

# Jerarquización de los factores reguladores de las emisiones de N<sub>2</sub>O: Influencia del cultivo

Vanina R. N. Cosentino<sup>1,2,3,\*</sup> y Miguel A. Taboada<sup>1,2,3</sup>

## Introducción

El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es el principal gas de efecto invernadero (GEI) generado por los suelos agrícolas y es también el principal foco de esfuerzo para mitigar las emisiones procedentes de este sector (IPCC, 2007; Snyder et al., 2009). Las emisiones de N<sub>2</sub>O desde el suelo varían en espacio y tiempo, dando lugar a sitios y momentos "calientes" de alta emisión, que son difíciles de predecir (McClain et al., 2003). Esta gran variabilidad resulta de la complejidad de las variables ambientales, la heterogeneidad del suelo y de las comunidades microbianas, que controlan los procesos de nitrificación y desnitrificación responsables de las emisiones de N<sub>2</sub>O (Firestone y Davidson, 1989). A menudo, la causa de grandes tasas de emisión de N<sub>2</sub>O en sitios y momentos "calientes" puede estar vinculada a una sola variable.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O son reguladas por la temperatura, la concentración de nitrato y la humedad del suelo, entre otros factores. Existe controversia acerca de cuál es el principal factor que regula las emisiones de N<sub>2</sub>O y de la forma en que un determinado factor las promueve o limita. Por un lado, Shelton et al. (2000) encontraron una relación lineal entre las emisiones de N<sub>2</sub>O y el contenido de agua del suelo, cuando este se encontraba entre 60 y 100% del espacio poroso lleno de agua (EPLLA). Por el otro, Schindlbacher y Zechmeister-Boltenstern (2004) observaron emisiones máximas entre 80 y 95% del EPLLA, seguidas de una disminución en las tasas cuando el ESPA es equivalente (Saturado de Agua), pero en el artículo se utiliza EPLLA superaba el 95%. Dobbie y Smith (2001) observaron una relación positiva entre las emisiones de N<sub>2</sub>O y la temperatura, mientras que Almaraz et al. (2009) encontraron una relación negativa entre ambas variables. Otro factor de emisión es generado por el tráfico agrícola y la siembra directa (SD), ya que ambos pueden aumentar la densidad aparente del suelo generando zonas anaeróbicas en los horizontes superficiales (Sasal et al., 2006). Esto puede llevar al aumento de las emisiones de N<sub>2</sub>O causadas por el proceso de desnitrificación (Beare et al., 2009).

Las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O dependen de la suma de las variables requeridas por las poblaciones microbianas del suelo para llevar a cabo los procesos de nitrificación y de desnitrificación. Si una o más de estas variables se ven afectadas, es posible que las emisiones de N<sub>2</sub>O disminuyan. La estequiometría ecológica evalúa el equilibrio entre elementos y factores que controlan los procesos ecológicos, y puede ofrecer un marco útil para

analizar los efectos ecológicos de estas limitaciones (Hessen et al., 2004). Este estudio tuvo como objetivo identificar y clasificar las variables del suelo que regulan las emisiones de N<sub>2</sub>O a lo largo del año, en suelos manejados bajo SD. La hipótesis de trabajo es que el marco conceptual de la estequiometría ecológica brinda un enfoque útil para la comprensión de la variación de las emisiones de N<sub>2</sub>O en condiciones de campo.

## Materiales y métodos

Se realizó una evaluación a campo entre abril de 2009 y febrero de 2011 para determinar las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O y sus principales factores reguladores. Se trabajó en un campo agrícola en la provincia de Buenos Aires, Argentina (34° 57' 29" S, 60° 13' 11" O), en un suelo Argiudol típico de la serie O'Higgins (arcilla 190 g kg<sup>-1</sup>; limo 400 g kg<sup>-1</sup>) (GeoINTA, 2012) con 35.2 g de materia orgánica kg<sup>-1</sup> y un pH de 5.7 (1:2.5 suspensión suelo: agua) en el horizonte A. El establecimiento en el cual se realizó el ensayo ha estado bajo SD desde hace al menos cinco años con rotaciones continuas de tres años cuya secuencia de cultivos es soja de primera – trigo/soja de segunda – maíz. En estas secuencias se aplican entre 85 y 95 kg N ha<sup>-1</sup> como urea al momento de la siembra del trigo y en el maíz entre los estadios fenológicos V3 y V5.

Se muestrearon estacionalmente seis parcelas en dos secuencias de cultivo temporalmente desfasadas durante dos años. La secuencia 1 comenzó con un rastrojo de soja de primera y fue: rastrojo de soja de primera – trigo/soja de segunda – maíz; mientras que la secuencia 2 comenzó con un rastrojo de soja de segunda y fue: rastrojo de soja de segunda – maíz – soja de primera. Esto permitió mediciones en distintos cultivos pero bajo las mismas condiciones ambientales (**Tabla 1**). También se midieron en dos ubicaciones dentro del lote: i) cabecera (alta intensidad de tráfico), y ii) fuera de cabecera (baja intensidad de tráfico).

Las muestras de gas se tomaron con cámaras estáticas no ventiladas (superficie = 0.13 m<sup>2</sup>, altura = 0.125 m), insertada en el suelo 0.05 m. Cada cámara tenía una base metálica y una tapa de plástico recubierto de aluminio. Dado que este ensayo se realizó en un campo en producción, hubo que retirar las cámaras una vez finalizados los muestreos y volver a colocarlas 24 horas antes del siguiente muestreo. Este procedimiento llevó a que fuera necesario añadir 15 mm de agua dentro de cada base luego de la inserción, con el fin de asegurar un sellado adecuado entre esta y el suelo antes del muestreo del gas. Esta adición de agua podría significar,

<sup>1</sup>Instituto de Suelo-INTA, <sup>2</sup>Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, <sup>3</sup>CONICET

\*Correo electrónico: cvanina@agro.uba.ar

**Tabla 1. Esquema de las dos secuencias de cultivos durante los dos años de muestreo, con las fechas de: toma de muestras, siembra, fertilización nitrogenada y cosecha.**

Secuencia 1	Residuo Soja			Trigo				Residuo Soja 2 <sup>da</sup>				Residuo Soja 2 <sup>da</sup>					Maíz							
	2009												2010									2011		
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
Muestreo		X		X			X				X			X			X		X		X			
Siembra				X				X										X						
Fertilización N				X															X					
Cosecha							X				X													
Secuencia 2	Residuo Soja				Maíz				Residuo Maíz					Soja 1 <sup>a</sup>										
	2009												2010									2011		
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
Muestreo		X		X			X			X			X			X		X		X		X		
Siembra							X											X						
Fertilización N							X																	
Cosecha										X														

en cada fecha de muestreo, un pequeño aumento en los valores de EPLLA.

El muestreo se llevó a cabo por la mañana, según lo descrito por Cosentino et al. (2012). Las muestras de gas se tomaron de la parte superior de la cámara a intervalos de 0, 20 y 40 minutos después de cerrar la cámaras. Las muestras de gas fueron extraídas con una bomba de vacío, e inyectadas en recipientes de 25 cm<sup>3</sup> previamente evacuados. La concentración de N<sub>2</sub>O fue determinada mediante el uso de un cromatógrafo de gases GC 6890 Agilent Technologies Network. Los flujos de gases se calcularon como el aumento de la concentración durante el periodo de incubación mediante la **Ecuación 1**.

$$f = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{m}{V_m}$$

**Ecuación 1**

Donde,  $\Delta C/\Delta t$  es el cambio en la concentración de N<sub>2</sub>O dentro la cámara durante el tiempo de incubación ( $\Delta t$ ),  $V$  es el volumen de la cámara (16.7 dm<sup>3</sup>),  $A$  es el área de suelo cubierta por la cámara (0.13 m<sup>2</sup>),  $m$  es el peso molecular de N<sub>2</sub>O y  $V_m$  es el volumen molar N<sub>2</sub>O. El flujo de gas se calculó como el incremento en la concentración durante el periodo de incubación. Conjuntamente con la toma del gas, se midió la temperatura del suelo cercano a las cámaras a los 0.10 m de profundidad y la temperatura del aire a la sombra. Después del muestreo del gas, fueron colectadas muestras de suelo del interior de las cámaras y llevadas al laboratorio. En el laboratorio se determinó la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, la densidad aparente, el contenido hídrico gravimétrico; y se calculó la porosidad total (PT) y el porcentaje del EPLLA.

Se realizó un análisis de árbol de regresión basado en el procedimiento propuesto por Morgan y Sonquist

(1963), para relacionar las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O con el resto de las variables medidas (Infostat, 2002). En aquellos casos en los que fue posible, se realizaron análisis de regresión entre las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O con alguna de sus variables reguladoras.

## Resultados

Las muestras de suelo obtenidas fuera de la cabecera presentaron principalmente estructura granular y en bloques sub-angulares, mientras que las muestras obtenidas en cabecera tenían principalmente estructura planar y masiva. A pesar de estos diferentes tipos estructurales, se observaron densidades aparentes similares (1.2 a 1.4 Mg m<sup>3</sup>) en ambas ubicaciones, infiriéndose que lo que cambió en el suelo fue la forma de los poros pero no su volumen total. Las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O fueron también similares entre las ubicaciones del lote (datos no mostrados).

Durante el periodo de estudio, las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O oscilaron entre -15 y 314 mg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, con una gran variabilidad entre replicas. Cuando se graficó la emisión de N<sub>2</sub>O en función de las variables del suelo medidas no se observaron relaciones con el EPLLA, y la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del suelo, pero en cambio, se observó un claro patrón de respuesta con la temperatura del suelo (**Figura 1**). Las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O fueron muy variables cuando la temperatura del suelo estuvo entre 14-23 °C; y menores y menos variables cuando la temperatura del suelo fue menor de 14 °C o mayor de 23 °C. También se observó una relación negativa entre la temperatura del suelo y el EPLLA con R<sup>2</sup> = 0.137 y P < 0.0001 (datos no mostrados).

El análisis del árbol de regresión mostró tres grupos de emisiones de N<sub>2</sub>O, cuyas tasas difirieron significativamente (p < 0.001). Grupo I: bajas tasa de emisión de N<sub>2</sub>O 4.22 ± 4.11 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, Grupo II:

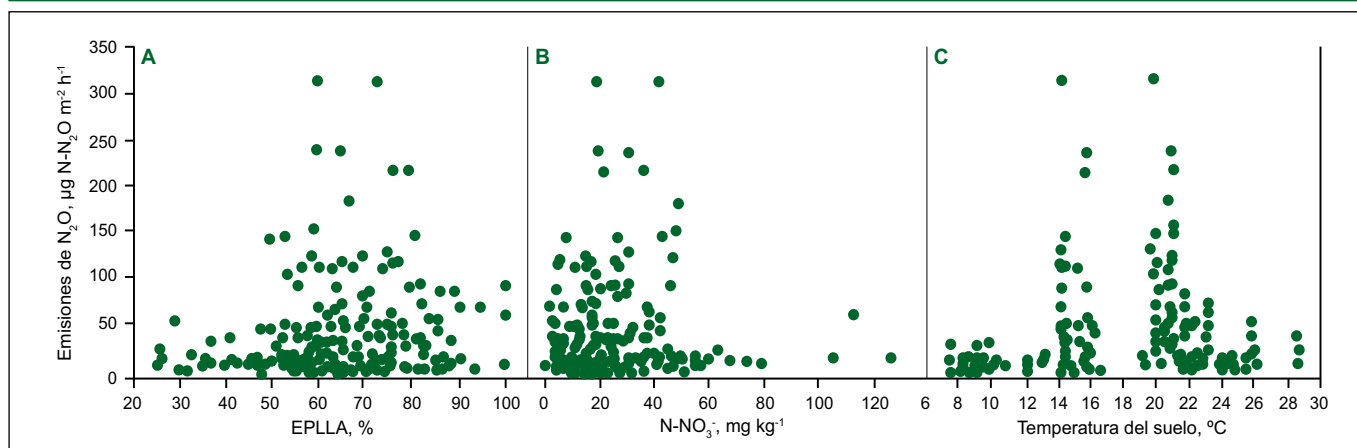


Figura 1. Distribución de tasas de emisión de  $N_2O$  en función del espacio poroso lleno de agua (EPLLA) (A), concentración de  $N-NO_3^-$  (B) y temperatura del suelo ( $^{\circ}C$ ).

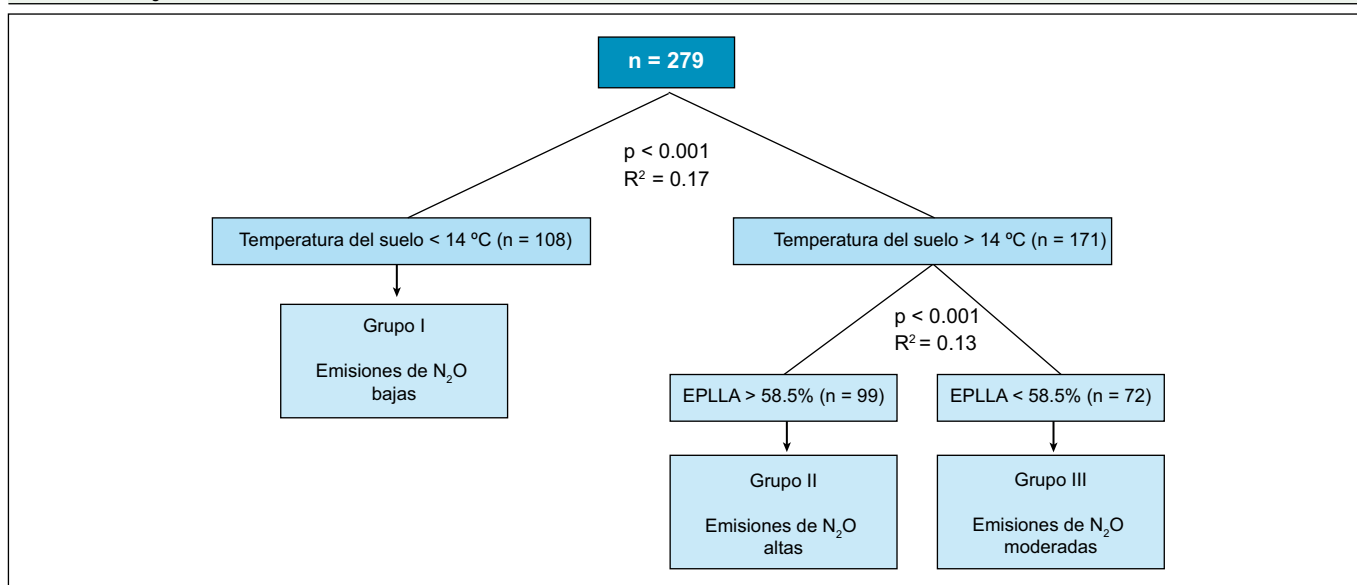


Figura 2. Resultados del análisis de árbol de regresión, mostrando las principales variables que afectan las emisiones de  $N_2O$ . n = tamaño muestral.

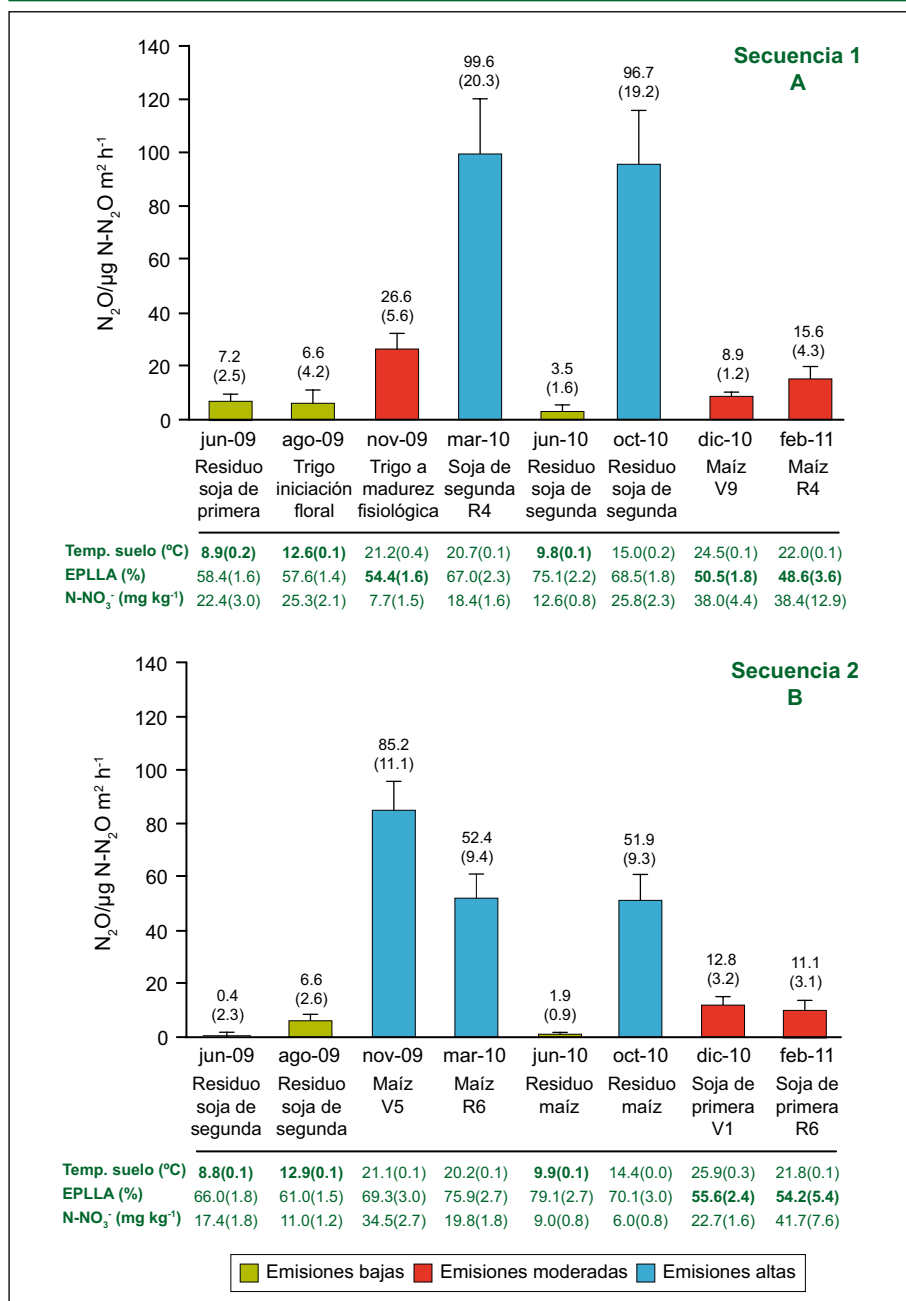
altas tasas de emisión de  $N_2O$   $61.87 \pm 4.07 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$  y Grupo III: moderadas tasas de emisión de  $N_2O$   $21.4 \pm 5.01 \mu g N-N_2O m^{-2} h^{-1}$  (Figura 2).

Las tasas bajas de emisión de  $N_2O$  (Grupo I) se produjeron durante el invierno, cuando las temperaturas del suelo fueron menores a  $14^{\circ}C$ . Esto se observó en ambas secuencias de cultivo para los muestreos de junio y agosto de 2009 y 2010 (Figura 3). En este caso, la tasa de emisión de  $N_2O$  no mostró relación con ninguna de las otras variables medidas. Las tasas altas de emisión de  $N_2O$  (Grupo II) fueron el resultado de temperaturas del suelo superiores a  $14^{\circ}C$  y de EPLLA mayores al 58.5% (Figura 3). Estos valores de emisión se observaron en los muestreos de noviembre de 2009 (secuencia de cultivos 2, Figura 3), y marzo y octubre de 2010 (secuencias de cultivo 1 y 2, Figura 3). Las tasas moderadas de emisión de  $N_2O$  (Grupo III) se produjeron cuando la temperatura del suelo superó los  $23^{\circ}C$ , y/o con EPLLA por debajo del 58.5% (Figura 3). Estos valores fueron observados en noviembre de 2009 (secuencia de cultivos 1, Figura 3), y diciembre de 2010 y febrero de 2011 (secuencias de cultivo 1 y 2, Figura 3).

Las tasas altas y moderadas de emisión de  $N_2O$  (Grupos II y III) se relacionaron positivamente con la concentración de  $N-NO_3^-$  del suelo. Sin embargo, las pendientes de las rectas que describen estas relaciones fueron diferentes para cada cultivo y grupo de emisión. Para los cultivos de gramíneas –trigo y maíz– y durante los periodos de barbecho con residuos de soja se observaron buenos ajustes y pendientes altamente significativas. Por el contrario, durante el cultivo de soja no se encontró una clara relación entre los valores de emisión de  $N_2O$  y la concentración de  $N-NO_3^-$  del suelo, independientemente del grupo de emisión (Figura 4).

### Discusión

Los valores de emisión de  $N_2O$  se dividieron en tres grupos, cada uno de los cuales se asoció con una o más de las variables de estudio. La temperatura del suelo fue la principal variable reguladora de las emisiones, separando al Grupo I (emisiones bajas) del resto (Figuras 2 y 3). En este grupo, la temperatura del suelo (menos de  $14^{\circ}C$ ) tuvo un efecto directo sobre las emisiones, probablemente por la reducción de la



**Figura 3. Emisiones de N-N<sub>2</sub>O durante el periodo de estudio para ambas secuencias de cultivos (barras). Las líneas verticales con límite máximo por encima de cada barra representan el error estándar. Los valores por encima de las barras corresponden a las emisiones medias y a su respectivo error estándar (entre paréntesis). Debajo de cada gráfico, se muestran los valores medios y el error estándar (entre paréntesis) para la temperatura del suelo, el espacio poroso saturado de agua (EPLLA) y la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del suelo.**

actividad microbiana a estas temperaturas (Keeney et al., 1979; Trumbore et al., 1996; Farquharson y Baldock, 2008; Maljanen et al., 2009).

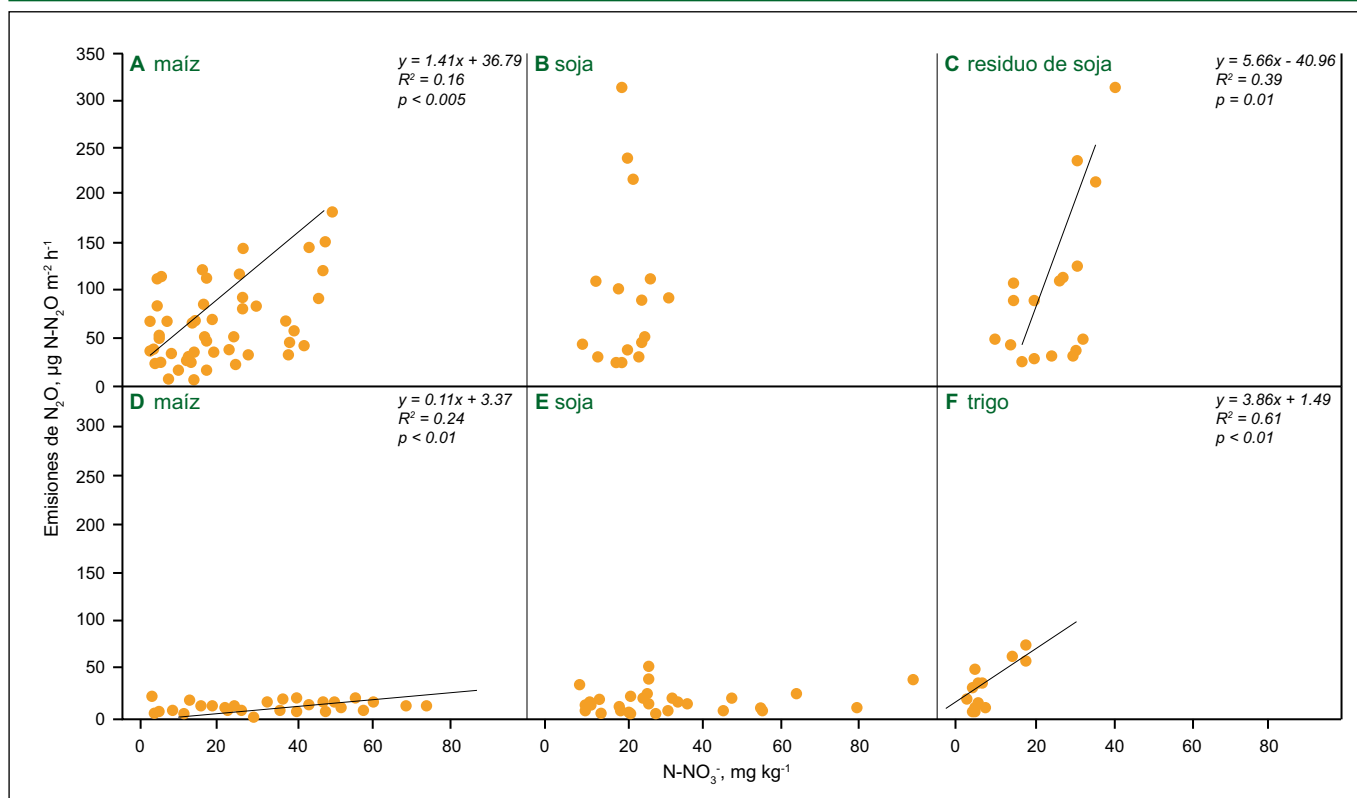
Los resultados de este estudio son coherentes con los observados por Trumbore et al. (1996), quienes encontraron una disminución de la actividad microbiana al disminuir la temperatura del suelo. Sin embargo, Maljanen et al. (2009) observaron emisiones de N<sub>2</sub>O a temperaturas bajo cero (-6.8 °C) en suelos que regularmente sufren procesos de congelamiento, donde es esperable una adaptación de las comunidades microbianas a las bajas temperaturas. Esto no debería

ocurrir en la región pampeana argentina, lo que sugiere que en nuestro sitio de estudio las comunidades microbianas probablemente no están adaptadas para producir N<sub>2</sub>O a bajas temperaturas, porque los suelos nunca se congelan.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O fueron elevadas y muy variables cuando la temperatura del suelo se encontró entre 14 y 23 °C y el EPLLA superó el 58.3% (Grupo II, Figuras 2 y 3). Estas variaciones estuvieron positivamente relacionadas con la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del suelo, en maíz y residuo de soja (Figura 4). Estos resultados concuerdan con Dalal et al. (2010), quienes encontraron una correlación positiva entre las emisiones de N<sub>2</sub>O y la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del suelo, cuando la temperatura del suelo varió entre 10 y 30 °C y el EPLLA entre 30 y 80%.

Las emisiones de N<sub>2</sub>O fueron moderadas cuando la temperatura del suelo fue mayor de 14 °C pero el EPLLA fue menor del 58.3% (Grupo III, Figuras 2 y 3). Estas emisiones de N<sub>2</sub>O fueron menores a las observadas en experimentos llevados a cabo bajo condiciones controladas, en los cuales se mostró un aumento en las tasas de emisión de N<sub>2</sub>O con el aumento en la temperatura hasta los 70 °C (Keeney et al., 1979; Schindlbacher y Zechmeister-Boltenstern, 2004). Estos altos valores de emisión posiblemente se deban a que la temperatura elevada conduce a un aumento en el tamaño de las zonas anaeróbicas del suelo. La mayor anaerobiosis está dada por el aumento en la tasa de respiración microbiana, lo que resulta en un mayor volumen de suelo desprovisto de oxígeno (Smith et al., 2003), favoreciendo la desnitrificación. Sumado a esto, la alta temperatura del suelo provoca un aumento en la actividad microbiana (Farquharson y Baldock, 2008) y un aumento en la solubilidad del gas, causando una mayor pérdida de N<sub>2</sub>O a la atmósfera antes de ser reducido a N<sub>2</sub> (Dalal et al., 2010).

Nuestros resultados de campo mostraron que el EPLLA disminuyó con el aumento de la temperatura del suelo (datos no mostrados). El secado del suelo por las altas temperaturas evita el desarrollo de zonas anaeróbicas,



**Figura 4.** Relación entre la tasa de emisión de óxido nítrico ( $N-N_2O$ ) y la concentración de nitratos  $N-NO_3^-$  del suelo para diferentes cultivos y residuos. A, B y C: altas tasas de emisión de  $N_2O$  (Grupo II). D, E y F: moderadas tasas de emisión de  $N_2O$  (Grupo III). Dentro de los gráficos se presenta la ecuación de la recta con su respectivo ajuste y nivel de significancia.

tales como las que se encuentran en experimentos en los que se controla el contenido de agua del suelo (Dobbie y Smith, 2001; Schindlbacher y Zechmeister-Boltenstern, 2004). Cuando un suelo se seca a menos del 60% de EPLLA, disminuye la importancia relativa de la desnitrificación como fuente de emisiones de  $N_2O$ , mientras la contribución relativa de nitrificación aumenta (Linn y Doran, 1984). Estas emisiones de  $N_2O$  generadas a partir de la nitrificación son por lo general menores comparadas con las generadas por la desnitrificación (Smith et al., 2003). Esto proporciona una explicación sobre el porqué de las emisiones moderadas en el Grupo III. En este caso, la influencia de la temperatura del suelo fue indirecta y mediada por el contenido hídrico del suelo.

La relación entre las emisiones de  $N_2O$  y la concentración de  $N-NO_3^-$  del suelo difirió entre los Grupos (II y III), y entre cultivos dentro de cada Grupo (Figura 4). En el Grupo II, se encontró una relación lineal entre las variables en suelo con cultivo de maíz y residuo de soja, mientras que no se encontró relación en el cultivo de soja (Figura 4 A-C). En el Grupo III, se encontró una relación lineal entre las variables en suelo con cultivos maíz y de trigo, y nuevamente no se encontró relación en el cultivo de soja (Figura 4 D-F).

Es interesante observar que los cultivos de soja no mostraron una relación lineal entre  $N_2O$  y  $N-NO_3^-$ , independientemente del grupo de emisión. Es probable que alguna variable no medida (por ejemplo C orgánico) pueda explicar las emisiones de  $N_2O$  desde este cultivo.

## Conclusión

El principal factor que reguló la emisión de  $N_2O$  fue la temperatura del suelo, seguida del espacio poroso lleno de agua y la concentración de  $N-NO_3^-$  del suelo. En este trabajo realizado en SD, se generó un ordenamiento jerárquico de los factores reguladores que fue utilizado para explicar cuál variable en particular limitó la tasa de emisión de  $N_2O$ . Esto estuvo de acuerdo con la hipótesis planteada de utilizar la estequiometría ecológica como herramienta para entender el equilibrio entre las variables que afectan la producción de  $N_2O$  por los microorganismos del suelo (Hesse et al., 2004).

Los resultados de este estudio mostraron como varió la emisión de  $N_2O$  y sus principales factores reguladores, dispuestos en un orden jerárquico dominado por temperatura del suelo, en un suelo agrícola bajo SD y clima templado. Estos resultados podrían ser extrapolados a otras áreas con similares condiciones de suelo, clima y manejo. Los grupos de emisión obtenidos a partir del análisis de árbol de regresión podrían ser útiles al momento de decidir cuándo tomar muestras del gas, ahorrando tiempo, dinero y esfuerzo de muestreo. Por ejemplo, las emisiones de  $N_2O$  son probablemente bajas o incluso insignificantes cuando la temperatura del suelo es inferior a 14 °C, algo que ocurre comúnmente durante el invierno en las regiones templadas. En este caso, tomar la temperatura del suelo reduciría el esfuerzo de muestreo. Por otro lado, cuando el EPLLA es mayor de 60% y la temperatura del suelo supera los 14 °C, lo que a menudo se produce durante el otoño y



la primavera, sería conveniente maximizar el esfuerzo de muestreo con el fin de capturar todas las variaciones ambientales.

## Bibliografía

- Almaraz, J.J., X. Zhou, F. Mabood, C. Madramootoo, P. Rochette, y B.L. Ma. 2009. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in southwestern Quebec. *Soil & Tillage Research*, 104:134-139.
- Beare, M.H., E.G. Gregorich, y P. St-Georges. 2009. Compaction effects on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 41:611-621.
- Cosentino, V.N.R., P.L. Fernández, S.A. Figueiro Aureggi, y M.A. Taboada. 2012. N<sub>2</sub>O emissions from a cultivated Mollisol: optimal time of day for sampling and the role of soil temperature. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 36:1814-1819.
- Dalal, R.C., I. Gibson, D.E. Allen, y N.W. Menzies. 2010. Green waste compost reduces nitrous oxide emissions from feedlot manure applied to soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136:273-281.
- Dobbie, K.E., y K.A. Smith. 2001. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N<sub>2</sub>O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science*, 52:667-673.
- Farquharson, R., y J. Baldock. 2008. Concepts in modelling N<sub>2</sub>O emissions from land use. *Plant & Soil*, 309:147-167.
- Firestone, M.K., E.A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. In: *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere: Report of the Dahlem Workshop on Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (Eds M.O. Andreae y D.S. Schimel). Wiley, New York. pp. 7-21.
- Hessen, D.O., G.I. Agren, T.R. Anderson, J.J. Elser, y P.C. De Ruiter. 2004. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecology*, 85:1179-1192.
- Infostat. 2002. Software estadístico. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- GeoINTA. 2012. Cartas de Suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Disponible en: <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/> [accessed on 26 November 2012].
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. En: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (Eds.). Disponible on-line en: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg3\\_report\\_mitigation\\_of\\_climate\\_change.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm) [accessed on 27 June 2013].
- Keeney, D.R., I.R. Fillery, y G.P. Marx. 1979. Effect of temperature on the gaseous nitrogen products of denitrification in a silt loam soil. *Soil Science Society of America Journal*, 43:1124-1128.
- Linn, D.M., y J.W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48:1267-1272.
- Maljanen, M., P. Virkajärvi, J. Hytönen, M. Öquist, T. Sparrman, y P.J. Martikainen. 2009. Nitrous oxide production in boreal soils with variable organic matter content at low temperature – snow manipulation experiment. *Biogeosciences*, 6:2461-2473.
- McClain, M.E., E.W. Boyer, C.L. Dent, S.E. Gergel, N.B. Grimm, y P.M. Groffman. 2003. Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems*, 6:301-312.
- Morgan, J.N., y J.A. Sonquist. 1963. Problems in the analysis of survey data, and a proposal. *Journal of the American Statistical Association*, 58:415-434.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo, y M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*, 87:9-18.
- Schindlbacher, A., y S. Zechmeister-Boltenstern. 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions from European forest soils. *Journal of Geophysical Research*, 109, D17302.
- Shelton, D.R., A.M. Sadeghi, y G.W. McCarty. 2000. Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition. *Soil Science*, 165:365-371.
- Smith, K.A., T. Ball, F. Conen, K.E. Dobbie, J. Massheder, y A. Rey. 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 54:779-791.
- Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, y P.E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133:247-266.
- Trumbore, S.E., O.A. Chadwick, y R. Amundson. 1996. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 272:393-396.\*