átomos de ^{15}N en el fertilizante aplicado

Los porcentajes resultantes fueron multiplicados por el tamaño de cada fracción para obtener la cantidad de kg recuperados por ha.

Debido a que las mediciones fueron realizadas a través del tiempo sobre las mismas parcelas, ellas tienden a estar correlacionadas, por lo que se realizaron análisis de variancia de mediciones repetidas (Winer 1971) y, en el caso de encontrarse diferencias significativas, se efectuaron pruebas de diferencias de medias por el método de diferencia mínima significativa (DMS).

RESULTADOS Y DISCUSION

A pesar de las adecuadas precipitaciones registradas durante el período de crecimiento (374 mm), el cultivo de trigo sufrió de déficit hídrico, ya que el agua del

suelo estuvo por debajo del 60% del agua disponible desde la última semana de septiembre hasta la primera semana de noviembre (Fig. 1). Este momento es coincidente con el período crítico para el cultivo de trigo, en el cual se define el número de granos (30-35 días antes de antesis) y el peso de granos (30 días después de antesis). Abbate *et al.* (1995) demostraron que el número de granos es el componente del rendimiento más afectado por el estrés hídrico en el SE de la provincia de Buenos Aires.

Producción de materia seca y nitrógeno en planta

El rendimiento en grano fue de 2130, 3740 y 3970 kg ha⁻¹ para los tratamientos 0N, 80S y 80M, respectivamente, con diferencias significativas sólo entre los tratamientos fertilizados y el testigo ($p < 0,01$). Estos rendimientos son bajos para esta región, pero la profundidad efectiva del suelo (40 cm) representó una limitación para la máxima expresión de la producción de granos. La falta de diferencias significativas entre momentos de fertilización puede ser explicada por la baja dosis de N usado (80 kg ha⁻¹), considerando que en experiencias previas donde se aplicaron 120 kg N ha⁻¹ como urea, mostraron efecto significativo del momento de fertilización (Videla *et al.* 1996, Melaj *et al.* 2003). Se determinó efecto significativo del momento de muestreo sobre la acumulación de materia seca y nitrógeno ($p < 0,001$), pero el momento de

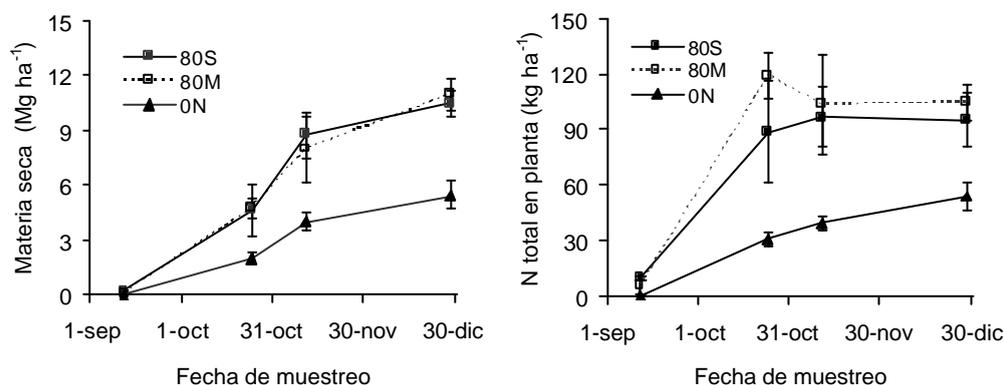


Figura 2. Acumulación de materia seca y nitrógeno total en trigo durante la estación de crecimiento 1997 en Balcarce-Argentina. Las barras verticales representan los errores estándar.

Figure 2. Dry matter and total nitrogen accumulation by the wheat crop in 1997 at Balcarce-Argentina. Vertical bars represent standard error.

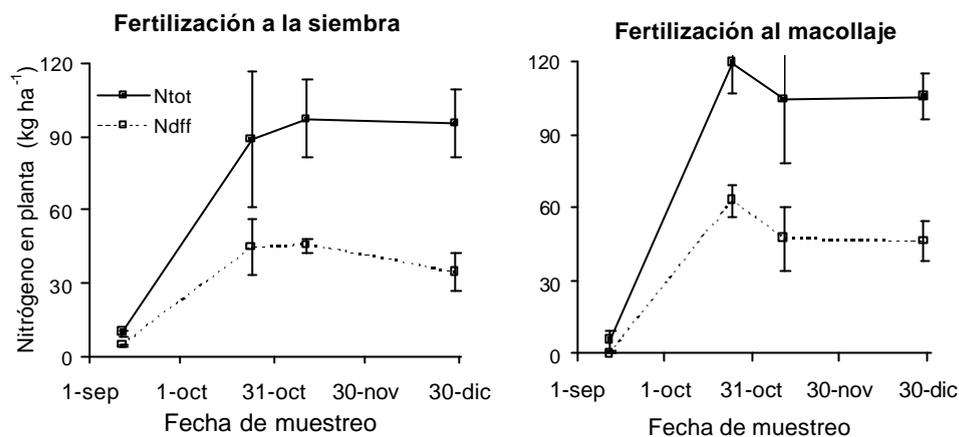


Figura 3. Nitrógeno total en planta y nitrógeno derivado de la urea (Ndff) aplicada a la siembra o al macollaje de un cultivo de trigo en Balcarce-Argentina. Las barras verticales representan errores estándar.

Figure 3. Total plant nitrogen and nitrogen derived from urea (Ndff) applied to sowing and tillering of wheat crop at Balcarce-Argentina. Vertical bars represent standard error.

aplicación del fertilizante no afectó significativamente estas variables. La materia seca y el nitrógeno en planta tuvieron similares dinámicas de acumulación, mostrando la tendencia usual para el cultivo de trigo en esta región (Videla *et al.*, 1996) con una tasa inicial lenta, luego una etapa casi lineal de máxima acumulación y otra etapa de tasa decreciente (Fig.2).

Ndff en planta disminuyó desde 45,2 a 34,3 kg.ha⁻¹ en el período que va desde floración hasta madurez fisiológica en el tratamiento 80S, y desde 62,5 a 46,1 en el período de elongación de pseudotallos a floración en el tratamiento 80M (Fig. 3). El N-total no disminuyó significativamente en ese período en el tratamiento 80S, sugiriendo que al final del ciclo del cultivo, las plantas perderían nitrógeno marcado desde las partes aéreas y simultáneamente absorberían nitrógeno no marcado recientemente mineralizado de la materia orgánica del suelo, de manera tal que la cantidad de nitrógeno total en planta no disminuyó en ese período. Esta caída en Ndff ha sido informada en varios trabajos (Harper *et al.* 1987; Melaj *et al.* 2003) y puede ser explicada a través de pérdidas de amoníaco o amins volátiles desde la parte aérea de las plantas vía estomática durante la traslocación de nitrógeno desde los tejidos vegetativos hacia las espigas, en función a la concentración atmosférica de amoníaco.

La recuperación de nitrógeno del fertilizante en planta fue significativamente mayor para 80M que para 80S en todos los muestreos, excepto en el de floración (11 de noviembre). A madurez fisiológica, Ndff en planta fue de 42,8% para fertilización a la siembra y 57,7 % para fertilización al macollaje (Tabla 1), mostrando que el trigo se benefició más del nitrógeno del fertilizante cuando éste se aplicó al macollaje. Similares diferencias entre fertilización a la siembra y al macollaje en cultivos de trigo fueron encontradas por Melaj *et al.*, (2003), para esta región, aunque la mayor aplicación de nitrógeno en éste experimento (120 kg ha⁻¹) condujo también a diferencias en rendimiento en grano. En experimentos en esta región y con similar variedad de trigo fertilizado a la siembra con urea, el Ndff en planta fue casi 10% mayor que en el presente trabajo (Echeverría, Videla 1998), posiblemente como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua (profundidad de suelo 110 cm), lo cual afectó la dinámica del N, principalmente las pérdidas de N. El valor de Ndff en planta mayor para 80M indica una mejor sincronía entre la disponibilidad y la demanda de nitrógeno por las plantas que el tratamiento 80S.

Nitrógeno del suelo

El contenido de N-NH₄⁺ y el Ndff-NH₄⁺ (de 0 a 20 cm) presentaron una dinámica similar; en los dos tratamientos fertilizados

Tabla 1. Recuperación del nitrógeno del fertilizante en las fracciones orgánica e inorgánica ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) del suelo y en la parte aérea de las plantas en un cultivo de trigo en Balcarce-Argentina.

Table 1. Recovery of nitrogen from fertilizer in organic, inorganic ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) soil pools and plant aboveground of wheat crop at Balcarce-Argentina. Letras diferentes indicant diferencias significativas segun prueba de DMS

Tratamiento		N recuperado Kg Nddf (kg ha^{-1})			
		N mineral suelo	N org. Suelo	N planta	TOTAL
80S	Macollaje	38.90	37.51	5.62	82.10
	Elong. Pseud.	0.14	15.48	55.59	71.21
	Floración	0.07	12.13	56.48	68.67
	Mad. Fisiol.	0.30	27.88	42.77	70.96
80M	Macollaje	49.66	54.16	0.02	103.84
	Elong. Pseud.	2.05	23.84	78.18	104.07
	Floración	0.15	25.56	58.89	84.61
	Mad. Fisiol.	0.39	18.06	57.66	76.10
Fechas muestreo (T)	Macollaje	44.315 a	45.839 a	2.816 c	92.970
	Elong. Pseud.	1.095 b	19.663 b	66.885 a	87.640
	Floración	0.110 b	18.846 b	57.685 ab	76.640
	Mad. Fisiol.	0.344 b	22.969 b	50.216 b	73.530
Momento de fertilización (F)	80S	9.870	23.252	40.114 a	73.240
	80M	13.062	30.406	48.687 b	92.150
<i>Analisis de la variancia</i>					
T		0.001	0.043	0.001	0.602
F		0.578	0.172	0.025	0.040
TxF		0.861	0.558	0.055	0.858
CV (%)		35.970	13.630	10.930	6.710

Nddf- NH_4^+ (Fig. 4) fue mayor durante el muestreo de macollaje y después disminuyó a niveles muy bajos ($<1 \text{ kg ha}^{-1}$). Este efecto podría ser resultado de una rápida tasa de nitrificación y/o de inmovilización en la fracción orgánica del suelo originada en la preferencia de los microorganismos por N-amonio. Al muestreo de macollaje Nddf- NH_4^+ fue mayor en 80M que en 80S, pero las parcelas 80M fueron muestreadas 11 días después de la fertilización al macollaje, por lo que es posible pensar que la mayor acumulación de N- NH_4^+ en 80S haya ocurrido antes de este muestreo.

En ningún muestreo se midieron acumulaciones altas de N-NO_3^- , probablemente como consecuencia de una rápida tasa de consumo por las plantas del nitrato producido a partir del amonio liberado por la hidrólisis de la urea, por lo que no se determinaron diferencias significativas en los valores de Nddf- NO_3^- . El elevado contenido de agua durante el período de macollaje ($0,29 \text{ g g}^{-1}$) habría promovido un activo crecimiento vegetal, fortaleciendo la hipótesis de rápido consumo de N-NO_3^- .

La fracción N-orgánico soluble representó una porción muy pequeña del Nddf por lo que fue sumada con el N-orgánico para realizar los análisis estadísticos. Hubo una inmovilización inicial importante del nitrógeno del fertilizante en la fracción orgánica, 30,0 y 43,3 kg Nddf ha^{-1} para los tratamientos 80S y 80M, respectivamente, y posteriormente una disminución en el siguiente muestreo, pero las diferencias entre 80S y 80M no fueron significativas. Esto significa que inicialmente, parte del Nddf fue inmovilizado por la biomasa microbiana u otras fracciones lábiles, las que liberarían subsecuentemente parte de este nitrógeno en el suelo. Hacia el final del ciclo del trigo, se verificó una tendencia a que Nddf-orgánico fuese mayor en 80S que en 80M (Fig. 4), sugiriendo un efecto residual mayor del nitrógeno aplicado a la siembra, como resultado de inmovilización en fracciones orgánicas de baja actividad. Ferrari *et al.*, (1997) no encontraron un incremento en el nitrógeno en la biomasa microbiana (MBN) después de la fertilización con N, pero se demostró que MBN presentó una caída hacia el final del ciclo del

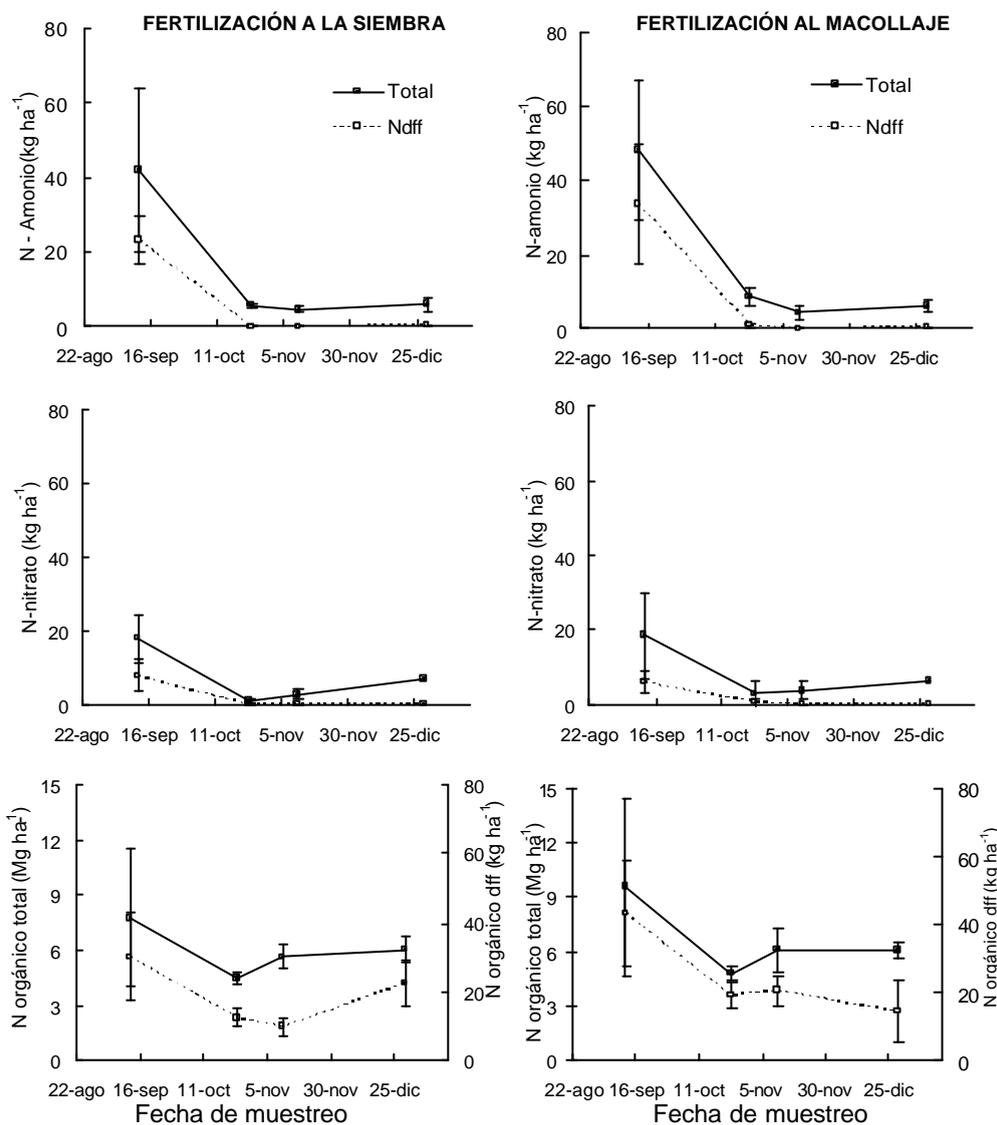


Figura 4. Evolución del nitrógeno total y nitrógeno derivado del fertilizante en el suelo en las fracciones amonio, nitrato y orgánica después de aplicaciones de urea a la siembra o al macollaje de un cultivo de trigo en Balcarce-Argentina. Las barras verticales representan errores estándar.

Figure 4. Evolution of total and derived from fertilizer N in ammonium, nitrate and organic soil pools after sowing and tillering urea application on wheat crop at Balcarce-Argentina. Vertical bars represent standard error.

cultivo de trigo, en coincidencia con los presentes resultado para el tratamiento 80M. La disminución del Ndff-NH₄⁺ y del Ndff-orgánico fue coincidente con un abrupto aumento en la tasa de acumulación de nitrógeno en planta, lo que confirmaría que estas fracciones actúan como reservorios temporales del nitrógeno del fertilizante.

Recuperación del nitrógeno derivado del fertilizante

La recuperación del nitrógeno del fertilizante en las fracciones analizadas para los dos tratamientos fertilizados fue alta en los dos primeros muestreos (Tabla 1), disminuyendo posteriormente, a pesar de que no hubo diferencias significativas, debido principal-

mente a la alta variabilidad de las determinaciones del muestreo de macollaje. La recuperación de 80M fue siempre mayor que la de 80S, representando una diferencia de 20 a 30% en los primeros dos muestreos y disminuyendo a 16 a 6% para los dos últimos, como consecuencia de la disminución en la recuperación de 80M. Los valores finales de recuperación de nitrógeno fueron más bajos que los calculados en otros trabajos (Recous *et al.*, 1988) aunque similares a los valores de recuperación calculados por Harper *et al.*, (1987). La profundidad de análisis (20 cm) podría explicar la baja recuperación, sin embargo, para todas las fracciones analizadas, más del 74 % del Nddf en el suelo fue recuperado hasta la profundidad de 10 cm (datos no mostrados), por lo que el lavado no parecería una alternativa posible. Otra posible explicación para esta recuperación relativamente baja podría intentarse a través de pérdidas por desnitrificación, las que incrementan abruptamente en estos suelos cuando el contenido de agua del suelo excede el nivel crítico de $0,27 \text{ g g}^{-1}$ (Picone, Videla 1998) y teniendo en mente que la tasa de desnitrificación del suelo a campo es un proceso episódico controlado por factores tales como el incremento en la humedad del suelo (Sextone *et al.* 1985). Los contenidos de agua del suelo fueron $0,30$ y $0,28 \text{ g g}^{-1}$ para los muestreos de macollaje y floración, respectivamente. Además, los contenidos de agua en el período siembra-macollaje pueden haber estimulado las pérdidas por desnitrificación en el tratamiento 80S, lo que explicaría las diferencias en recuperación de Nddf entre 80S y 80M. La no inclusión del nitrógeno retenido por las raíces del cultivo, es otra explicación alternativa para los bajos valores de recuperación, a pesar de que las raíces habitualmente sólo retienen pequeñas cantidades de nitrógeno a la cosecha (Recous *et al.* 1987).

Aunque se encontró que la recuperación de nitrógeno del fertilizante fue mayor para 80M que para 80S (Tabla 1), la fracción orgánica se comportó de manera inversa, sugiriendo que la aplicación de fertilizante a la siembra permite un efecto residual del fertilizante mayor, mientras que las aplicaciones al macollaje favorecen la

recuperación de nitrógeno por el cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Drs. Felipe Zapata y Rebecca C. Hood (FAO/IAEA) y al personal del Laboratorio de manejo de suelos y aguas y nutrición de cultivos de FAO-IAEA (Seibersdorf, Austria) por los análisis de ^{15}N en suelo. Este trabajo fue realizado con fondos de los proyectos AGR 163/03 de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) y ARG 5/008 de la IAEA.

REFERENCIAS

- Abbate PE, Andrade F, Culot JP. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci.* 124: 351-360.
- Bremner JM. 1965a. Inorganic forms of nitrogen. pp 1149-1178. In: CA Black (ed.), *Methods of soil analysis, Part 2. Agronomy 9.* Amer. Soc. Agronomy, Madison, WI.
- Bremner JM. 1965b. Organic forms of nitrogen. pp. 1238-1255. In: CA Black (ed.), *Methods of soil analysis, Part 2. Agronomy 9.* Amer. Soc. Agronomy, Madison, WI.
- Brooks PD, Stark JM, McInteer BB, Preston T. 1989. Diffusion method to prepare soil extracts for automated nitrogen-15 analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1707-1711.
- Calviño P, Echeverría HE, Redolatti M. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 20: 36-42,
- Costa JL, Masone H, Martínez D, Suero EE, Vidal CM, Bedmar F. 2002. Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agric. Water Management* 57: 33-47
- Della Maggiora AI, Irigoyen AI, Gardiol JM, Caviglia O, Echarte L. 2002/03. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Rev. Arg. de Agrometeorología* 2 (2): 167-176.
- Echeverría HE, Videla CC. 1998. Eficiencia fisiológica y de utilización de nitrógeno en trigo en la Región Pampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 16: 83-87.
- Ferrari JL, García F, Echeverría HE. 1997. Evolución del carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana durante el desarrollo del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 15: 64-70.
- García F, Fabrizio K, Berardo A, Justel F. 1998. Fertilización nitrogenada de trigo en el sudeste bonaerense: respuesta, fuentes y momentos de aplicación. *Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos. Paz.*, p. 109-110, mayo 1998.

- Gonzalez Montaner JH, Maddoni GA, Dinápoli MR. 1997. Modelling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research* 51: 241-252.
- Harper, Sharpe R, Langdale G, Giddens J. 1987. Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport. *Agron. J.* 79: 965-973.
- Hauck RD, Bremner JM. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. In Brady NC (Ed.) *Advances in Agronomy* 28: 219-266.
- Melaj MA, Echeverría EE, López SC, Studdert GA, Andrade F, Bárbaro NO. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no tillage system. *Agronomy Journal* 95: 1515-1531.
- Picone L, Videla C. 1998. Desnitrificación, contenido de nitratos, humedad y carbono orgánico soluble en el cultivo de trigo. *Ciencia del suelo* 16: 77-82.
- Pruden G, Powlson DS, Jenkinson DS. 1985. The measurement of ^{15}N in soil and plant material. *Fert. Res.* 6: 205-218.
- Recous S, Fresneau C, Faurie G, Mary B. 1988. The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil* 112: 205-214.
- Sextone AJ, Parkin TB, Tiedje JM. 1985. Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 99-103.
- Studdert GA, Echeverría HE, Casanovas EM. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity on a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1466-1472.
- Videla C. 1994. La volatilización de amoníaco: una vía de pérdida de nitrógeno en sistemas agropecuarios. *Boletín Técnico* 131. INTA. EEA Balcarce. 16p.
- Videla CC, Ferrari JL, Echeverría HE, Travasso MI. 1996. Transformaciones del nitrógeno en el cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 14: 1-6.
- Winer BJ. 1971. *Statistical principles in experimental design*. 2nd Edition, New York: McGraw-Hill Book Co.
- Wuest SB, Cassman KG. 1992. Fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated wheat. I. Uptake efficiency of preplant versus late-season application. *Agron. J.* 84: 682-688.