

Fertilización nitrogenada y emisión de N₂O en la producción de maíz en la Comarca Lagunera

Jorge Luis García Sepúlveda¹

José Antonio Cueto Wong^{2§}

Aurelio Báez Pérez³

Vinisa Saynes Santillán⁴

¹Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez de Durango. Gómez Palacio, Durango, México. CP. 35000. (dep.faz.ujed@hotmail.com). ²Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Boulevard José Santos Valdés núm. 1200, Centro, Matamoros, Coahuila. CP. 27440. ³Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, Celaya, Guanajuato. CP. 38110. ⁴Colegio de Postgraduados-Laboratorio de Fertilidad-IRENAT. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México. CP. 56230.

§Autor para correspondencia: cueto.jose@inifap.gob.mx.

Resumen

Se estableció un experimento para cuantificar el nivel de emisiones de N₂O en el suelo en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de fertilización nitrogenada para la producción de maíz. Los tratamientos fueron los siguientes: 1) testigo, sin aplicación de nitrógeno (N); 2) aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N; y 3) aplicación de 400 kg ha⁻¹ de N. Se empleó un diseño experimental en bloques al azar con tres repeticiones. En julio de 2018 se establecieron los tratamientos correspondientes con maíz forrajero. Para efectuar las mediciones de emisión de N₂O se colocaron dos cámaras estáticas de PVC en cada unidad experimental: una en el bordo del surco (B), donde se aplicó el fertilizante, y otra en el fondo de éste (F). Se realizaron mediciones periódicas y al mismo tiempo se recolectaron muestras de suelo de 0 a 15 cm de profundidad para medir el contenido de humedad y N inorgánico (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) y temperatura del suelo. El contenido de N inorgánico del suelo fluctuó en promedio de 28 a 59 mg kg⁻¹ de suelo y el flujo de emisiones de N₂O fluctuó de 22 a 60 g ha⁻¹ día⁻¹. Ambos se relacionaron estrechamente con las dosis crecientes de fertilización nitrogenada, tanto en el bordo como el fondo del surco, la R² fluctuó entre 0.81 y 0.99. La tendencia se ajustó a un modelo exponencial. La producción forraje seco y gano alcanzaron 17.5 y 9.6 t ha⁻¹, respectivamente, con la dosis de fertilización nitrogenada más alta. No hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre 200 y 400 unidades de N ha⁻¹, lo cual indicó un bajo aprovechamiento de N por el cultivo y mayor emisión de N₂O con ésta última.

Palabras clave: emisión de gases de efecto invernadero, fertilización, nitrógeno del suelo.

Recibido: julio de 2021

Aceptado: septiembre de 2021

Introducción

La Comarca Lagunera, es una zona que comprende cinco municipios del estado de Coahuila y 10 de Durango. Es la región más importante en producción de leche en el país, por lo cual la demanda de forraje para la alimentación del ganado es importante (Yescas *et al.*, 2015). En 2020 se establecieron alrededor de 68 000 ha de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y otra superficie semejante para producción de grano (SIAP, 2020), de las cuales 64% se cultivaron con riego por gravedad y 36% con bombeo de pozo profundo. Debido a la escasa precipitación, que es de 225 mm anuales, se requiere del riego para su cultivo, por lo cual los sistemas de producción que prevalecen son generalmente intensivos y tecnificados.

La concentración atmosférica de óxido nitroso (N_2O) en el periodo preindustrial era de 269 partes por billón (ppb); sin embargo, en 2021 la concentración atmosférica se estima en 334 ppb (NOAA, 2021). Aproximadamente 70% de las emisiones antropogénicas anuales en el mundo son derivadas de la producción agropecuaria (Signor *et al.*, 2013). De acuerdo con González-Estrada y Camacho-Amador (2017) en México las emisiones de N_2O producidas por las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en la agricultura representan alrededor de 25 000 Gg anualmente.

El uso de insumos agrícolas también es excesivo, especialmente el empleo de fertilizantes nitrogenados, debido al bajo contenido de reservas orgánicas que contienen los suelos agrícolas (Cueto *et al.*, 2006). Sin embargo, el uso irracional de los fertilizantes provoca problemas de contaminación ambiental, como lixiviación de nitratos ($N-NO_3^-$) y emisiones NO_x , especialmente óxido nitroso (N_2O) (Saynes Santillán *et al.*, 2016). El primero contribuye a la contaminación de los mantos acuíferos, por lixiviación y el segundo, considerado un potente gas de efecto invernadero, que contribuye en mayor medida con el fenómeno del cambio climático global.

Otro factor importante que se suma a la problemática de contaminación en la cuenca lechera de la Comarca Lagunera es la elevada producción de estiércol de bovino. De acuerdo con Figueroa-Viramontes *et al.* (2009) y Figueroa-Viramontes *et al.* (2015) en La Comarca Lagunera se producen, en base seca, cerca de 1 000 000 t año⁻¹, mientras que el N excretado se estima en 44 154 t año⁻¹. De acuerdo con los autores, el balance regional expresado como N incorporado y el requerimiento de este para la producción de forrajes es de 187 kg ha⁻¹.

Lo anterior, indica que la incorporación de este subproducto a los terrenos de cultivo, en teoría debería requerir la aplicación de una dosis moderada de fertilizante nitrogenado para alcanzar los máximos rendimientos; sin embargo, el uso irracional de este insumo en la región es generalizado, por lo cual el impacto ambiental que ocasiona el exceso de N, que se suministra en los sistemas de producción agrícola, es grave. Acevedo-Peralta (2017) menciona que se aplican a suelos agrícolas de la región hasta 150 t ha⁻¹ de estiércol fresco para la producción de maíz sin un tratamiento previo.

En un estudio realizado en la Comarca Lagunera, se utilizó N^{15} , encontrándose que el maíz forrajero recupera entre 30 y 50% del N aplicado como fertilizante (Cueto *et al.*, 2013). Otro estudio efectuado en la región con pasto sudán (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), presentó resultados semejantes (Quiroga-Garza *et al.*, 2010). De acuerdo con Figueroa-Viramontes *et al.* (2015) la eficiencia de aprovechamiento del N por el cultivo, a partir del fertilizante químico, en la producción de maíz forrajero en la región es de 40%, mientras tanto el N que se aplica a partir del

estiércol de bovino incorporado al suelo apenas llega al 15%. Saynes *et al.* (2016) señalan que las actividades agropecuarias son la tercera causa de generación de emisiones de gases de efecto invernadero, con una contribución de 12% a las emisiones nacionales, generadas por la fermentación entérica, el manejo del estiércol y por el uso de fertilizantes en áreas de producción.

Las pérdidas de N en forma de emisiones de N₂O en los sistemas de producción de maíz forrajero no han sido cuantificadas en La Comarca Lagunera, por lo cual se plantea la hipótesis de que contribuyen de manera importante con las emisiones de gases de efecto invernadero que emite el sector agropecuario. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el flujo de este gas (N₂O) en respuesta a dosis crecientes de fertilización nitrogenada aplicados al maíz forrajero, bajo las condiciones de la Comarca Lagunera.

Materiales y métodos

En el ciclo de 2018 se realizó un experimento bajo condiciones de riego en el Campo Experimental La Laguna (CELALA), ubicado en Matamoros, Coahuila, México. El Campo Experimental se ubica al suroeste del estado, en las coordenadas 103° 13' 4" longitud oeste y 25° 31' 41" latitud norte, a una altura es de 1 110 msnm. La temperatura media anual es de 22.6 °C, mientras que la precipitación promedio anual es de 258 mm (Villa-Castorena, 2005).

Características fisicoquímicas del suelo

El suelo fue de textura franco-arcillosa con 47% de arena, 21.8% de limo y 31.3% de arcilla. La capacidad de campo se estimó 26.5% y el punto de marchitez permanente en 13.1%, con na capacidad de retención de humedad aprovechable de 13.1% (Pedroza-Sandoval *et al.*, 2015). El pH fue alcalino (8.4), con una conductividad eléctrica de 0.52 dS m⁻¹ y tuvo un contenido de materia orgánica muy bajo (1.1%). El contenido de P extractable y N inorgánico (N-NO₃⁻+N-NH₄⁺) fueron de cerca de 13 mg kg⁻¹ de suelo.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron tres tratamientos: (1) sin fertilización nitrogenada; (2) 200 unidades de N ha⁻¹; y (3) 400 unidades de N ha⁻¹ (Cuadro 1). Los agricultores en la Comarca Lagunera frecuentemente aplican 400 o más unidades de N ha⁻¹ para la producción de maíz. Se estudió en los tratamientos evaluados las emisiones de N₂O a partir de estas dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Se utilizó un diseño experimental en bloques completamente al azar con tres repeticiones. El análisis estadístico se efectuó mediante el Software: Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4 (SAS institute, 2008). La comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tukey, $\alpha= 0.05$.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados.

Tratamiento	Unidades de N (kg N ha ⁻¹)	Urea (kg ha ⁻¹)
1	0	0
2	200	435
3	400	970

Todos los tratamientos recibieron 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en forma de ácido fosfórico (52% P₂O₅).

Manejo agronómico

Durante el ciclo de invierno de 2013, en el sitio experimental se estableció avena forrajera, sin fertilizar, con el objetivo de homogenizar las condiciones edáficas del suelo. Posteriormente se efectuaron labores de labranza y se efectuó la nivelación del terreno con equipo Laser Plane®. El terreno se barbechó con arado vertical y posteriormente se dieron dos pasos de rastra cruzada, finalmente se hicieron los surcos con una separación entre ellos de 0.76.

Siembra y fertilización

La siembra se realizó en suelo seco el 12 de julio de 2018 con una sembradora neumática de precisión Gaspardo modelo suprema. Se empleó la variedad de maíz blanco ‘Cimarrón’ de Asgrow®. La semilla se trató un día antes de la siembra con 500 ml de Tiametoxam (350 g L⁻¹ de ia.) por cada 100 kg de semilla, para prevenir el ataque de plagas del suelo. La densidad de siembra fue de 105 000 semillas por hectárea (8 semillas por metro lineal).

Se aplicó 100% del fósforo y el 50% de la dosis de N correspondiente a cada tratamiento en el momento de la siembra para después aplicar el riego de establecimiento. A los 34 días después de siembra (DDS) se realizó una labor de cultivo y aporque con una cultivadora de vertederas, con el fin de romper la ‘costra’ del suelo, eliminar maleza y aplicar la segunda fertilización nitrogenada (50% restante), para posteriormente aplicar el primer riego de auxilio (15 de agosto).

Riegos

El riego se aplicó mediante tubería de compuertas suministrado por un pozo. La lámina de riego total se estimó en 0.84 m. Se aplicó un sobre riego para favorecer la emergencia de la semilla y cuatro riegos de auxilio durante el ciclo de crecimiento como se muestran en el (Cuadro 2). La cantidad de riegos se efectuó con base en las necesidades hídricas del cultivo y la baja retención de humedad del suelo arenoso (13.1%).

Cuadro 2. Frecuencia de riegos, periodicidad y lámina de riego.

Tipo de riego	Fecha	Días después de siembra	Lámina de riego aplicada (cm)	Lámina de riego acumulada (cm)
Riego de siembra	12 de julio	0	18	18
Sobre riego	23 de julio	10	09	27
1° auxilio	15 de agosto	34	18	45
2° auxilio	09 de septiembre	59	14	59
3° auxilio	25 de septiembre	75	12	71
4° auxilio	08 de octubre	88	13	84

Control de plagas y maleza

Se realizaron periódicamente monitoreos de plagas en el cultivo, en especial durante las etapas fenológicas de emergencia, floración y llenado de grano. Para control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) se aplicó permetrina (0.4% GR) granulada directamente al cogollo

(‘salereado’) cuando el cultivo tenía 15 DDS, posteriormente se realizaron tres aplicaciones de clorpirifós etil 44.5% CE a los 25, 33 y 65 DDS. A los 60 DDS se aplicó una mezcla de imidacloprid (19.6%) + betacyflutrim (8.4%) en dosis de 500 ml ha⁻¹ para el control de diabrótica (*Diabrotica* spp.) y gusano elotero (*Heliothis zea*). Para el control de araña roja se realizaron dos aplicaciones de Abamectina (18 g ia. L⁻¹) a una dosis de 1 L ha⁻¹ a los 8 y a los 32 DDS.

El control de maleza se efectuó principalmente de manera manual, sin embargo, se realizaron dos aplicaciones de herbicida: la primera a los 34 DDS en dosis de 1 L ha⁻¹ de dimetil amina (2,4 D 49.4% S) en 300 L de agua para maleza de hoja ancha, la segunda a los 51 DDS, Nicosulfurón (4.21%) para maleza de hoja angosta, en especial zacate Johnson (*Sorghum halepense*).

Variables meteorológicas y edáficas

Se registraron datos de temperatura y precipitación en la estación meteorológica automatizada del Campo Experimental a lo largo del ciclo del cultivo y la dinámica de N inorgánico (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) en el suelo de 0 a 15 cm de profundidad, así como la humedad gravimétrica. Las muestras de suelo se recolectaron alrededor de las cámaras de PVC durante cada toma de muestras de gases.

Medición de la emisión de óxido nitroso

En cada parcela experimental se colocaron, permanentemente durante el ciclo de cultivo, dos cámaras de flujo estático de PVC (Matson *et al.*, 1996) de seis pulgadas de diámetro y volumen de 3 216.9 ml. Éstas se ubicaron en los surcos centrales de cada parcela: una en la parte alta del bordo (B) y otra en el fondo de este, para evaluar el nivel de emisiones de N₂O en ambas condiciones del terreno de cultivo (F) (Figura 1). Cada cámara tenía una tapa para cerrarla herméticamente al momento de tomar las muestras de gas, las cuales se realizaron una o dos veces por semana.



Figura 1. Colocación de las cámaras de flujo estático en el bordo (B) y fondo del surco (F) con el material necesario para el muestreo de gases.

En cada fecha se recolectaron muestras de gas a los 0, 10, 20 y 30 min, utilizando jeringas de 20 cm³, las cuales se introdujeron a través de un septo ubicado estratégicamente en las tapas de las cámaras. Antes de tomar la primera muestra (tiempo cero) se introdujo la aguja a través del septo de la cámara y por medio de bombeo de la jeringa se mezcló el aire de la atmósfera interna de la

cámara. Después de esto se procedió a tomar las muestras en los tiempos especificados. Las muestras fueron almacenadas en viales sellados de vidrio ámbar (14 ml) previamente despresurizados.

Las muestras de gas se analizaron en un cromatógrafo de gases (Shimatzu Modelo GC-2014 Greenhouse gas Analyzer). El cromatógrafo está equipado con un detector de captura de electrones (ECD) que cuenta con una fuente de radiación de ^{63}Ni y funciona a una temperatura de 325 °C. Para la calibración del cromatógrafo se utilizó un estándar certificado (Scotty Analyzed Gases, USA) con concentración de 1 ppm de N_2O . Para el control de calidad interno se empleó un estándar con concentración de 0.54 ppm de N_2O .

Todos los muestreos de gases se realizaron a las 10:00 am. Antes de cada muestreo se tomó la temperatura ambiental y una muestra en blanco, que se recolectó del ambiente fuera de las cámaras. La evaluación de las emisiones de N_2O se calculó de acuerdo con Millar *et al.* (2018) mediante la siguiente ecuación: $\text{N}_2\text{O} = (\alpha \times V \times WA \times 60) / (A \times MV_{\text{corr}})$. Donde: α es la pendiente de la línea de concentración vs tiempo obtenida en cada muestreo y se mide en (ppmv min^{-1}), V es el volumen del espacio superior de la cámara (L), WA es la masa del N en N_2O (28), 60 es la conversión de horas a minutos, A es el área de superficie del suelo cubierta por la cámara (m^2) y MV_{corr} es el volumen molecular estándar corregido por temperatura y presión de la localidad.

Los flujos por hora y por m^2 se convirtieron a flujos diarios por hectárea ($\text{g N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{d}^{-1}$). Se obtuvieron los flujos promedio entre una fecha de medición y otra, por tratamiento. La cantidad de N_2O acumulada se calculó a partir de la siguiente ecuación: $C_B = C_A + \left(\frac{D_A + D_B}{2}\right) * (B - A)$. Donde: C_A = emisión de gases acumulada en el día A anterior al día B; D_A = flujo diario de gas en el día A; D_B = flujo diario de gas en el día B; y A/B = número día.

Humedad del suelo y medición de N inorgánico

Al mismo tiempo que se efectuaron las mediciones de emisión de N_2O en campo se recolectaron muestras de suelo (0-15 cm) y se colocaron en botes de aluminio previamente pesados y etiquetados, tanto en el bordo como en el fondo del surco en 24 ocasiones. Se estimó la humedad gravimétrica del suelo, para lo cual las muestras se pesaron primero en húmedo en el sitio de muestreo, posteriormente se secaron en estufa durante 24 h a 105 °C, para después registrar el peso en seco. Antes de secar las muestras de suelo se extrajo una submuestra húmeda de 9 g y se agregaron 90 ml de KCl 1M y se agitó (1 min).

Posteriormente se dejó reposar 24 h, a temperatura ambiente y se volvió a agitar (1 min), se reposó (60 min), luego se filtró (microfibra de vidrio Whatman® 1 μm GF/B). Se transfirió una alícuota (20 ml) a un vaso de polipropileno y posteriormente se evaluó en contenido de N inorgánico ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-H}_4^+$) por arrastre de vapor y destilación Kjeldahl (Jackson, 1976).

Resultados y discusión

Las condiciones de temperatura y precipitación que imperaron a lo largo del ciclo de cultivo del maíz se presentan en la Figura 2. El volumen de lluvia durante 2018 fue de 282.2 mm, 30 mm por encima de la precipitación promedio mensual. Del 12 de julio al 11 de octubre, período que

comprendió el ciclo del cultivo, las temperaturas promedio diurnas fueron cálidas y fluctuaron entre 20 y 25 °C, mientras que la distribución de las lluvias fue irregular y de solo 136.4 mm, 48.3% del total de la precipitación anual. El evento más fuerte se registró el 14 de septiembre, con 48.8 mm de precipitación (Figura 2). Por otra parte, las temperaturas medias mensuales, durante el mismo período, fluctuaron entre 25.1 y 27.5 °C, siendo agosto el mes más cálido.

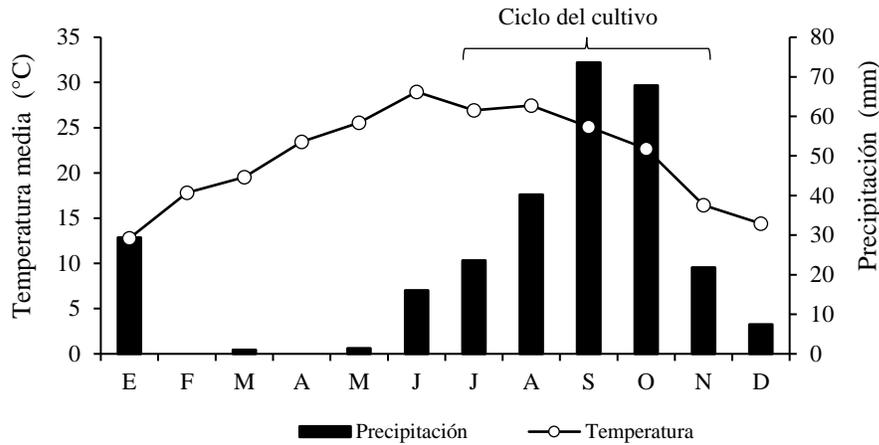


Figura 2. Diagrama ombrotérmico del Campo Experimental la Laguna, Matamoros, Coahuila, 2018.

Contenido de N inorgánico en el suelo

El contenido promedio de N inorgánico del suelo ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) se relacionó con las dosis aplicadas de fertilizante nitrogenado, tanto en el bordo, como en el fondo del surco. La tendencia se ajustó a un modelo estadístico exponencial, obteniéndose un coeficiente de correlación (R^2) que fluctuó entre 0.81 y 0.99 (Figura 3). El contenido promedio de N inorgánico en el suelo, que puede considerarse como base, en el tratamiento donde no se aplicó fertilizante, fue de 28 mg kg⁻¹ de N. Con la aplicación de 200 kg de N ha⁻¹ la disponibilidad de este elemento aumentó 60%, con respecto al tratamiento anterior y cerca del doble cuando de aplicaron 400 kg de N ha⁻¹.

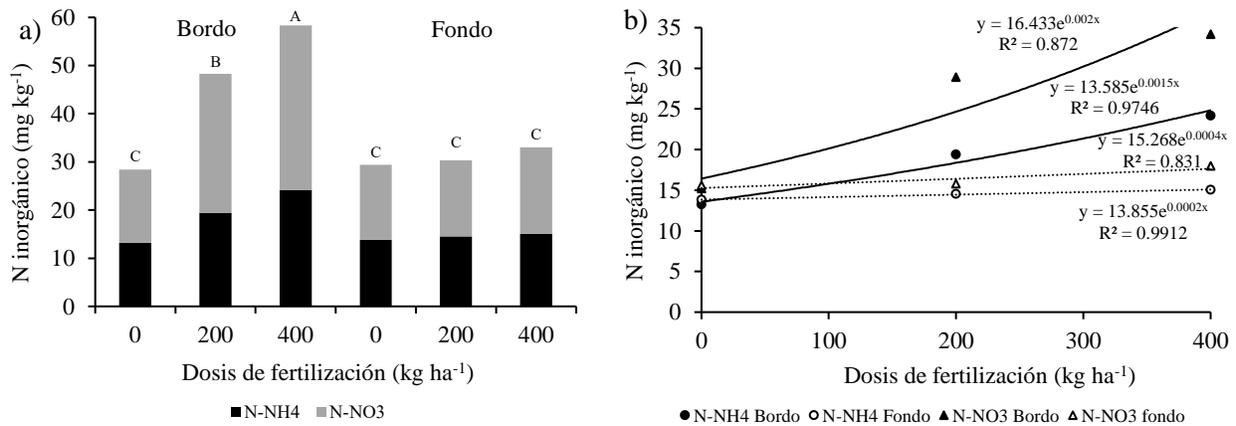


Figura 3. Contenido promedio de N inorgánico. a) $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ en bordo y fondo del surco; b) relación entre contenido de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ y dosis de fertilización nitrogenada en bordo y fondo del surco.

Sin embargo, en el fondo del surco el aumento de N fue más tenue, apenas más notorio en el tratamiento con aplicación de 400 kg de N ha⁻¹ y no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) para este sitio de muestreo.

En términos generales se observó que, del N inorgánico total, la fracción en forma de N-NO₃ fue en promedio 60% mayor en los tratamientos con aplicación de 200 y 400 kg ha⁻¹ de fertilizante, y el resto correspondió a la forma amoniacal (N-NH₄). Un alto contenido de nitratos en el suelo cuando no está sincronizado con la demanda del cultivo generalmente se asocia a una mayor pérdida del nitrógeno por lixiviación y emisión a la atmósfera. Las concentraciones de nitrato encontradas en este estudio coinciden con lo reportado por Millar *et al.* (2018).

Emisiones diarias N₂O

Los resultados promedio del flujo de N₂O del suelo, en el sistema de producción de maíz, mostraron que hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos. El flujo de este gas de efecto invernadero aumentó en función de las dosis de fertilización nitrogenada, y la tendencia se ajustó a un modelo exponencial, tanto en el bordo como en el fondo del surco (Figura 4a). Se observó que el flujo de N₂O en el tratamiento donde no se aplicó fertilizante, en ambos sitios, fue semejante ($p < 0.05$), con 22 g ha⁻¹ día⁻¹. En contraste, con la aplicación de 400 unidades de N en el bordo del surco, éste fue más del triple, mientras que, en fondo de este, ésta diferencia fue de más del doble; evidentemente hubo migración del N aplicado como fertilizante del bordo del surco hacia el fondo de este.

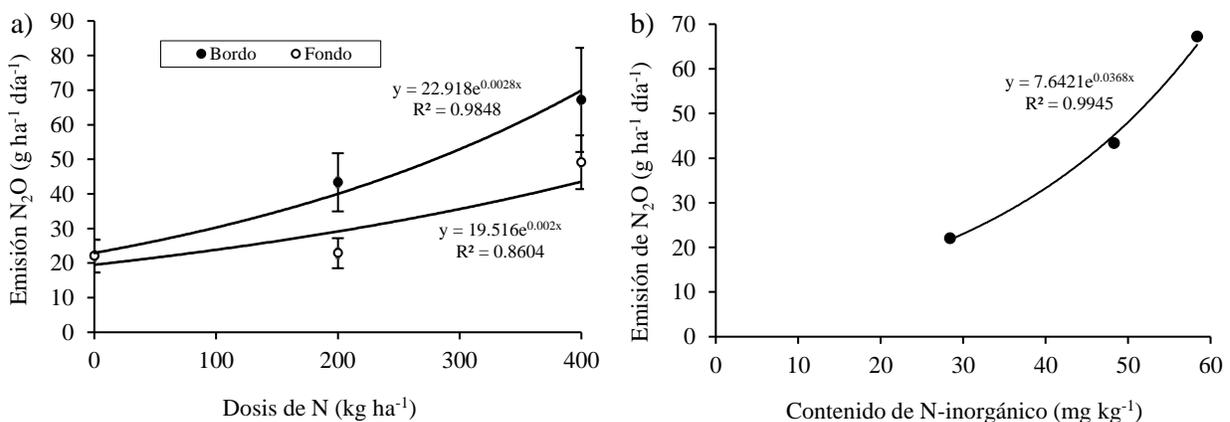


Figura 4. a) relación entre emisión promedio de N₂O y dosis de fertilización en bordo y fondo del surco; y b) relación entre emisión promedio de N₂O y contenido promedio de N inorgánico del suelo (N-NO₃⁻+N-NH₄⁺).

La emisión promedio de N₂O correspondiente al bordo del surco, donde se colocó el fertilizante, se relacionó estrechamente ($R^2 = 0.99$) con el contenido de N-inorgánico del suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Millar *et al.* (2018) en cuanto a que las dosis de aplicación de fertilizantes nitrogenados, en este caso de 400 unidades ha⁻¹ o más, al menos duplican las emisiones de N₂O, encarecen los costos de producción y se reduce la eficiencia en el aprovechamiento del N por las plantas, que puede ser de 40% o menos (Peña-Cabriales *et al.*, 2001).

Las emisiones de N_2O reportadas en diversas investigaciones son muy variables, aun tratándose del mismo cultivo de maíz. Sin duda que esto es debido a la gran variabilidad de ambientes en que se cultiva, a la igualmente diversa dosis y tecnología de fertilización empleada y a los métodos empleados en la medición de las emisiones. Los resultados de esta investigación coinciden con lo reportado por Millar *et al.* (2018); Halvorson *et al.* (2010); sin embargo, el máximo nivel de fertilización nitrogenada que estos investigadores evaluaron fue de 280 kg ha^{-1} . Quizá por esta razón en presente investigación se obtuvo una mayor emisión de N_2O ($270 \text{ g ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) en el bordo del surco con la aplicación de $400 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Figura 4b). Por otro lado, Alluvione *et al.* (2014) reportan un flujo de N_2O de hasta $800 \text{ g ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ con la aplicación de solo 130 kg ha^{-1} de urea.

La dinámica del flujo de N_2O a lo largo del ciclo de cultivo, en esta evaluación, muestra que éste aumentó rápidamente después de la aplicación de fertilizante N y los eventos de riego ($> 60\%$) (Figura 5). Con el suelo saturado de humedad se favorece el potencial de emisión de emisiones de N_2 , en lugar de N_2O como producto final de desnitrificación (Bouwman, 1998; Robertson y Groffman, 2015). La desnitrificación es la reducción del nitrato del suelo a los gases NO , N_2O y N_2 . Una amplia variedad de bacterias, en su mayoría heterótrofas, pueden desnitrificar, por lo que utilizan NO_3 en lugar de oxígeno (O_2) como aceptor de electrones terminal durante la respiración.

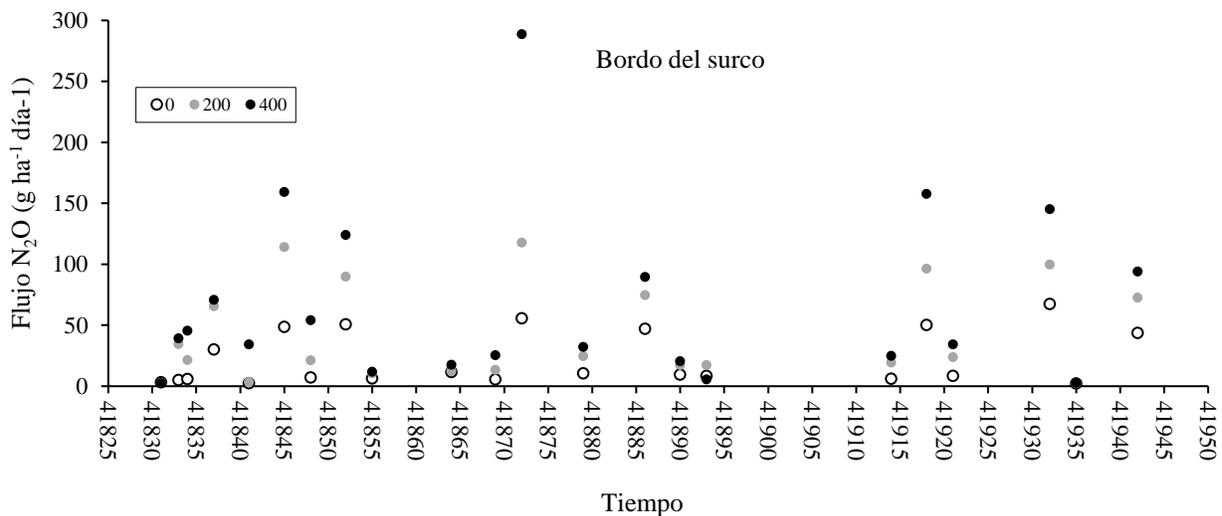


Figura 5. Emisiones de N_2O del suelo en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno en maíz forrajero en la Comarca Lagunera.

Debido a que el nitrato es un aceptor de electrones menos eficiente que el O_2 , la mayoría de los desnitrificadores emprenden la desnitrificación solo cuando el O_2 no está disponible, que ocurre cuando el drenaje en el suelo es insuficiente cuando se encuentra saturado de agua (Robertson y Groffman, 2015).

Después de aplicar la segunda fertilización el fenómeno se repitió; sin embargo, algunas semanas antes de final del ciclo se observa otros picos de $100 \text{ g ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en el bordo del surco (Figura 6). La alta variabilidad espacial inherente de las emisiones de N_2O asociadas con grandes entradas de N en sistemas de producción agrícola ha sido reportada por Parkin (1987); Riley *et al.* (2001).

Las emisiones diarias ponderadas aumentaron en función de nivel de fertilización y después disminuyeron rápidamente al nivel de flujo en el fondo del surco, donde no se aplicó el fertilizante; es decir, a $50 \text{ g ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ o menos (Figura 6), debido por una parte a la desecación del suelo, que limita la actividad microbiana, y por otra, a que ya se consumió por las plantas o se perdió por las diferentes rutas del ciclo del N.

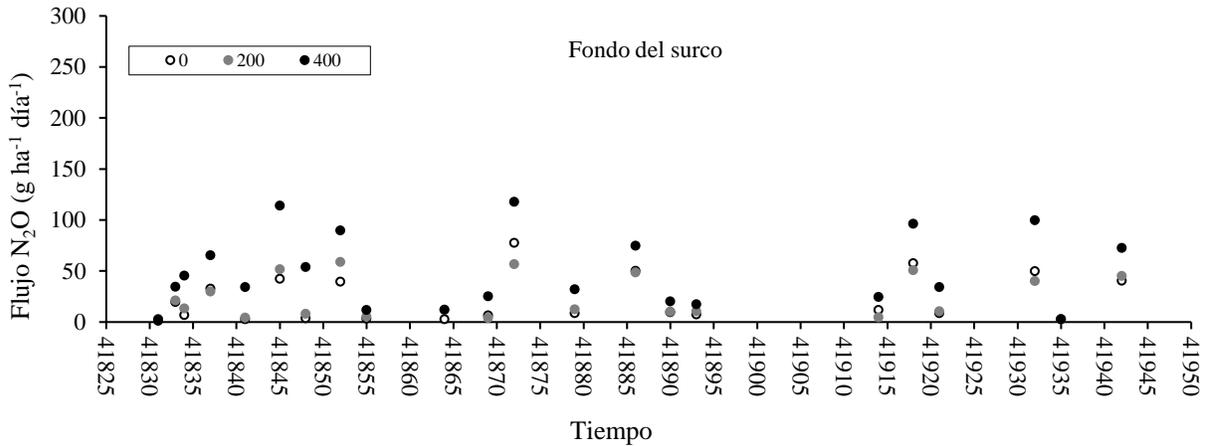


Figura 6. Emisiones de N_2O del suelo en respuesta a de la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno en maíz forrajero en la Comarca Lagunera.

Emisión de N_2O acumulada

La emisión acumulada de N_2O durante el ciclo de cultivo, se relacionó exponencialmente con las dosis de fertilización en el bordo del surco ($R^2 = 0.98$) y en el fondo de este ($R^2 = 0.75$) (Figura 7a). Este comportamiento coincide con lo reportado por Hoben *et al.* (2011); Millar *et al.* (2018), quienes también reportaron la misma tendencia en las emisiones de N_2O . Sin embargo, el mayor nivel de emisión de N_2O que se alcanzó en este estudio: $7\ 000 \text{ g ha}^{-1}$ de N_2O en el bordo del surco y $4\ 600 \text{ g ha}^{-1}$ de N_2O en fondo de éste, comparado con los estudios referenciados, puede atribuirse a la mayor dosis de N aplicado, a la alta temperatura (máximas hasta de $45 \text{ }^\circ\text{C}$) y la humedad disponible durante el ciclo del cultivo (se aplicaron seis riegos).

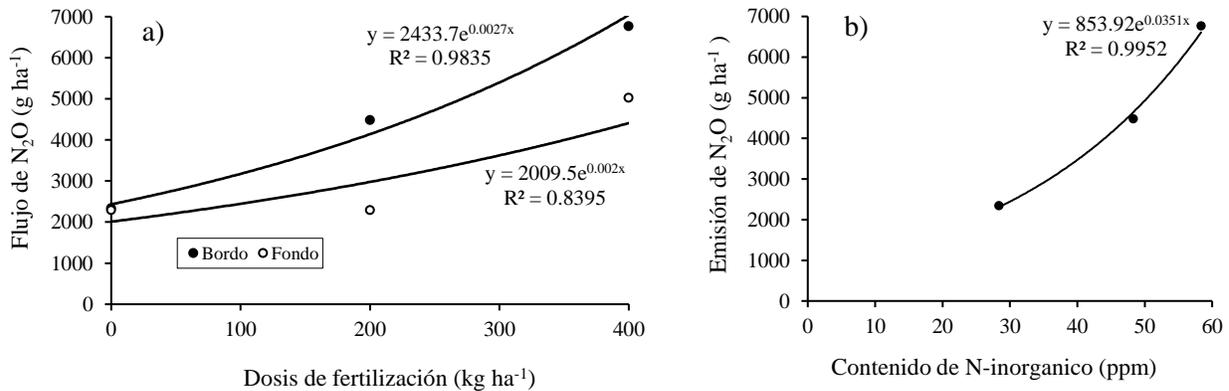


Figura 7. a) relación entre flujo acumulado de N_2O y dosis de fertilización nitrogenada; y b) relación entre emisión acumulada de N_2O y contenido de N inorgánico del suelo.

También hubo una alta correlación a nivel de las concentraciones de N inorgánico en el suelo y las emisiones de N₂O ($R^2= 0.99$) (Figura 7b), pero no necesariamente mayor aprovechamiento de N por el cultivo. Estos datos coinciden con lo publicado por Saynes *et al.* (2016), donde sugieren que el inventario de GEI en México para el caso de la agricultura está subestimando las emisiones de N₂O ya que las emisiones medidas en campo fueron de 5.3 kg N₂O-N ha⁻¹ las cuales no fueron significativamente diferentes de 4.7 kg N₂O-N ha⁻¹ estimadas por el índice de nitrógeno ($p < 0.7$).

Rendimiento del cultivo

La producción de forraje y grano aumentaron en función de la dosis de N (Cuadro 3). Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos sin aplicación de N (1) y la aplicación de 200 y 400 kg de N (2 y 3), alrededor del doble; sin embargo, entre 200 y 400 kg de N (2 y 3) no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$). Estos resultados sugieren que 400 kg ha⁻¹ de N es una dosis excesiva, lo cual se manifestó claramente en el nivel de emisiones de N₂O, las cuales aumentaron exponencialmente con la mayor aplicación de N. De acuerdo con Castellanos *et al.* (2005) la demanda nutrimental de N por el cultivo de maíz es de 22.5 kg de N por tonelada de grano producido en una hectárea.

De acuerdo con el nivel de producción de grano más alto en este estudio (9.6 t ha⁻¹) el requerimiento interno del cultivo fue de poco más 200 kg ha⁻¹, por lo cual 400 unidades de N ha⁻¹ implicó mayor emisión de N₂O. El suelo, con 47% de arena, necesariamente favorece el flujo del agua y nutrientes al interior del perfil, por lo cual la pérdida del N que se aplicó en el fertilizante puede ser mayor que en suelos con menor cantidad de arena. Con base en lo anterior es necesario implementar prácticas de manejo agronómico para aumentar el índice de aprovechamiento de N por el cultivo. Un mayor fraccionamiento en la aplicación de la fertilización nitrogenada o uso de fertilizantes de lenta liberación podrían ser alternativa para reducir las emisiones de N₂O al ambiente.

Cuadro 3. Rendimiento de forraje y grano en ensayo de evaluación de emisión de N₂O. Ciclo verano de 2018, Matamoros, Coahuila.

Tratamiento	Fertilización (kg ha ⁻¹)	Forraje verde (t ha ⁻¹)	Forraje seco (t ha ⁻¹)	Rendimiento grano (t ha ⁻¹)
1	0	24.3 b*	8 b	3.1 b
2	200	50.6 a	16.7a	8.4 a
3	400	53 a	17.5a	9.6 a

*= letras iguales son estadísticamente semejantes ($\alpha = 0.05$).

Conclusiones

Las emisiones de N₂O aumentaron exponencialmente en función de las dosis de aplicación de N y se relacionó con el contenido de N-inorgánico del suelo. La concentración de N inorgánico en el suelo se incrementó significativamente en respuesta al N inorgánico en el suelo antes de la siembra y a las dosis de N aplicado como fertilizante. A su vez las emisiones de N₂O aumentó exponencialmente y con alta correlación al contenido de N-inorgánico del suelo. La producción forraje seco y grano alcanzó 17.5 y 9.6 t ha⁻¹, respectivamente, con dosis de fertilización nitrogenada más alta. No hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre 200 y 400 unidades de N ha⁻¹, lo cual indicó bajo aprovechamiento de N por el cultivo y mayor emisión de N₂O con esta última.

Literatura citada

- Acevedo-Peralta, A. P.; Leos-Rodríguez, J. A.; Figueroa-Viramontes, U. y Romo-Lozano, J. L. 2017. Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta Universitaria*. 27(4):3-12. Doi: 10.15174/au.2017.1270.
- Alluvione, F.; Bertora, C.; Zavattaro, L. and Grignani, C. 2014. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(2):384-395. Doi.org/10.2136/sssaj2009.0092.
- Bouwman, A. F. 1998. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*. 392(6679):866-867. Doi:10.1038/31809.
- Castellanos, J. Z.; Cueto-Wong, J. A.; Macías, C. J.; Salinas, J. R.; Tapia, L.M.; Cortes, J. M.; González, I. J.; Mata, V. H.; Mora-Gutiérrez. M.; Vázquez, A.; Valenzuela, S. C. y Enríquez, R. E. 2005. La fertilización de los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. Folleto técnico número 1.
- Cueto-Wong, J. A.; Reta-Sánchez, D. G.; Barrientos-Ríos, J. L.; González-Cervantes, G. y Salazar-Sosa, E. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Rev. Fitotec.* 29(esp. 2):97-101.
- Cueto-Wong, J. A.; Reta-Sánchez, D. G.; Figueroa-Viramontes, U.; Quiroga-Garza, H. M.; Ramos-Rodríguez, A. y Peña-Cabriales, J. J. 2013. Recuperación de nitrógeno aplicado en forma fraccionada en maíz forrajero utilizando ¹⁵N. *Rev. Chapingo. Ser. Forestales y del Ambiente*. 5(1)11-16. Doi: 10.5154/r.inagbi.2012.10.009.
- Figueroa-Viramontes, U.; Núñez-Hernández, G.; Delgado, J. A.; Cueto-Wong, J. A. y Flores-Margez, J. P. 2009. Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la comarca lagunera. *In: agricultura orgánica*. 2ª (Ed.). Osorio-Castillo, I.; Salazar-Sosa E.; Fortis-Hernández, M.; Trejo-Escareño, H. I.; Vázquez-Vázquez, C.; López-Martínez, J. D.; Figueroa-Viramontes, R.; Zuñiga-Tarango, R.; Preciado-Rangel, P. y Chavarría-Galicia, J. A. (Ed.). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 128-149 pp.
- Figueroa-Viramontes, U.; Núñez-Hernández, G.; Reta-Sánchez, D. G. y Flores-López, H. E. 2015. Balance regional de nitrógeno en el sistema de producción leche-forraje de la Comarca Lagunera, México. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 6(4):377-392.
- González-Estrada, A. y Camacho-Amador, M. 2017. Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(8):1733-1745.
- Halvorson, A. D; Del Grosso, S. J. and Alluvione, F. 2010. Nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated no-till corn. *J. Environ. Qual.* 39(5):1554-1562. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0041>.
- Hoben, J. P.; Gehl, R. J.; Millar, N.; Grace, P. R. and Robertson, G. P. 2011. Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology* 17(2):1140-1152. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02349.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. 3ª (Ed.). Trad. al español por Martínez, J. B. Omega. Barcelona, España. 282-283 pp.
- Matson, P. A.; Billow, C.; Hall, S. and Zachariassen, J. 1996. Fertilization practices and soil variations control nitrogen oxide emissions from tropical sugar cane. *J. Geophys. Res.* 101(D13):18533-18545. Doi:10.1029/96JD01536.

- Millar, N.; Urrea, A.; Kahmarka, K; Shcherbakd, I.; Robertson, G. P. and Ortiz-Monasterio, I. 2018. Nitrous oxide (N₂O) flux responds exponentially to nitrogen fertilizer in irrigated wheat in the Yaqui Valley, México. *Agric. Ecosyst. Environ.* 261:125-32. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.003>.
- NOAA. 2021 Global Monitoring Laboratory Earth System Research Laboratories. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/.
- Parkin, T. B. 1987. Soil microsites as a source of denitrification variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51(5):1194-1199.
- Pedroza-Sandoval, A.; Yáñez-Chávez, L. G.; Sánchez-Cohen, I. y Samaniego-Gaxiola. J. A. 2015. Efecto del hidrogel y vermicomposta en la producción de maíz. *Rev. Fitotec.* 38(4):375-381.
- Peña-Cabriales, J. J.; Grageda-Cabrera, O. A. y Vera-Núñez, J. A. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: uso de las técnicas isotópicas (15n). *Terra Latinoam.* 20(1):51-56.
- Quiroga-Garza, H. E.; Cueto-Wong, J. A. y Figueroa-Viramontes, U. 2010. Efecto del estiércol y fertilizante sobre la recuperación de ¹⁵N y conductividad eléctrica. *Terra Latinoam.* 29:(2)201-209.
- Riley, W. J.; Ortiz-Monasterio, I. and Matson, P. A. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 61(3):223-236. doi:10.1023/A:1013758116346.
- Robertson, G. P. and Groffman, P. M. 2015. Nitrogen transformations. *In: Paul, E.A. (Ed.). Soil microbiology, ecology, and biochemistry.* Academic Press Burlington, Massachusetts, USA. 421-446 pp.
- SAS. 2008. Institute Statistical Analysis System. SAS User's guide. Statistics, versión 9.4 (Ed.). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc.
- Saynes-Santillán, V.; Etchevers-Barra, J. D.; Paz-Pellat, F. y Alvarado-Cárdenas, L. O. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoam.* 34(1):83-96.
- SIAP. 2020. Servicio de información agroalimentaria. <https://www.gob.mx/siap>.
- Signor, D.; Cerri, C. E. P. and Conant, R. 2013. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. *Environ Res. Lett.* 8(1):1-9. Doi:10.1088/1748-9326/8/1/015013.
- Villa-Castorena, M. M.; Catalán-Valencia, E. A. y Inzunza-Ibarra, M. A. 2005. Análisis de la información climática para usos agrícolas. *Agrofaz.* 5(1):717-724.
- Yescas, C. P.; Segura, M. A.; Martínez, L.; Álvarez, V. P.; Montemayor, J. A.; Orozco, J. A. y Frías, J. E. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Phyton.* 84(2):272-279.