

GASES EFECTO INVERNADERO: EL ROL DEL SUELO EN LAS EMISIONES DE OXIDO NITROSO

Liliana Inés Picone¹

¹ *Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina. Correo electrónico: lilianapicone@yahoo.com.ar*

Desde el inicio de la Revolución Industrial a fines del 1800, la expansión de la agricultura, la tala de bosques y especialmente la quema de combustibles fósiles han conducido a incrementar la emisión de gases, que existen comúnmente en la naturaleza, como dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄). Estos gases conocidos como gases efecto invernadero (GEI) atrapan la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, contribuyendo de este modo al calentamiento global. Este proceso genera cambios climáticos, regionales y globales, ya que afecta ciertos parámetros climáticos como la temperatura y las precipitaciones lo cual incide en los sistemas ecológicos acuáticos y terrestres, la agricultura, los bosques, la salud humana y las fuentes de agua. Como consecuencia del incremento en la concentración de GEI la temperatura global promedio incrementó en 0,77°C desde 1850, la capa de nieve en el hemisferio norte disminuyó en 34,8 millones de km² y el nivel del mar promedio global se elevó en 19,8 cm (IPCC, 2007).

Globalmente, las fuentes primarias de emisiones de GEI según los sectores, son el suministro de energía (21,3%), la industria (16,8%), el uso de la tierra y quema de biomasa (10%), los edificios comerciales y residenciales (10,3%), y el tratamiento de desechos y aguas residuales (3,4%). La agricultura y el transporte explican el 14 y 11,3% del total de las emisiones, respectivamente, y la exploración, el procesamiento y distribución de combustibles fósiles el 11,3%. Según el diagnóstico de los modelos de proyección, si no se toman acciones para mitigar las emisiones, éstas continuarán aumentando gradualmente lo cual afectará la disponibilidad de agua y el flujo promedio de los ríos incrementará en las latitudes altas y en áreas tropicales húmedas, y disminuirá en las regiones secas localizadas en latitudes intermedias y en los trópicos secos, muchos ecosistemas no se adaptarán al cambio climático alterándose la biodiversidad y suministro de agua y alimentos, se afectará la vulnerabilidad de las personas a enfermedades, y el potencial de producción de alimentos incrementará si la temperatura aumenta en 1 a 3°C, pero decrecerá si aumenta aún más la temperatura. El CO₂ explica aproximadamente el 80% de las emisiones totales de GEI, de las cuales el 60% son debidas al uso de combustibles fósiles y el 20% a la deforestación, descomposición de biomasa y otras actividades. El CH₄, principalmente proveniente de la agricultura, es la categoría de gases siguiente más alta aportando con 14% a las emisiones globales y luego vendrían las emisiones de N₂O con 8% (IPCC, 2007). Los principales componentes de las emisiones agrícolas en el año 2005, sin considerar el cambio en el uso de la tierra, fueron el N₂O liberado por el suelo debido a la aplicación de fertilizante (38%), CH₄ de la fermentación entérica, CH₄ y N₂O del manejo de abono animal (38%), CH₄ del cultivo de arroz (11%), y CH₄ y N₂O de la quema de sabanas, bosques y residuos agrícolas (13%). Además de estas emisiones directas, el sector agrícola conduce a emisiones del sector industrial a través de la producción de fertilizantes y pesticidas, producción y operación de maquinaria y uso de energía. Si bien la agricultura contribuye a las emisiones de GEI, esta actividad también puede ayudar a mitigar las mismas mediante el empleo de ciertas estrategias como son reducir el consumo de combustible, favorecer el secuestro de carbono (C), mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno (N), incrementar la eficiencia de digestión del rumiante y capturar las emisiones gaseosas del abono y de los desechos.

Entre los GEI, el CO₂ es el más importante ya que explica aproximadamente 60% de las emisiones globales de GEI causadas por el hombre debido a la combustión de combustible fósil. La concentración de dicho gas incrementó de 280 ppmv a 380 ppmv desde comienzo de la Revolución Industrial hasta nuestros días (WMO, 2006), coincidiendo con un aumento en la quema de combustibles fósiles, deforestación y quema de bosques. Los factores que regulan las emisiones de CO₂ en los distintos ecosistemas dependen del nivel de oxígeno (O₂) y materia orgánica del suelo (Bouwman, 1990). Se considera que los suelos pueden secuestrar CO₂ en la materia orgánica,

reduciendo de este modo los niveles de CO₂ atmosférico (Lal, 2007), mientras se mejora la calidad y productividad del suelo. Los procesos de degradación en el suelo como erosión, compactación, pérdida de estructura, mineralización u oxidación de sustancias húmicas conducen a las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Bruce *et al.*, 1999). La conversión de áreas con vegetación natural como pasturas o bosques a áreas de cultivo, genera una pérdida del C orgánico del suelo de 20 a 50%, en los 40-50 años después del cambio de uso del suelo. Estas pérdidas se acentúan por bajos niveles de producción, laboreos intensivos, inadecuado uso de fertilizantes y enmiendas orgánicas, remoción de residuos de cosecha, quema de biomasa y falta de protección del suelo en contra de la erosión (Cole *et al.*, 1993; Lal, 1995).

El CH₄ es un gran contribuidor al efecto invernadero ya que absorbe la radiación infrarroja y también otra longitud de onda no captada por otros gases. El efecto potencial de calentamiento global del CH₄ es 23 veces mayor al del CO₂, y su concentración ha aumentado desde 0,7 ppmv antes de la Revolución Industrial a 1,7 ppmv en la actualidad (Rogers y Whitman, 1991). A diferencia del N₂O que ha estado incrementado de manera constante desde el período pre-industrial, el incremento en la concentración de CH₄ en la atmósfera ha sido lento en los años recientes, con un plateau en la concentración entre 1999 y 2002 (Dlugokencky *et al.*, 2003). Los cambios pueden deberse a muchas razones, naturales y antropogénicas, incluyendo una casi estabilización de las emisiones antropogénicas desde 1990 debido en parte a programas voluntarios y de regulación, y a la reestructuración económica y sectorial. Este gas se produce mediante reacciones termogénicas de gases atrapados en la corteza terrestre, a través de la quema de biomasa y biológicamente en ambientes anaeróbicos. Por este motivo, los ecosistemas como pantanos, zonas anegadas naturales o cultivadas, sedimentos, rumen de animales herbívoros son los principales hábitat de producción de CH₄ (Tyler, 1991). La formación biogénica de CH₄ se debe a la descomposición de la materia orgánica e involucra a bacterias anaeróbicas estrictas. Las emisiones de CH₄ son el resultado de la producción, oxidación y transporte de CH₄, procesos que son afectados por factores como la altura de la napa de agua, temperatura del suelo, tasa de difusión del CH₄, nivel de O₂ en el suelo y drenaje (Willison *et al.*, 1995).

El gas N₂O es de importancia por dos aspectos, tiene un tiempo de residencia largo en la atmósfera (>100 años) y es muy eficiente absorbiendo las radiaciones de longitud de onda larga, teniendo un potencial de calentamiento global 296 veces mayor que el CO₂. Este gas migra hacia la estratosfera donde está involucrado en una serie de reacciones que conducen a la destrucción de la capa de ozono, la cual actúa como filtro de la luz ultravioleta. Se ha estimado que duplicando la concentración de N₂O en la atmósfera se reduce en un 10% la capa de ozono (Crutzen y Ehhalt, 1977). Las concentraciones atmosféricas de N₂O han incrementado desde 270 ± 7 ppbv durante la era preindustrial hasta 319 ± 12 ppbv en 2005 (Snyder y Bruulsema, 2007). Este incremento, en gran parte, es resultado de la actividad humana (Hirsh *et al.*, 2006), aunque solamente el 8% de las emisiones de GEI antropogénicas son explicadas por el N₂O. Este gas es generado por fuentes naturales y relacionadas a la actividad del hombre. Con respecto a las fuentes primarias relacionadas con el hombre se incluyen el manejo de suelos agrícolas y abono animal, el tratamiento de residuos cloacales, la combustión de combustible fósil y la producción de ácido nítrico. Naturalmente, se produce a partir de una gran variedad de fuentes biológicas en el suelo y agua, particularmente por la acción microbiana en los bosques tropicales húmedos. Las fuentes que contribuyen a la producción global de N₂O son la producción intensiva de carne vacuna (30%), la quema de biomasa (10%), la industria (20%) y los suelos agrícolas (50%).

El N₂O proveniente del suelo es producido debido a la acción de microorganismos, fundamentalmente bacterias aunque en algunas situaciones como en los ecosistemas áridos o semiáridos pueden participar los hongos. (Crenshaw *et al.*, 2008). Específicamente, N₂O es el producto colateral de dos transformaciones importantes del N en el suelo: nitrificación y desnitrificación. La nitrificación es realizada por un grupo específico de bacterias nitrificadoras que ganan energía a partir de la oxidación del amonio (NH₄⁺) a nitrato, las cuales pueden producir N₂O durante la oxidación de NH₄⁺ a nitrito o durante la reducción no asimilatoria de nitrito cuando el suministro de O₂ es limitado. Los

microorganismos nitrificadores necesitan O_2 para nitrificar, de modo que se da en suelos más secos y bien aireados. El gas N_2O , también es emitido por desnitrificación la cual es considerada la principal fuente de N_2O desde el suelo a la atmósfera. Desnitrificación es la reducción biológica de compuestos oxidados de N a productos gaseosos, principalmente N_2 a través de una vía que incluye nitrito, óxido nítrico (NO) y N_2O . Dependiendo del tipo y la eficiencia de los microorganismos, el N_2O puede ser liberado a la atmósfera o reducido a N molecular el cual no es un compuesto peligroso. La proporción de N_2O con relación a N molecular ($N_2O:N_2$) varía en función del pH, la relación C:N del sustrato y el contenido de humedad del suelo. Bajas temperaturas, acidez, baja relación C:N y mayor aireación resultan en una mayor relación $N_2O:N_2$. Este proceso es llevado a cabo por bacterias heterótrofas que pueden vivir en ausencia de O_2 y por lo tanto, prosperarán en ecosistemas húmedos como son los bosques riparios o humedales donde el O_2 está limitado por el exceso de humedad. La humedad del suelo determinará que proceso se manifestará, no obstante cualquiera de los dos procesos podría resultar en emisiones de N_2O . Ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente en el suelo debido a la existencia de micrositios con diferente tensión de O_2 (Renault y Stengel, 1994). Otros factores que afectan la tasa de producción y emisiones del N_2O son la disponibilidad de N mineral y de compuestos orgánicos lábiles, y la temperatura del suelo. Estas variables son universales y aplicables a ecosistemas fríos-templados como cálidos-tropicales.

Los suelos agrícolas emiten aproximadamente 65-70% del N_2O total producido en los ecosistemas terrestres (Wrage *et al.*, 2004), y se debe principalmente al agregado de fertilizantes nitrogenados con lo cual se incrementa la cantidad de N disponible para desnitrificación y nitrificación. Sin embargo, esta pérdida gaseosa de N puede reducirse desarrollando estrategias que permitan un uso eficiente de este nutriente. La forma del fertilizante aplicado es importante, el abono animal aplicado en forma líquida genera mayores pérdidas de N_2O comparado con el fertilizante inorgánico o abono sólido. Otra práctica que afecta las emisiones de N es el momento de aplicación del fertilizante inorgánico u orgánico, lo ideal sería sincronizar con el momento de mayor absorción por parte del cultivo. Algunos productores han adoptado la labranza cero o mínima y en algunas áreas estas prácticas reducen la tasa de descomposición de los residuos vegetales, siendo por lo tanto un destino del C. Sin embargo, el mayor contenido de humedad puede causar más pérdidas de N_2O en suelos pobremente drenados que están bajo estos sistemas de labranza en comparación con la labranza convencional, balanceando de este modo el efecto beneficioso de esta práctica en la mitigación de GEI.

Las pasturas son, también importantes contribuidores a las emisiones de N_2O ($2,5 \text{ Tg N yr}^{-1}$) y representan el 18% de la emisión total de N (Lee *et al.*, 1997). El N_2O que es directamente emitido de los suelos bajo pasturas proviene del fertilizante nitrogenado aplicado, heces, orina, N_2 fijado biológicamente, efluentes de granjas y mineralización del N orgánico del suelo. El N_2O es indirectamente emitido a partir de la conversión de N del fertilizante o abono a amoníaco y óxidos de N, los cuales retornan al suelo en forma de NH_4^+ particulado, ácido nítrico y óxidos de N. El lavado y escurrimiento superficial del N aplicado hacia aguas subterráneas o superficiales pueden resultar en emisiones indirectas del N_2O a la atmósfera.

Los ecosistemas naturales sin perturbar, como boques de regiones templadas o humedales, generalmente emiten muy poco N_2O ; sin embargo, esta situación puede revertirse si ingresa N a partir de suelos agrícolas adyacentes o por deposición atmosférica (Lipps, 2010). La condición de que los bosques riparios y humedales saquen el N del ecosistema y lo retornen a la atmósfera los convierten en una herramienta muy útil para mejorar la calidad del agua. Si el N que se mueve por escurrimiento superficial desde los suelos agrícolas es interceptado por humedales o zonas ripariana, mediante el proceso de desnitrificación la mayoría del exceso de N es convertido en un gas inerte como N_2 , pero también se puede formar N_2O y entrar a la atmósfera. Por lo tanto, cuando se van a usar con zonas de amortización o ripariana para manejar el flujo de N hay que tener en cuenta que se puede mejorar la calidad del agua, pero también crear un problema de calidad del aire sino se maneja adecuadamente (Lipps, 2010).

Los suelos de bosques tropicales localizados en regiones húmedas representan el 21% de la producción global de N_2O , mostrando mayores pérdidas que los bosques de regiones templadas. Aparentemente esta condición es debido a que los bosques tropicales están más limitados por P que por N, y cualquier ingreso de N en estos ecosistemas genera flujos altos de NO y N_2O .

Las emisiones de N_2O desde el suelo no solo se dan en zonas agrícolas y bosques, sino que nuevos tipos de ecosistemas como son los paisajes urbanos pueden contribuir a las mismas. Estos sistemas tienen una mezcla de tipo de usos de la tierra, con diferentes patrones de ciclo y exportación de N. Con respecto a las emisiones de N_2O en áreas suburbanas y urbanas, existen incertidumbres. Aunque los pastizales urbanos exportan más N al medio ambiente que los bosques nativos, tienen una considerable capacidad de retención de N por lo que deben ser considerados en las evaluaciones del cambio del uso del suelo (Groffman *et al.*, 2009).

El balance global de las emisiones de N_2O es bastante incierto debido a la inherente variabilidad espacial y temporal de las emisiones, y a la falta de cuantificación de N_2O en algunas fuentes del suelo, entre ellas, en la agricultura tropical y suelos bajo vegetación natural, y en procesos indirectos, que no es la aplicación de fertilizantes o abonos, que conducen a la producción de N_2O como es el lavado y escurrimiento de nitratos hacia los cuerpos de agua, las emisiones y deposición de NH_3 y NO_x , y los barros cloacales (Mosier *et al.*, 1998). Una de las dificultades al medir la producción de N_2O es la gran variación en el tiempo, de un día a otro, y en el espacio de un m^2 de un campo a otro. Los coeficientes de variación asociados con la variabilidad espacial, frecuentemente exceden el 100% (Yates *et al.*, 2006). Las variaciones temporales asociadas con las emisiones de N_2O pueden variar en un orden de tres veces de magnitud, sobre un período de tiempo de días. El alcance y magnitud de esta variación no ha sido bien documentada en algunos ecosistemas, dado que se requieren numerosas determinaciones y por períodos de tiempo suficientemente largos como para captar la variación diurna, estacional y de un año a otro. A intensidades de muestreo relativamente frecuentes, una cada tres días, los flujos de N_2O estimados están dentro del $\pm 10\%$ del valor esperado y cuando el tiempo de intervalo entre muestreos incrementa, la desviación en el flujo acumulado incrementa de modo que un muestreo cada 21 días produce estimaciones dentro de $+60\%$ y -40% del valor real del flujo de N_2O acumulado (Parkin, 2008). En zonas con pastoreo donde hay una distribución no uniforme de grandes cantidades de excretas animal, incrementa aún más la variabilidad espacial de las emisiones de N. Las interacciones entre clima, propiedades del suelo y flujo de N_2O encontradas para sitios individuales no se pueden extrapolar a regiones más grandes, que difieren considerablemente en suelo y clima, con el fin de estimar las emisiones gaseosas. Kaiser y Ruser (2000) concluyeron y demostraron que las condiciones del sitio, principalmente clima y suelo, son más influyentes que la fertilización con N.

Las emisiones de N_2O pueden ser cuantificadas usando cámaras estáticas o métodos micrometeorológicos, éstos últimos eliminan el problema de la gran variabilidad que se da al medir en pequeña escala empleando las cámaras. Los micrometeorológicos tienen la ventaja de permitir el monitoreo de gases en el corto tiempo, minutos, o una integración diaria o a un tiempo de mayor escala. El IPCC propone una metodología default para calcular las emisiones de N_2O , asumiendo que las emisiones directas de N_2O desde el suelo pueden ser expresadas como una fracción constante del ingreso de N. Sin embargo, este factor de emisión está basado en un número limitado de datos, y además, es sabido que las emisiones de N_2O no solo dependen del ingreso de N sino, que también de otros factores como humedad, temperatura, contenido de C y pH del suelo (Granli y Bockman, 1994). Entre los modelos actuales, el DNDC (DeNitrification DeComposition) y el DAYCENT pueden ser usados para simular la producción de N_2O del suelo a escala regional y sitio específico, después de validar con los datos locales y realizar la apropiada modificación y verificación contra las emisiones de N_2O medidas bajo distintas prácticas de manejo.

El N_2O es un poderoso GEI, y los suelos son los principales contribuidores a las emisiones globales. Manejar el ingreso de N a los distintos ecosistemas sería una de las estrategias que ayudaría a reducir las emisiones de N_2O y hacer un uso más eficiente de este nutriente. Una mejor estimación de las emisiones atmosféricas de N_2O puede obtenerse si se logra conocer los factores que explican la

variación sistemática de las emisiones, entre diferentes sitios y temporadas. También se requiere información sobre los flujos de N₂O para una variedad de ecosistemas, con el fin de perfeccionar las predicciones del cambio climático en el futuro y evaluar posibles opciones de mitigación. El uso de modelos robustos es una alternativa valiosa para estimar las emisiones con fines de realizar un inventario.

BIBLIOGRAFIA

- Bouwman, A.F. 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. p. 61-127. In A.F. Bouwman (ed) *Soils and the Greenhouse Effect*. John Wiley and Sons. Chichester, England.
- Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Joanne, R. Lal and K. Paustian. 1999. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*. 54: 382-389.
- Cole, C.V., K. Flach, J. Lee, D. Saucrbeck, and B. Stewart. 1993. Agricultural sources and sinks of carbon. *Water Air Soil Poll.* 70: 111-122.
- Crenshaw, C.L., C. Lauber, R.L. Sinsabaugh, and L.K. Stavelly. 2008. Fungal control of nitrous oxide production in semiarid grassland. *Biogeochemistry*. 87:17-27.
- Crutzen, P.J., and D.H. Ehhalt. 1977. Effects of nitrogen fertilizers and combustion on the stratospheric ozone layer. *Ambio*. 6:112-117.
- Dlugokencky, E.J., S. Houweling, L. Bruhwiler, K.A. Masarie, P.M. Lang, J.B. Miller, and P.P. Tans. 2003. Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state?, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1992, doi:10.1029/2003GL018126.
- Granli, T., and O.C. Bockman. 1994. Nitrous oxide from agriculture. *Norw. J. Agricult. Sci. Suppl.* 12:7-124.
- Groffman, P.M., C.O. Williams, R.V. Pouyat, L.E. Band, and I.D. Yesilonis. 2009. Nitrate leaching and nitrous oxide flux in urban forests and grasslands. *J. Environ. Qual.* 38:1848-1860.
- Hirsch A.I., A.M. Michalak, L.M. Bruhwiler, W. Peters, E.J. Dlugokencky, and P.P. Tans. 2006. Inverse modeling estimates of global nitrous oxide surface flux from 1998-2001. *Global Biogeochem. Cycles* 20: GB1008, doi:10.1029/2004GB002443.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007. Fourth Assessment Report Intergovernment Panel on Climate Change*, WMO, Geneva, Switzerland.
- Kaiser, E.A., and R. Ruser. 2000. Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany: An evaluation of six long-term field experiment. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 166:533-542.
- Lal, R. 2007. Soil Science and the carbon civilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1425-1437.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and C dynamics. In: R Lal, JM Kimble, E Levine and BA Stewart (Eds), *Soils and Global Change*. CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL: 131-142.
- Lee D.S., A.F. Bouwman, W.A.H. Asman, F.J. Dentener, K.W. van der Hoek, and J.G.J. Olivier. 1997. Emissions of nitrous oxide, nitrous oxide, and ammonia from grasslands on a global scale. In S. C. Jarvis & B. F. Pain (Eds.), *Gaseous nitrogen emissions from grasslands* (pp. 353-371). Wallingford, UK. CAB International.

- Lipps L. 2010. Examining the role of soils in emissions of the potent greenhouse gas N₂O. *Crop, Soils, Agronomy CSA News*. 55:4-9.
- Mosier, A.R., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger, and O. Van Cleemput. 1998. Closing the global atmospheric N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr.Cycl. Agroecosystems*. 52: 225-248.
- Parkin, T.B. 2008. Effect of Sampling Frequency on Estimates of Cumulative Nitrous Oxide Emissions *J. Environ. Qual.* 37:1390-1395.
- Rogers, J.E., and W.B. Whitman. 1991. Introduction pp 1-7. In J. E. Rogers and W. B. Whitman (ed) *Microbial Production and Consumption of Greenhouse gases: Methane, nitrogen oxides, and halomethanes*. American Society for Microbiology, Washington, D.C.
- Renault, P., and P. Stengel. 1994. Modeling oxygen diffusion in aggregated soils: Anaerobiosis inside the aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1017-1023.
- Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, and T.L. Jensen. 2007. Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management – a literature review. *International Plant Nutrition Institute, Norcross, Georgia, USA*, 25 pp.
- Tyler, S.C. 1991. The global methane budget pp 7-39. In J. E. Rogers and W. B. Whitman (ed) *Microbial Production and Consumption of Greenhouse gases: Methane, nitrogen oxides, and halomethanes*. American Society for Microbiology, Washington, D.C.
- Willison, T.W., C.P. Webster, K.W.T. Goulding, and D.S. Powlson. 1995. Methane oxidation in temperate soils: Effects of land use and the chemical form of nitrogen fertilizer. *Chemosphere*. 30: 539-546.
- WMO. 2006. *Greenhouse gas Bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations up to December 2004*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Wrage, N., G.L. Velthof, H.J. Laanbroek, and O. Oenema. 2004. Nitrous oxide production in grassland soils: assessing the contribution of denitrification. *Soil Biology & Biochemistry*. 36: 229–236.
- Yates, T.T., B.C. Si, R.E. Farrell, and D.J. Pennock. 2006. Probability distribution and spatial dependence of nitrous oxide emission: Temporal change in hummocky terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:353-362.