

EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO: IMPORTANCIA DE LOS PRINCIPALES AGENTES EDÁFICOS REGULADORES DE LA DENITRIFICACIÓN

E.A. CIARLO¹; MARTA CONTI¹ e I. CIAMPITTI¹

RESUMEN

El óxido nitroso es un constituyente importante de la atmósfera porque absorbe radiación infrarroja y, por lo tanto, contribuye al efecto invernadero. La denitrificación es generalmente la fuente predominante de óxido nitroso en los suelos. El objetivo de este trabajo es analizar información que permita inferir asociaciones generales entre los niveles de emisiones gaseosas de nitrógeno por denitrificación y las variables que regulan el proceso. Los datos usados para el análisis fueron tomados de la bibliografía internacional especializada y contemplan un amplio rango de condiciones edáficas y ambientales. Las variables humedad, contenido de arcilla y dosis del fertilizante nitrogenado fueron significativas en la explicación de las emisiones de óxido nitroso ($p < 0,05$), mientras que el pH no influyó en la magnitud de estas pérdidas; el modelo más adecuado sería $\text{Denitrificación (kg N ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}) = 1,3 + 0,026 \cdot \text{WFPS (\%)} - 0,050 \cdot \text{arcilla (\%)} + 0,005 \cdot \text{dosis de N}$. La forma química del fertilizante aplicado no incidió significativamente en dichas emisiones, y tampoco interactuó con los niveles de humedad o condiciones texturales de los suelos.

Palabras clave. Óxido nitroso, denitrificación, controles, fertilizante nitrogenado.

NITROUS OXIDE EMISSIONS: IMPORTANCE OF THE MAIN EDAFIC CONTROLS OF DENITRIFICATION

SUMMARY

Nitrous oxide is an important component of the atmosphere because it absorbs infrared radiation and therefore contributes to the greenhouse effect. Denitrification is generally the main process generating nitrous oxide in soils. The objective of this work is the analysis of data with the aim of obtaining general associations between gaseous nitrogen emissions by denitrification and the variables controlling the process. Data used for the analysis were taken from the specialized international bibliography and include a wide variety of edafic and environmental conditions. Clay levels, moisture content and dose of the nitrogen fertilizer were significant in the explanation of nitrous oxide emissions ($p < 0,05$), whereas pH did not seem to influence the magnitude of these losses. Chemical form of the applied fertilizer did not affect significantly the emissions, and it did not interact with soil moisture levels or texture.

Key words. Nitrous oxide, denitrification, controls, nitrogen fertilizer.

¹Cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía de la UBA, Av. San Martín 4453 (1417) Capital Federal.
E-mail: ciarlo@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

El óxido nitroso, N_2O , es un constituyente importante de la atmósfera porque absorbe radiación infrarroja contribuyendo al efecto invernadero. El óxido nitroso actualmente es responsable del 5% del calentamiento global y podría llegar hasta valores de 10% en el futuro (Mosier, 1998). El óxido nitroso no se pierde en la tropósfera: el único mecanismo significativo de eliminación del óxido nitroso atmosférico es el transporte hacia la estratósfera donde es fotolíticamente oxidado a NO, el cual reacciona con el ozono estratosférico, destruyéndolo. El óxido nitroso es la principal fuente del NO estratosférico. La denitrificación es generalmente el proceso predominante que origina óxido nitroso en los suelos (Stevens y Laughlin, 2001; Khalil *et al.*, 2001). En general, se considera que los factores más importantes en el control de la denitrificación son la disponibilidad de oxígeno, carbono fácilmente disponible y nitrógeno mineral (Benckiser, 1994). El importante rol de control del oxígeno en la denitrificación es compartido estrechamente con el carbono fácilmente disponible. Se considera que en condiciones de campo, la denitrificación estaría limitada por la cantidad de carbono susceptible de ser mineralizada en condiciones anaeróbicas (Khalil *et al.*, 2001; Sainz Rozas *et al.*, 2001). La textura del suelo también influye en las pérdidas por denitrificación a través de su efecto sobre el régimen hídrico y gaseoso del suelo.

Debido a que el 70% del óxido nitroso emitido desde la biosfera deriva del suelo, se asume que cambios en el ciclo del nitrógeno en los suelos han influenciado en los aumentos del óxido nitroso atmosférico durante el siglo pasado (Mosier *et al.*, 1996). El aumento en las emisiones de gases nitrogenados desde suelos agrícolas durante las últimas décadas se ha relacionado al incremento en la aplicación de fertilizante nitrogenado a estos suelos (Mosier *et al.*, 1996; Mahmood *et al.*, 1998a y b). Con respecto a la influencia de los distintos tipos de fertilizantes, Mosier *et al.* (1996) sugirieron que las cantidades de óxido nitroso y dinitrógeno producidas eran más afectadas por las propiedades del suelo que por el tipo de fertilizante. Por el contrario, la producción de óxido nitroso es mayor cuando el fertilizante aplicado es amoníaco anhidro o basado en amonio que cuando el fertilizante es a base de ni-

tratos, según las revisiones de Eichner (1990) y Gally (1995).

De la comprensión del proceso de denitrificación y sus consecuencias en los agroecosistemas surge la necesidad de analizar los factores reguladores, cuya acción puede ser muy variable a causa de las complejas interacciones que se establecen entre ellos. Por ello, el objetivo de este trabajo es el análisis de datos obtenidos bajo diferentes condiciones ambientales y edáficas, con el fin de obtener asociaciones generales entre los niveles de emisiones gaseosas de nitrógeno por denitrificación y las variables que se suponen que manejan el proceso, así como evaluar el efecto de la dosis y de la forma química del fertilizante nitrogenado sobre las emisiones de óxido nitroso por denitrificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis estadísticos

Los datos se analizaron con el paquete informático SAS (SAS Institute Inc., 1999). Previamente se corroboraron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de las observaciones. Para lograr cumplir estos supuestos los datos de pérdidas de nitrógeno por denitrificación fueron log-transformados.

Se realizó un análisis de regresión múltiple con el procedimiento PROC REG del SAS, con el objetivo de encontrar a las variables edáficas que expliquen en mayor medida la variabilidad de las emisiones de óxido nitroso y dinitrógeno por denitrificación. Previamente a los distintos análisis de regresión se hicieron los diagnósticos de multicolinealidad a través de los valores de VIF (factor de inflación de varianza) e índice de condición (Myers, 1986). También se realizaron diagnósticos de influencia (Myers, 1986). Las variables regresoras elegidas, de acuerdo a la importancia dada por la bibliografía sobre el control del proceso denitrificatorio fueron: la humedad del suelo expresada como porcentaje de la porosidad ocupada por agua (WFPS), pH en agua 1:2.5, contenido de carbono oxidable (Walkley-Black), porcentaje de las distintas fracciones texturales (arena, limo y arcilla), y dosis del fertilizante nitrogenado (en $kg N ha^{-1}$). Se eligió el modelo más adecuado dentro de todos los modelos existentes posibles con las variables explicatorias, de acuerdo a los criterios de C_p de Mallows (Mallows, 1973), error cuadrático medio y coeficiente de determinación R^2 ajustado por el número de parámetros (Mac Neil, 1983). El mejor modelo es aquel con el mayor R^2 ajustado.

menor cuadrado medio del error y Cp más cercano al número de parámetros p . Se realizaron también análisis de regresión simple entre los valores de pérdidas por denitrificación (g de N ha^{-1}) y las distintas variables regresoras.

Se evaluó luego a través del análisis de varianza con el procedimiento PROC GLM del programa SAS, la existencia de diferencias en las pérdidas por denitrificación ante cambios en la forma química del fertilizante nitrogenado. Para la consecución de este objetivo los fertilizantes fueron separados en aquellos basados en amonio (A), en nitratos (N) o aquellos que poseen ambas formas químicas (AN) como el nitrato de amonio calcáreo. Se evaluaron los efectos principales de los tipos de fertilizantes a través de comparaciones múltiples según Duncan (Montgomery, 1991). De la misma manera se analizó el efecto de las distintas fuentes químicas sobre la proporción del fertilizante aplicado que se perdió por denitrificación.

Mediciones de denitrificación

Los datos usados para el análisis fueron tomados de la bibliografía internacional especializada y contemplan un amplio rango de condiciones edáficas y ambientales, así como también diferencias en las formas y dosis de nitrógeno aplicado como fertilizante y el uso de los suelos. Los valores que expresaban emisiones por unidad de peso de suelo, generalmente en cilindros de suelo, fueron expresados por unidad de superficie en función de la relación que dicho peso guardaba con la superficie expuesta del cilindro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de variables edáficas

Los diagnósticos de multicolinealidad expresaron que las variables texturales (porcentajes de arena, limo y arcilla) y el contenido de carbono edáfico eran fuertemente colineales, por lo que tres de ellas fueron eliminadas del modelo de explicación de acuerdo al criterio de mayor VIF. Estas tres variables eliminadas fueron porcentaje de arena y limo y contenido de carbono orgánico. El análisis de regresión realizado para encontrar a las variables edáficas que expliquen en mayor medida la variabilidad de las emisiones de óxido nitroso y dinitrógeno por denitrificación afirma, que el modelo propuesto, es significativo ($P < 0,0001$). Las variables regresoras seleccionadas que se utilizaron fueron el porcentaje de poros ocupado por agua (WFPS), el pH, el porcentaje de arcillas y la dosis de fertilización nitrogenada, cuya importancia puede verse en el Cuadro 1.

Las variables humedad (representada por WFPS, 'water filled porosity space'), contenido de arcilla y dosis del fertilizante nitrogenado fueron significativas en la explicación de las emisiones de nitrógeno por denitrificación ($p < 0,05$), mientras que el pH pareció no influir en la magnitud de estas pérdidas. Las variables WFPS y dosis de nitrógeno se correlacionaron positivamente con las pérdidas por denitrificación, mientras que el porcentaje de arcilla del suelo lo hizo negativamente (Fig. 1).

CUADRO 1. Análisis de regresión y significancia de las variables explicatorias.

Fuente	DF	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F
Modelo	4	33,94817	8,48704	20,19	<.0001
Error	69	29,01095	0,42045		
Total corregido	73	62,95912			

Variable	DF	Estimación del parámetro	Error Std	Pr > t	VIF
Intercepta	1	1,31707	0,737	0,0785	0
WFPS	1	0,02594	0,004	<.0001	1,08761
pH	1	-0,10564	0,091	0,2518	1,03023
Arcilla	1	-0,04985	0,006	<.0001	1,08221
Dosis N	1	0,00506	0,001	0,0034	1,06134

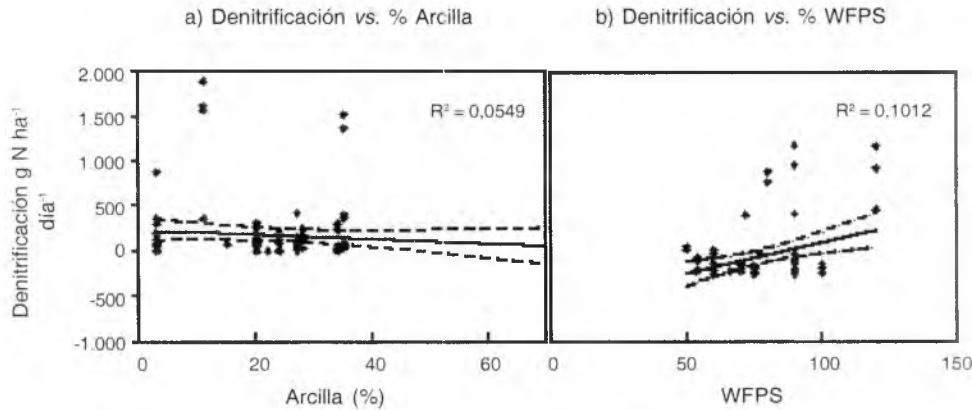


FIGURA 1. Denitrificación vs. Arcilla (a) y denitrificación vs. WFPS (b) con sus correspondientes coeficientes de determinación R^2 .

El modelo completo sería el siguiente:

$$\text{Denitrificación} = 1,3 + 0,026 * \text{WFPS} (\%) - 0,050 * \text{arcilla} (\%) + 0,005 * \text{dosis de N}$$

$$\text{kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \qquad \qquad \qquad \text{g N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

El régimen hídrico controla fuertemente la difusión del oxígeno hacia micrositios metabólicamente activos (Bandibas *et al.*, 1994) y, por lo tanto, domina también el *status* redox general del suelo. Las tasas de denitrificación aumentan abruptamente si la WFPS excede determinado valor crítico, que varía entre el 60 y el 80% (Doran *et al.*, 1990; Shelton *et al.*, 2000). Weitz *et al.* (2001) hallaron que la dinámica de la humedad edáfica controlaba también la proporción de fertilizante que se perdía en forma de óxido nitroso gaseoso. El contenido de arcilla del suelo se relacionó también significativamente ($p < 0,05$) con las emisiones de gases nitrogenados, aunque esta correlación fue negativa, de modo que los valores de pérdidas de nitrógeno por denitrificación aumentaban a medida que los suelos tenían menores cantidades de arcillas. La textura del suelo es una propiedad directamente relacionada con la capacidad de intercambio catiónico, por lo que es probable que suelos más finos, de mayor superficie específica, limiten la disponibilidad del amonio susceptible de transformarse en nitratos, en mayor medida que suelos más arenosos. Apoyando este concepto, Bandibas *et al.* (1994) hallaron una relación positiva entre las tasas de emisión de óxido nitroso y el porcentaje de arena del suelo. Puede observarse

en la Figura 1 para contenidos de arcilla de hasta valores cercanos al 20%, una alta dispersión en las pérdidas por denitrificación, mientras que a partir de ese valor las pérdidas son menos variables y de menor magnitud, lo que sugiere que a partir de porcentajes de 20% de arcilla la textura del suelo limita las pérdidas por denitrificación.

La elección del mejor modelo se muestra en el Cuadro 2 (se muestran solamente los modelos con 3 y 4 variables). Puede observarse que el mejor modelo de los posibles es aquel que incluye todas las variables propuestas, el modelo completo. Sin embargo, el modelo que incluye sólo al porcentaje de arcilla, el contenido de humedad y la dosis de fertilizante posee valores en los criterios de selección similares al modelo completo, por lo que sería un modelo adecuado para explicar o predecir pérdidas por denitrificación. El pH no influyó en la magnitud de estas pérdidas por denitrificación, coincidiendo con Simek y Cooper (2002), quienes observaron que el pH tiene mayor influencia sobre la relación N_2/N_2O de la denitrificación que sobre la magnitud total del proceso. Esto también se concluye de la selección de modelos del presente trabajo, donde la inclusión del pH (modelo completo, $R^2 = 0,5392$) no mejora el ajuste del modelo que no incluye el pH ($R^2 = 0,5303$).

CUADRO 2. Posibles modelos y sus correspondientes R², R² ajustado, Cp, cuadrado medio del error (MSE), y variables contenidas en cada modelo. Los modelos más adecuados se presentan en tipografía negra.

Número de Parámetros (p)	R ²	R ² ajustado	C (p)	MSE	Variables en el Modelo
4	0,5303	0,5102	4,3355	0,4224	WFPS arcilla fertilizante
4	0,4777	0,4553	12,2160	0,4698	WFPS pH arcilla
4	0,2714	0,2402	43,1011	0,6553	pH arcilla fertilizante
4	0,1693	0,1337	58,3964	0,7471	WFPS pH fertilizante
5	0,5392	0,5125	5,0000	0,4204	WFPS pH arcilla fertilizante

Efecto de la fertilización sobre la denitrificación

El efecto de la dosis de fertilización sobre las pérdidas por denitrificación fue significativo ($P < 0,05$), mientras que el tipo de fertilizante no resultó significativo sobre dichas pérdidas ($P = 0,43$, Cuadro 3). La dosis de fertilización nitrogenada y, por lo tanto, la cantidad de nitrógeno mineral edáfico, ejerce una influencia significativa en las pérdidas por denitrificación, relación ampliamente probada en la bibliografía (Mahmood *et al.*, 1998 a y b; Mulvaney *et al.*, 1997; Sanchez *et al.*, 2001). Palma *et al.* (1997) encontraron en suelos con cultivos de maíz de la Pampa Ondulada argentina aumentos en las pérdidas por denitrificación con la aplicación de fertilizante nitrogenado. Sin embargo, en suelos Argiudoles típicos del sudeste bonaerense, Sainz Rozas *et al.* (2004) hallaron que la fertilización con 210 kg de nitrógeno, a pesar de elevar el nivel de nitratos del suelo en todas las fechas de muestreo, aumentó significativamente las emisiones por denitrificación sólo en cuatro fechas de las trece tomadas durante el ciclo de un cultivo de maíz, mientras que la presencia de plantas, cuyo efecto principal sobre las emisiones es la disminución de agua edáfica por absorción radical, incidió en las pérdidas de óxido nitroso en nueve de las fechas.

En contraposición con la dosis, la forma química del fertilizante aplicado no influyó significativamente ($P < 0,05$) en las pérdidas por denitrificación, coincidiendo por lo hallado por Skiba *et al.* (1993) y Bergstrom *et al.* (2001). Por el contrario, Mulvaney *et al.* (1997) encontraron mayores emisiones cuando los fertilizantes nitrogenados fueron amoníaco

anhidro y urea, siendo este último un fertilizante de nitrificación rápida y, por lo tanto, considerado como de gran susceptibilidad a la denitrificación. La ausencia de oxígeno limita la nitrificación del amonio y, consecuentemente, disminuye el contenido de nitratos medio del suelo. Por lo tanto, es de esperar que en suelos con alto contenido de humedad, o donde la textura genere condiciones favorables para la ocurrencia de sitios anaeróbicos, las pérdidas por denitrificación sean mayores para fertilizantes basados en nitratos que aquellos basados en amonio. Sin embargo este trabajo revela falta de interacción entre el nivel de humedad y la forma química del fertilizante, lo que implica altas pérdidas del nitrógeno aplicado independiente de su forma química en condiciones de alta humedad. La interacción entre la forma química del fertilizante y la textura del suelo, su contenido de humedad y de carbono oxidable, no resultaron ser significativas. La porción del fertilizante perdido por denitrificación también presenta valores semejantes entre las distintas formas químicas del fertilizante (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado de emisiones de óxido nitroso gaseoso por denitrificación bajo un amplio rango de condiciones edáficas, ambientales y metodológicas, las variables edáficas que mejor explican dichas pérdidas son la humedad edáfica, el porcentaje de arcillas del suelo y la dosis de nitrógeno mineral aplicado como fertilizante. Los por-

CUADRO 3. Pérdidas totales y en proporción a lo aplicado según los distintos tipos de fertilizante.
Letras iguales implican ausencia de diferencias estadísticas significativas.

Tipo de fertilizante	Número de observaciones	Pérdidas por denitrificación (kg Nha ⁻¹ día ⁻¹)	Porcentaje de lo aplicado perdido por denitrificación (%)
Basado en amonio	30	0,295	0,396
Basado en nitratos	34	0,394	0,685
Basado en amonio y nitratos	26	0,356	0,550

centajes de las fracciones texturales arena y limo, así como el contenido de carbono orgánico, están fuertemente relacionados al porcentaje de arcillas, por lo que la inclusión de éstos no aporta significativamente a la explicación de la variabilidad en las pérdidas y, en cambio agrega inestabilidad a la búsqueda de modelos explicatorios. El contenido de humedad y el nivel de fertilización nitrogenada inciden positivamente en las pérdidas por denitrifi-

cación, mientras que el contenido de arcillas se relaciona negativamente con dichas pérdidas debido a la menor disponibilidad del amonio, especialmente con porcentajes de arcillas menores al 20%. El valor de pH parece no influir en la intensidad del proceso de denitrificación. La forma química del fertilizante aplicado no incidió significativamente en dichas emisiones, y tampoco interactuó con los niveles de humedad o condiciones texturales de los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- BANDIBAS, J.; A.VERMOESEN; C.J. DE GROOT and O. VAN CLEEMPUT. 1994. The effect of different moisture regimes and soil characteristics on nitrous oxide emission and consumption by different soils. *Soil Science* 158 (2): 106-114.
- BENCKISER, G. 1994. Relationships between field-measured denitrification losses, CO₂ formation and diffusional constraints. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 891-899.
- BERGSTROM, D.W.; M. TENUTA and E.G. BEAUCHAMP. 2001. Nitrous oxide production and flux from soil under sod following application of different nitrogen fertilizers. *Communications in soil science and plant analysis* 32 (3-4): 553-570.
- DORAN, J.W.; L.N. MIELKE and J.F. POWER. 1990. Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space. *Trans. 14th International Congress of Soil Science* 3: 94-99.
- EICHNER, M.J. 1990. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data. *Journal of Environmental Quality*: 19: 272-280.
- GALBALLY, I.E. 1995. The emission of nitrogen to the remote atmosphere: Background paper. P 27-53. *En: J.N. Galloway et al (ed.) The biogeochemical cycling of sulfur and nitrogen in the remote atmosphere*. D. Reidel Publ. Co., Boston, MA.
- KHALIL, M.I.; P. BOECKX; A.B. ROSENANI and O. VAN CLEEMPUT. 2001. Nitrogen transformations and emission of greenhouse gases from three acid soils of humid tropics amended with N sources and moisture regime. II. Nitrous oxide and methane fluxes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32 (17-18): 2909-2924.
- Mac NEIL, M.D. 1983. Choice of a prediction equation and the use of the selected equation in subsequent experimentation. *Journal of Animal Science* 57 (3): 1328-1336.
- MAHMOOD, T.; K.A. MALIK; S.R.A. SHAMSI and M.I. SAJJAD. 1998a. Denitrification and total N losses from an irrigated sandy-clay loam under wheat-maize cropping system. *Plant and Soil* 199: 239-250.

- MAHMOOD, T.; G.R. TAHIR; K.A. MALIK and S.R.A. SHAMSI. 1998b. Denitrification losses from an irrigated sandy-clay loam under a wheat-maize cropping system receiving different fertilizer treatments. *Biology and Fertility of Soils* 26: 35-42.
- MALLOWS, C.L. 1973. Some comments on Cp. *Technometrics* 15: 661-664.
- MONTGOMERY, D. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. 1991.
- MOSIER, A.R.; J.M. DUXBURY; J.R. FRENEY; O. HEINEMEYER and K. MINAMI. 1996. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil* 181: 95-108.
- MOSIER, A.R. 1998. Soil processes and global change. *Biology and Fertility of Soils* 27: 221-229.
- MULVANEY, R.L.; S.A. KHAN and C.S. MULVANEY. 1997. Nitrogen fertilizers promote denitrification. *Biology and Fertility of Soils* 24: 211-220.
- MYERS, R.H. 1986. Classical and Modern Regression. PWS Publishers. 1986. pp 50-289.
- PALMA, R.M.; M. RÍMOLO; M.I. SAUBIDET and M.E. CONTI. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils. *Biology and Fertility of Soils* 25: 142-146.
- ROBERTSON, G.P. 1993. Fluxes of nitrous oxide and other nitrogen trace gases from intensively managed landscapes: A global perspective: p. 95-108. *En: Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. ASA Spec. Publ. 55. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.*
- SAINZ ROZAS, H.R.; H.E. ECHEVERRÍA and L.I. PICONE. 2001. Denitrification in Maize under no-tillage: Effect of nitrogen rate and application time. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1314-1323.
- SAINZ ROZAS, H.; H. ECHEVERRÍA y P. BARBIERI. 2004. Desnitrificación en un suelo bajo siembra directa en función de la presencia de plantas de maíz y de la dosis de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 22(1): 27-35.
- SÁNCHEZ, L.; J.A. DIEZ; A. VALLEJO and M.C. CARTAGENA. 2001. Denitrification losses from irrigated crops in central Spain. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1201-1209.
- SAS Institute Inc. 1999 SAS/STAT Guide for personal computers, Version 8, edition Cary NC: SAS Institute Inc.
- SHELTON, D.R.; A.M. SADEGHI and G.W. McCARTY. 2000. Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition. *Soil Science* 165 (4): 365-371.
- SIMEK, M. and J.E. COOPER. 2002. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science* 53 (3): 345-354.
- SKIBA, U.; K.A. SMITH and D. FOWLER. 1993. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 25 (11): 1527-1536.
- STEVENS, R.J. and R.J. LAUGHLIN. 2001. Cattle slurry affects nitrous oxide and dinitrogen emissions from fertilizer nitrate. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1307-1314.
- WEITZ, A.M.; E. LINDER; S. FROLKING; P.M. CRILL and M. KELLER. 2001. N₂O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1077-1093.