

EFICIENCIA FISIOLÓGICA Y DE UTILIZACIÓN DE NITRÓGENO EN TRIGO EN LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA

H E ECHEVERRÍA, C C VIDELA

Unidad Integrada FCA-INTA Balcarce, CC 276 (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina

NITROGEN PHYSIOLOGICAL USE EFFICIENCY AND FERTILIZER NITROGEN USE EFFICIENCY IN WHEAT IN THE ARGENTINE PAMPEAN REGION

The physiological nitrogen use efficiency (EF) and fertilizer nitrogen use efficiency (EUN) of wheat are necessary to compare nitrogen addition responses under different soil and climate conditions. The knowledge of those efficiencies allow to make nitrogen budgets and thus estimate crop nitrogen requirements more precisely. Wheat EF and indirect EUN were evaluated in field experiments carried on at Anguil, Balcarce, Paraná and Rafaela. On the other hand, ^{15}N was used to determine direct EUN, to identify the source of nitrogen absorbed by the crop (either soil or fertilizer) and to determine fertilizer nitrogen recovered from the soil layers. It was stated that when total nitrogen absorbed by wheat exceeded 172 kg N ha^{-1} , yields were maximum and constant (6650 kg ha^{-1}). Below that threshold wheat responded linearly to nitrogen addition with a slope of $38 \text{ kg of grain per kg of nitrogen applied}$. This means that nitrogen requirement to produce 1000 kg of grain is approximately $26 \text{ kg of nitrogen}$. Direct EUN was high at the locations where water supply was adequate: Balcarce (52.6%), Paraná (61.2%) and Pergamino (45.7%); whereas at Anguil direct EUN was low (19.7%). The amounts of residual soil nitrogen varied between 30 and 45%. At Anguil, where water supply was insufficient, more than 40% of applied nitrogen was not recovered, while at the other locations the amount of non recovered nitrogen was low (<20%). These results indicates that applied nitrogen recovered by crop is high and residual applied nitrogen in soil is low where water supply to the crop is adequate. This suggest that, in such conditions, nitrogen losses from the soil-plant system would be low.

Key words: Wheat - Nitrogen use efficiency - Fertilizer recovery - ^{15}N fertilizer

INTRODUCCION

En las distintas áreas productoras de trigo del país, se han determinado notables incrementos en los rendimientos por el agregado de nitrógeno (Berardo, 1994; Gonzalez Montaner *et al.* 1997; Gambaudo *et al.* 1994), por lo que la práctica de la fertilización con dicho nutriente se ha generalizado e inclusive intensificado en los últimos años.

El nitrógeno es un nutriente extremadamente dinámico en el suelo y sufre numerosos cambios que incluyen procesos de pérdidas, ganancias y transformaciones, por lo que es prioritario el estudio integral de dichos procesos (Harper *et al.*, 1987; Recous *et al.*, 1988). En el país, si bien se han realizado algunas experiencias que ayudan a explicar la respuesta del trigo al agregado de nitrógeno (Gonzalez Montaner *et al.* 1997) y otras que intentan cuantificar algunos mecanismos de pérdida gaseosa de nitrógeno (Videla *et al.* 1996, Picone *et al.* 1997), resta generar información que permita la confección de balances de nitrógeno que incluyan dichos mecanismos. Los trabajos para cubrir estos aspectos requieren metodología e instrumental relativamente sofisticado, por lo que en esta línea de investigación los avances no son rápidos.

El conocimiento de la eficiencia con que el trigo emplea el nitrógeno aplicado como fertilizante, es una

alternativa promisoría para los trabajos que requieren la cuantificación de los distintos procesos que rigen la dinámica del nitrógeno. Según Novoa y Loomis (1981), la eficiencia agronómica (kg de grano por kg de nitrógeno aplicado) resulta del producto de la eficiencia fisiológica (EF) y del coeficiente de utilización de N. La EF representa la cantidad de trigo producido por unidad de nitrógeno absorbido (kg de grano por kg de nitrógeno absorbido) y, el coeficiente de utilización (Machet *et al.*, 1987), también denominado como eficiencia de utilización del nitrógeno aplicado (EUN), representa la fracción del nitrógeno aplicado que es absorbido por el trigo (kg de nitrógeno absorbido por kg de nitrógeno aplicado).

La EUN puede determinarse en forma directa (EUND), a través del método de dilución isotópica (Hauck, Bremner 1976) o indirecta (EUNI), por el método de la diferencia. Los resultados obtenidos a través del método de la diferencia, que es uno de los más utilizados, pueden estar viciados por el denominado efecto priming o de cebado, que consiste en un mayor consumo de nitrógeno del suelo por las plantas fertilizadas, lo que causa una sobrestimación de la EUN (Hauck, Bremner 1976). El método de dilución isotópica puede ser afectado por la sustitución de ^{15}N por ^{14}N en alguna/s fracción/es del suelo, y puede conducir a que menos ^{15}N esté disponible para las plantas. Esto provoca que

la estimación del nitrógeno absorbido sea menor (Jenkinson *et al.* 1985), no obstante, con el método de dilución isotópica se evitan las sobreestimaciones mencionadas para el método indirecto.

La determinación de la EF y de la EUN es necesaria cuando se desea comparar las respuestas al agregado de nitrógeno en ambientes con características edafoclimáticas diferenciales, las cuales condicionarían la capacidad de las plantas de aprovechar el nitrógeno aportado por fertilización. Se plantea que estos coeficientes difieren en los ambientes evaluados de la Región Pampeana. Con esta información y el conocimiento de la cantidad de nitrógeno del fertilizante remanente en el suelo al cabo de la cosecha del cultivo es factible la confección de balances de nitrógeno (Meisinger 1984) y, por lo tanto, realizar estimaciones más precisas de los requerimientos de nitrógeno. Estos estudios conducen a mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno aportado por fertilización.

El presente trabajo, realizado en ambientes con características edafoclimáticas representativas de la Región Pampeana, plantea como objetivos 1) determinar la EF de nitrógeno para el cultivo de trigo, 2) determinar las EUN directa e indirecta en el cultivo de trigo 3) discriminar el origen del nitrógeno absorbido por las plantas entre el proveniente del suelo y del fertilizante y 4) determinar la recuperación del nitrógeno del fertilizante en el sistema suelo.

MATERIALES Y METODOS

Se implantaron ensayos de fertilización nitrogenada en las EEA INTA de: Anguil, Balcarce, Paraná y Pergamino (Argentina) en la campaña agrícola 1995-96. Las características de los sitios estudiados se presentan en la Tabla 1. En todos los sitios se empleó labranza de tipo convencional. Se fertilizó con fósforo a la siembra cuando los valores fueron inferiores a 20 mg kg^{-1} de P-Bray y Kurtz 1. Se utilizó las variedades Prointa Pigué en Anguil, Prointa Oasis en Balcarce y Prointa Federal en Paraná y Pergamino, por presentar buena adaptación a dichos ambientes. Los ensayos fueron regados por aspersión cuando se evidenció déficit hídrico severo.

Se evaluaron, en un diseño en bloques completos con tres repeticiones, los siguientes tratamientos: 0 y 80 kg N ha^{-1} como

urea a la siembra. El tamaño de las parcelas fue de tres por 40 m^2 . En el tratamiento fertilizado se implementaron microparcels de 1 m^2 en las que se aplicó urea al voleo con un exceso de 4,813% de átomos de ^{15}N . El fertilizante marcado fue provisto por el International Fertilizer Development Center (IFDC).

Se evaluó la producción de materia seca (MS) y contenido de nitrógeno total en planta a cosecha, fraccionándose las muestras en espiga y resto de la parte aérea. Todos los muestreos se efectuaron cortando las plantas al ras del suelo en una superficie de $0,25 \text{ m}^2$. Posteriormente, las muestras fueron secadas hasta peso constante a 60°C y molidas hasta pasar por una malla de un mm. El nitrógeno orgánico total se determinó por el método de Nelson y Sommers (1973). En las microparcels con ^{15}N las muestras fueron fraccionadas y procesadas de idéntica forma hasta ser molidas y posteriormente fueron remitidas al laboratorio del IFDC (Alabama) donde se efectuó la determinación de la relación isotópica con un espectrómetro de masa. Se tomaron muestras de suelo (sin separar las raíces) de las microparcels a los 0-20 cm con un barreno de 5 cm de diámetro (6 submuestras por microparcels). Para evitar contaminaciones, se eliminó el resto de suelo de dicha profundidad y posteriormente se extrajeron de manera análoga a la descripta, muestras de suelo de 20-40 cm de profundidad. En todas ellas se determinó nitrógeno total y actividad específica, de igual manera que en las muestras de planta, a fin de determinar el nitrógeno residual del fertilizante.

Con la información obtenida se efectuaron los cálculos de la cantidad de nitrógeno proveniente del fertilizante en las diferentes partes de las plantas, por el método isotópico (NDDFD) y por el método de la diferencia (NDDFI), según:

$$\text{NDDFD} = (\text{EP} / \text{EF}) * \text{NPL}$$

Donde: EP = Porcentaje de átomos en exceso de ^{15}N en planta

EF = Porcentaje de átomos en exceso de ^{15}N en el fertilizante.

NPL = Contenido de nitrógeno total absorbido por el trigo fertilizado (kg ha^{-1}).

$$\text{NDDFI} = \text{NPL} - \text{NPLT}$$

donde: NPLT = Contenido de nitrógeno total absorbido por el trigo en el testigo (kg ha^{-1}).

Posteriormente, se obtuvieron los valores de EUND y EUNI, según:

$$\text{EUND} = \text{NDDFD} / \text{F}$$

$$\text{EUNI} = \text{NDDFI} / \text{F}$$

donde:

F = Cantidad de fertilizante aplicada (kg ha^{-1}).

La relación entre el rendimiento en grano y el nitrógeno absorbido (EF) por el cultivo fue determinada por una función polinomial de segundo orden y lineal-meseta por el método de los mínimos cuadrados (Steel, Torrie 1960). Los rendimientos para cada localidad fueron analizados por medio de análisis de la

Tabla 1. Características climáticas y edáficas relevantes de los sitios experimentales.

Localidad	Suelo	Textura	MO (%)	pH 1:2,5	Cultivo previo	Prof. tosca (cm)	Precipitación + riego (siembra a cosecha)
Anguil	Haplustol Entico	franco arenoso	2,1	6,5	Trigo	110	266
Balcarce	Paleudol Petrocálcico	franco	5,1	5,8	Papa	120	379
Paraná	Argiudol Típico	franco arcilloso	3,3	6,2	Pastura	No	486
Pergamino	Argiudol Típico	franco	2,8	6,4	Soja	No	427

MO = materia orgánica

varianza. Para ello se utilizaron los procedimientos NLIN y ANOVA del Statistics Analysis System (SAS 1985).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 2 se observa que los rendimientos fueron muy variables en respuesta a las diferentes condiciones ambientales y de manejo, particularmente al empleo de riego suplementario, que determinó la cantidad de agua que dispuso el cultivo durante el ciclo. Se puede considerar que estos rendimientos son cercanos a los máximos a obtener con la dosis empleada en las localidades de Balcarce y Pergamino. En Anguil la imposibilidad de continuar los riegos durante antesis, impidió la expresión de mayores rendimientos, mientras que los obtenidos en Paraná exceden los habitualmente encontrados debido a que el ensayo se implantó en un lote en donde fue roturada una pastura, por lo que no se encontró respuesta al agregado de nitrógeno.

Cuando se analizó la relación entre el rendimiento en grano y el nitrógeno absorbido por el cultivo, incluyendo todos los tratamientos y lugares, a través de una función de tipo polinomial de segundo orden se obtuvo la siguiente ecuación (Figura 1).

$$RTO = -690 + 61,3 \text{ NAB} - 0,13 \text{ NAB}^2 \quad (r^2 = 0,97) \quad (1)$$

donde RTO = es el rendimiento en grano a cosecha y NAB = nitrógeno absorbido en planta entera a la cosecha. Según esta ecuación se registrarían incrementos decrecientes por el agregado de nitrógeno y se requerirían 235 kg de nitrógeno para lograr el rendimiento máximo. Al analizar estas mismas variables con una función de tipo lineal-meseta (Figura 1) se obtuvo:

$$\begin{aligned} \text{Si } \text{NAB} < 172 \quad RTO &= 38 \times \text{NAB} \quad \text{mientras que si} \\ \text{NAB} > 172 \quad RTO &= 6650 \quad (r^2 = 0,97) \quad (2) \end{aligned}$$

Tabla 2. Rendimiento en grano y nitrógeno total absorbido en trigo en las localidades evaluadas en la campaña 1995.

Localidad	Tratamiento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	N absorbido (parte aérea) (kg ha ⁻¹)
Anguil	0N	834 (276)	25,3 (14,14)
	80N	1669 (587)	50,5 (14,93)
Balcarce	0N	4136 (291)	89,1 (6,99)
	80N	5192 (1132)	137,3 (32,92)
Paraná	0N	6705 (278)	232,1 (24,53)
	80N	6565 (489)	262,2 (20,09)
Pergamino	0N	4025 (321)	113,0 (25,60)
	80N	4840 (1450)	168,7 (35,99)

Media (desvío estándar)

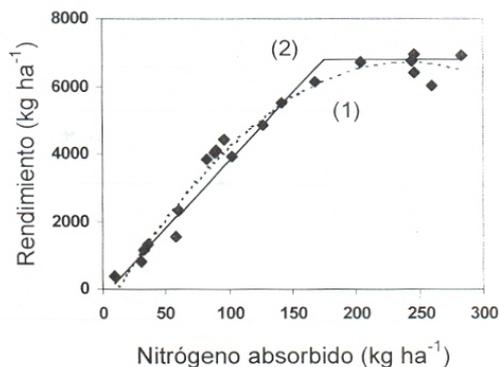


Figura 1. Rendimiento en grano de trigo en función del nitrógeno total absorbido en planta. (1) función polinomial de segundo orden, (2) función lineal-meseta.

De acuerdo a esta última, se determinó un umbral de 172 kg N ha⁻¹ absorbido por el cultivo por encima del cual los rendimientos fueron máximos y constantes (6650 kg ha⁻¹). Las notables diferencias en la cantidad de nitrógeno requerido para lograr el rendimiento máximo, con idéntico grado de ajuste, han provocado que las dosis recomendadas de fertilizante varíen notablemente en función de la ecuación escogida. Este comportamiento coincide con el observado en maíz por Cerrato y Blackmer (1990), quienes establecieron requerimientos de fertilización significativamente menores con funciones de tipo lineal-meseta que con otro tipo de funciones. El umbral mencionado supera ligeramente los 155 kg N ha⁻¹ determinados como límite por encima del cual es factible lograr el máximo número de granos de trigo por m² (Gonzalez Montaner *et al.*, 1997), determinante éste último del rendimiento en grano (Magrin *et al.*, 1993). Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que, por debajo del umbral de 172 kg N ha⁻¹ el rendimiento en grano, respondió en forma lineal con una pendiente de 38 kg grano por kg N. Este valor es superior al reportado por Neeteson (1990) y por Gonzalez Montaner *et al.* (1997), e implica un requerimiento de sólo 26 kg de nitrógeno por ha para producir una tonelada de grano.

La EUND, también denominada coeficiente real de utilización (Machet *et al.*, 1989), fue elevada en las localidades de Balcarce (52,6%), Paraná (61,2%) y Pergamino (45,7%), en las cuales el suministro de agua fue adecuado; mientras que en Anguil fue de sólo 19,7% (Tabla 3). Estos resultados coinciden con los informados por Pilbeam (1996), quien analizando experiencias en condiciones de campo con ¹⁵N, señaló que en ambientes húmedos más de la mitad del nitrógeno del fertilizante

Tabla 3: Nitrógeno derivado del fertilizante marcado en planta y suelo y eficiencia de utilización del nitrógeno por los métodos directo (EUND) e indirecto (EUNI).

Localidad	Recuperación del N del fertilizante aplicado (kg ha ⁻¹)				Planta y suelo	NDDS Parte aérea (kg ha ⁻¹)	EUND (%)	EUNI (%)
	Planta		Suelo (cm)					
	Espiga	Restos	0-20	20-40				
Anguil	12,81	2,92	16,68	13,12	45,54	34.7 (14.05)	19.7 (9.67)	31,5 (29,95)
Balcarce	31,84	10,2	25,86	11,56	79,48	95,2 (20.56)	52.7 (15.45)	60,2 (36,25)
Paraná	34,37	14,56	9,44	15,08	73,45	213.3 (19.42)	61.2 (1.80)	37,6 (18,43)
Pergamino	27,51	8,98	23,49	5,49	65,46	132.2 (20.00)	45.61 (12.56)	69,6 (33,10)

te fue absorbido por las plantas de trigo, mientras que en ambientes secos este porcentaje difícilmente superó el 20%.

Para ninguna de las localidades evaluadas se encontraron diferencias significativas entre los dos métodos de cálculo de EUN, lo que sería consecuencia de los elevados desvíos estandar (Tabla 3), en particular para EUNI, lo que coincide con lo señalado por Roberts, Janzen (1990). A pesar de ello, se observa una tendencia a que EUNI presente valores mayores que EUND, excepto en la localidad de Paraná, en donde no se encontró respuesta al agregado de nitrógeno. Estos resultados coinciden con los reportados con anterioridad (Machet *et al.*, 1987) y se fundamentan en una sobrestimación de la diferencia en el nitrógeno absorbido entre las plantas fertilizadas y las sin fertilizar. Esta se originaría en una mayor exploración radical por las plantas fertilizadas que conduce a una mayor absorción del nitrógeno nativo del suelo. En Paraná, donde no se registró respuesta al agregado de fertilizante, la EUND fue mayor que la EUNI lo que no es frecuentemente citado en la literatura. No obstante, Moraghan *et al.* (1984) trabajando con sorgo granífero encontraron también EUNI mayores que EUND.

El empleo de fertilizante con ¹⁵N permite estimar el NddS a partir de la determinación del NDDF. En la Tabla 3 se observa que dichas cantidades son muy variables en función del tipo de suelo y el manejo del mismo. En el método indirecto, se considera que el NDDS es la cantidad de nitrógeno absorbida por las plantas del tratamiento sin fertilizar (0N Tabla 2). Si se comparan los valores que se obtienen por los dos métodos, se puede observar que el NDDS con el método isotópico es mayor que por el método de la diferencia, en las localidades en las que hubo respuesta al agregado de N, mientras que en donde no hubo respuesta (Paraná) esta diferencia se invierte. De todos modos, se determinó una estrecha asociación entre los dos métodos de estimación del NDDS ($r^2=0,98$). Este comportamiento se explica generalmente a través de una mayor exploración

radical por parte de las plantas fertilizadas y/o una estimulación de la actividad microbiana por la adición del fertilizante (Jenkinson *et al.*, 1985, Westerman, Kurtz 1973). Laurent *et al.* 1996, empleando esta metodología en plantas de trigo fertilizadas tanto a la siembra como al macollaje con ¹⁵N, determinaron mayor desarrollo radical, con respecto a los testigos sin nitrógeno, y por lo tanto, una diferencia importante en el NDDS entre el método isotópico y el de la diferencia, lo que coincide con los resultados de esta experiencia.

Los porcentajes de nitrógeno del fertilizante recuperado en suelo y planta, como así también el nitrógeno no recuperado se presentan en la Figura 2. En la misma se observa que la localidad de Anguil es la que presenta la mayor cantidad de nitrógeno no recuperado como consecuencia de la baja absorción por parte del cultivo ya comentada. En el resto de las localidades el nitrógeno no recuperado fue pequeño (<20%) lo que sugiere que para estas condiciones las pérdidas del sistema suelo planta

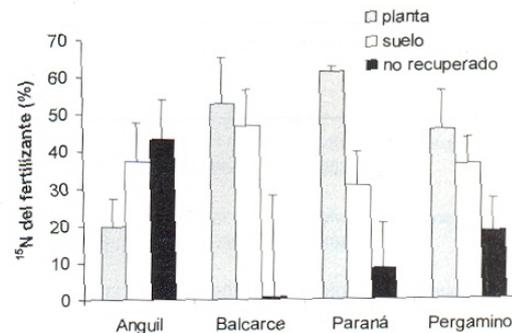


Figura 2. Recuperación del nitrógeno marcado derivado del fertilizante en el sistema suelo y en planta y nitrógeno no recuperado en trigo. Barras verticales indican el desvío estándar.

serían bajas. Estos resultados confirman las bajas pérdidas por volatilización (Videla *et al.* 1996) y desnitrificación (Picone *et al.*, 1997) determinadas en cultivos de trigo realizados en labranza de tipo convencional en Balcarce. Además, las cantidades de nitrógeno remanente del fertilizante en el suelo varían entre 30 y 45%, lo que indicaría que una proporción importante del nitrógeno aplicado permanece en el sistema. Considerando que la biomasa microbiana actúa como fuente y destino del nitrógeno aplicado por fertilización y que al finalizar el ciclo del trigo se han determinado contenidos relevantes de nitrógeno en esta fracción en dichas localidades (Ferrari *et al.*, 1997), es muy probable que el nitrógeno remanente en el suelo se asocie con dicha fracción orgánica.

Los resultados de este trabajo son de utilidad para la confección de balances de nitrógeno en el sistema suelo-planta, puesto que es factible ajustar la demanda del cultivo para un rendimiento dado y la eficiencia con que el mismo utiliza el nitrógeno aportado. Esto permitirá efectuar diagnósticos de los requerimientos de nitrógeno más precisos y confiables, minimizando los riesgos ambientales producidos por el aporte de nitrógeno al suelo.

AGRADECIMIENTOS

A WE Baethgen por su colaboración en la obtención de la urea marcada en el International Fertilizer Development Center. A los responsables de la conducción de los ensayos en las Estaciones Experimentales de INTA de Anguil A. Bono, Balcarce F. García, Paraná O. Paporotti y R. Melchiorre y Pergamino S Meira y Guevara.

Trabajo financiado por el Proyecto de Investigación Estratégica 80-033 del INTA y 15A060 de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNMP.

REFERENCIAS

- Berardo A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la estación experimental INTA-Balcarce. Boletín Técnico 128. EEA INTA Balcarce. 34p.
- Cerrato, ME, Blackmer AM. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.
- Ferrari, J.L.; García, F. y Echeverría, H.E. 1997. Evolución del carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana durante el desarrollo del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo.* 15:64-70.
- Gambaudo S, Fontanetto H, Quaino O. 1994. Diagnóstico de fertilización nitrogenada para trigo en la región triguera I. III Congreso Nacional de Trigo. 47-48.
- Gonzalez Montaner JH, Maddoni GA; Dinápoli MR. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research.* 51:241-252.
- Harper L, 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. En Brady ND (Ed) *Adv. in Agronomy* 28: 219-266.
- Jenkinson DS, Fox RH, Rayner JH. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called 'priming effect'. *J. Soil Sci.* 36: 425-444.
- Laurent GC, Lázzari MA, Victoria RL. 1996. Balance del nitrógeno del fertilizante aplicado al trigo en dos épocas diferentes. *Ciencia del Suelo* 14: 7-11.
- Machet JM, Pierre D, Recous S, Rémy JC. 1987. Signification du coefficient reel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 73: 39-55.
- Machet JM. 1989. L'apport des techniques isotopiques a la strategie de fertilisation. *Perspectives Agricoles* 115: 37-42.
- Magrin GO, Hall A, Baldy C, Grondona MO. 1993. Spatial interannual variation in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology.* 67: 29-41.
- Meisinger JJ. 1984. Evaluating plant available nitrogen in soil crop systems. En R.D. Hauck (Ed.). *Nitrogen in Crop Production.* ASA-CSSA-SSSA. Madison, U.S.A. pp.391-416.
- Moraghan JT, Rego TJ, Buresh RJ. 1984. Labeled nitrogen fertilizer research with urea in the semi-arid tropics. 3. Field studies on alfisol. *Plant and Soil* 82: 193-203.
- Neeteson J. 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fert. Res.* 26: 291-298.
- Nelson D, Sommers L. 1973 Determination of total nitrogen in plant material. *Agron. J.* 65: 109-112.
- Novoa R, Loomis RS. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil* 58:177-204.
- Picone LI, Videla CC, García FO. 1997. Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un Argiudol Típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 15: 53-58.
- Pilbeam CJ. 1996. Effect of climate on the recovery in crop and soil of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to wheat. *Fertilizer Research* 45: 209-215.
- Recous S, Fresneau C, Faurie G, Mary B. 1988. The fate of labelled ¹⁵N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil* 112: 205-214.
- Robert TL, Janzen HH. 1990. Comparison of direct and indirect methods of measuring fertilizer N uptake in winter wheat. *Can. J. Soil Sci.* 70: 119-124.
- SAS Institute 1985. *SAS user's guide: Statistic version 5th sd.* SAS Inst., Cary, NC.
- Steel RG, Torrie JH. 1960. *Principles and procedures of statistics with special reference to the biological sciences.* Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- Videla CC, Ferrari JL, Echeverría HE, Travasso MI. 1996. Transformaciones del nitrógeno en el cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 14: 1-6.
- Westerman RL, Kurtz LT. 1973. Priming effect of ¹⁵N-labeled fertilizers on soil nitrogen in field experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 725-727.