

Emisiones de óxido nitroso en suelos con diferente cobertura vegetal en Coatzacoalcos, Ver., México

José Adrián Saldaña-Munive¹, Luis Gerardo Ruiz-Suárez², José Antonio Ticante-Roldán¹

Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas¹, Instituto de Ciencias, Centro de Ciencias de la Atmósfera²
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla¹, Universidad Nacional Autónoma de México²
Puebla, Pue.¹; México D.F.²; México
adrian.saldana@correo.buap.mx

Abstract— We evaluated the emissions of nitrous oxide (N₂O) in soils with vegetation cover different in the Jaguaroundi ecological park in Coatzacoalcos Veracruz, Mexico, using the static Chamber method, the predominant soil groups were: Cambisols, Acrisols and gleysols, in 3 areas: New World (A1) with poplar-cattail and grassland vegetation, Reforestation (A2) with acahual and grassland and Forest Inventory (A3) with acahual and grassland. The properties of soils related to flows of N₂O emission mainly with organic carbon content (medium to high) and quantities of nitrogen (medium). Sampling was done in dry and rainy period during March and July resulting in average flows per site. Each value by site represents the arithmetic mean of the results of three chambers with five values of flow and six concentrations, the average annual values are between 172 and 778 kg N₂O-N ha⁻¹, locating sites that act as sources of this gas as well as sinks.

Keyword— Oxide nitrous, GEI, tropical soils, plant cover.

Resumen— Se evaluaron emisiones de óxido nitroso (N₂O) en suelos con cobertura vegetal diferente en el Parque Ecológico Jaguaroundi, en Coatzacoalcos Veracruz, México, utilizando el método de cámara estática, los grupos de suelos predominantes fueron: Cambisoles, Acrisoles y Gleysoles, en 3 áreas: Mundo Nuevo (A1) con vegetación de popal-tular y pastizal, Reforestación (A2) con acahual y pastizal e Inventario Forestal (A3) con acahual y pastizal. Las propiedades de suelos se relacionaron con flujos de emisión de N₂O principalmente con contenidos de carbono orgánico (medios a altos) y cantidades de nitrógeno (medias). Se realizaron muestreos en periodo seco y lluvioso durante marzo y julio obteniéndose flujos promedio por sitio. Cada valor por sitio representa la media aritmética del resultado de tres cámaras con cinco valores de flujo y seis concentraciones, los valores anuales promedio se hallan entre 172 y 778 kg N₂O-N ha⁻¹, localizando sitios que actúan como fuentes emisoras de este gas así como sumideros.

Palabras claves— Óxido nitroso, GEI, suelos tropicales, cobertura vegetal.

I. INTRODUCCIÓN

El N₂O es considerado un gas de efecto invernadero (Weitz et al., 2001), está involucrado en la destrucción catalítica de la capa de ozono (Veldkamp et al., 1999), y se ha incrementado desde hace 40 años, a una tasa de 0.2-0.3 % año⁻¹ (Prinn et al., 1990; Müller et al., 1997). El desarrollo agrícola y sus prácticas producen aproximadamente el 90% de emisiones antropogénicas de este gas y es emitido a la atmósfera como resultado de actividades microbiológicas dentro del ciclo de nitrógeno (Müller et al., 1997).

Las emisiones de este gas en suelos se originan por nitrificación y desnitrificación (Smith y Tiedje, 1979; Potter et al., 1997; Smith et al., 1998; Veldkamp et al., 1999; Abbasi y Adams, 2000; Nobre et al., 2001; FAO e IFA, 2001; Dobbie y Smith, 2003), producto de condiciones aeróbicas y anaeróbicas respectivamente (Ball et al., 1999) y condicionadas por factores ambientales y de suelos, como la humedad, temperatura, el contenido de nitrato y amonio en suelos, el carbón fácilmente metabolizable, el pH, la textura y el manejo de suelos, etc. y sus interacciones (Müller et al., 1997) así como el potencial redox (Smith et al., 1998).

Los suelos tropicales húmedos contribuyen con cantidades importantes de N₂O al presupuesto global (Keller et al., 1986; Veldkamp et al., 1999), son fuente natural de producción (Keller et al., 1986; Matson y Vitousek 1990), y además son las áreas con más superficie y menos estudiadas de producción

de este gas (Nobre et al., 2001). Existe evidencia de que este incremento del N_2O antropogénico se produce por el cambio en el uso del suelo en los trópicos (Keller et al., 1986; Luizao et al., 1989). Los grandes flujos observados están asociados con tasas relativamente altas del nitrógeno reciclado en las selvas (García-Méndez et al., 1991).

En estos suelos la temperatura y el contenido de humedad son óptimos para los procesos biológicos la mayor parte del año, con producciones enormes de N_2O (Weitz et al., 2001).

Los factores bióticos y abióticos interactúan para crear condiciones favorables para la producción y emisión de este gas en suelos de selva tropical. La mineralización del nitrógeno producto de descomposición de materia orgánica proporciona un amplio sustrato para la producción biológica de gases traza (Potter et al., 1997).

Se han reportado tasas más altas de desnitrificación y liberación de N_2O en selvas tropicales que en bosques templados (Keller et al., 1986). El incremento en la concentración de este gas esta directamente asociado con actividades agrícolas que afectan el ciclo de N. Cuando los ecosistemas tropicales son convertidos en agrícolas, pastizales o silvícolas, donde la fertilización nitrogenada es usada (Smith, 1997) se tiene un incremento potencial de las emisiones de N_2O (Nobre et al., 2001).

Este incremento también incluye la liberación física de N_2O producido subsuperficialmente, la quimiodesnitrificación, la acción de enzimas desnitrificantes extracelulares o el aumento de actividad microbiana debido al incremento de disponibilidad de carbono de detritus o por microorganismos muertos (Röver et al., 1998).

La dinámica de humedad en el suelo determina el ambiente biogeoquímico para los microorganismos, afectando la disponibilidad de nutrientes como el carbón orgánico, amonio y nitrato, y su incremento podría diluir la concentración de estos nutrientes pero también la población microbiana en el espacio poroso saturado con agua (WFPS), y para estimar las emisiones de N_2O actuales y futuras es necesario identificar fuentes y procesos involucrados (Weitz et al., 2001).

El tipo de suelo y el tipo de comunidad vegetal (en sistemas de producción donde se ha sustituido a comunidades de plantas por áreas cultivadas) son factores que controlan las emisiones de N_2O a escala de paisaje (Lemke et al., 1998).

La cuantificación de flujos de N_2O en ecosistemas terrestres ha sido hecha con cámaras que cubren la superficie del suelo, como opción para áreas grandes y para estudios a micro escala. Además de ser económicos y simples de operar. Este método involucra la acumulación del gas en dispositivos cerrados con flujo continuo (Ambus et al., 1993).

Con el propósito de abordar esta temática se propuso el siguiente objetivo:

Determinar las emisiones de N_2O en suelos con problemas de perturbación (desforestados e inundados) ubicados en el Parque ecológico Jaguarundi del complejo petroquímico la Cangrejera, en Coatzacoalcos, Veracruz, México.

II. SITIO DE ESTUDIO

El Parque ecológico se ubica en Coatzacoalcos, Veracruz en el Golfo de México (coordenadas $18^{\circ}06' - 18^{\circ}05'N$, $94^{\circ}19' - 94^{\circ}23'W$), dentro del complejo petroquímico denominado La Cangrejera en instalaciones de PEMEX (Fig. 1), identificándose 3 áreas: Mundo Nuevo con un sitio permanentemente inundado y con vegetación de Popal-Tular (A1S1), otro con pastizal inundado en el periodo lluvioso (A1S2) a una altura de 17-19 msnm; Área de Reforestación con tres sitios: uno en la cumbre (A2S1) con vegetación de Acahual Cerrado Maduro, otro en ladera media (A2S2) con igual vegetación y un tercero (A2S3) en ladera baja con pastizal (29-44 msnm); Área de Inventario Forestal con tres sitios: cumbre (A3S1) con Acahual Cerrado Maduro, ladera media (A3S2) con igual vegetación y ladera baja (A3S3)

con vegetación de pastizal a 28-34 msnm. Los suelos pertenecen al grupo de los Gleysoles para el área 1, Acrisoles y Cambisoles para las otras dos áreas, el pH de estos suelos es ácido (3.5 a 4.2 en la época seca y de 3.72 a 5.16 en la lluviosa), con contenido medio de carbono orgánico (12.65 a 128.46 mg/g) y medio a bajo de nitrógeno (0.01 a 0.3%), con textura Franca a Franca arcillo limosa.

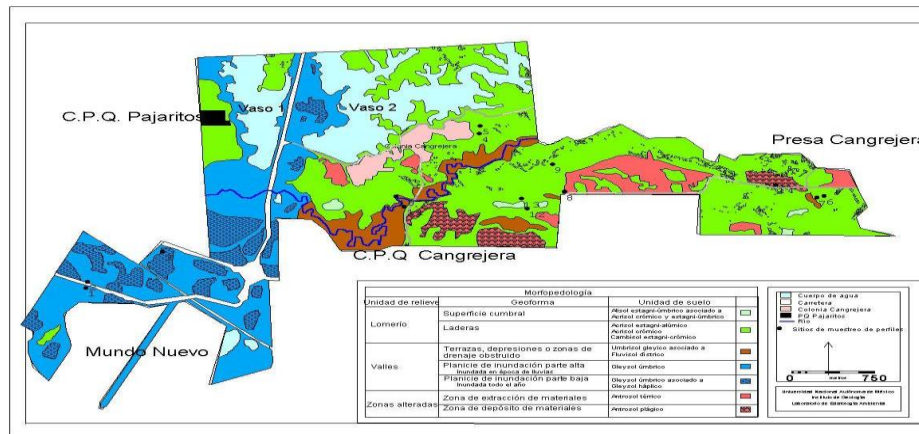


Fig. 1. Mapa edafológico con unidades de suelo muestreadas.

III. MÉTODOS

Se utilizó el método de cámara estática (Mogge et al., 1999; Whalen, 2000; Wolf and Russow, 2000; Nobre et al., 2001; Yan et al., 2001; Ni and Zhu, 2001; Calderón and Jackson, 2002; R. Longoria et al., 2003), en tubo de PVC, sanitario, 8 pulg. Ø y 10 cm. de alto (Fig. 2), que consta de tapa con conexiones Swagelock (reductores pasamuros de 1/4, 2 por cámara), que se inserta en otro tubo enterrado a 2 cm. de profundidad que cubre un área superficial de 260.015 cm² y tiene un volumen de 2601.55 cc.

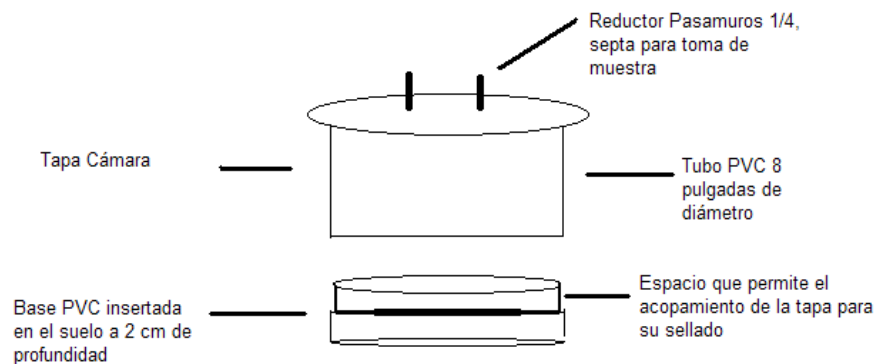


Fig. 2. Cámara de muestreo de GEI en suelos en tubo PVC de 8 pulgadas.

Se colocaron 3 cámaras por sitio siguiendo el método propuesto por R. Longoria et al., (2003) (Fig. 3), buscando homogeneidad del terreno considerando el mismo plano por altitud y cubierta vegetal.

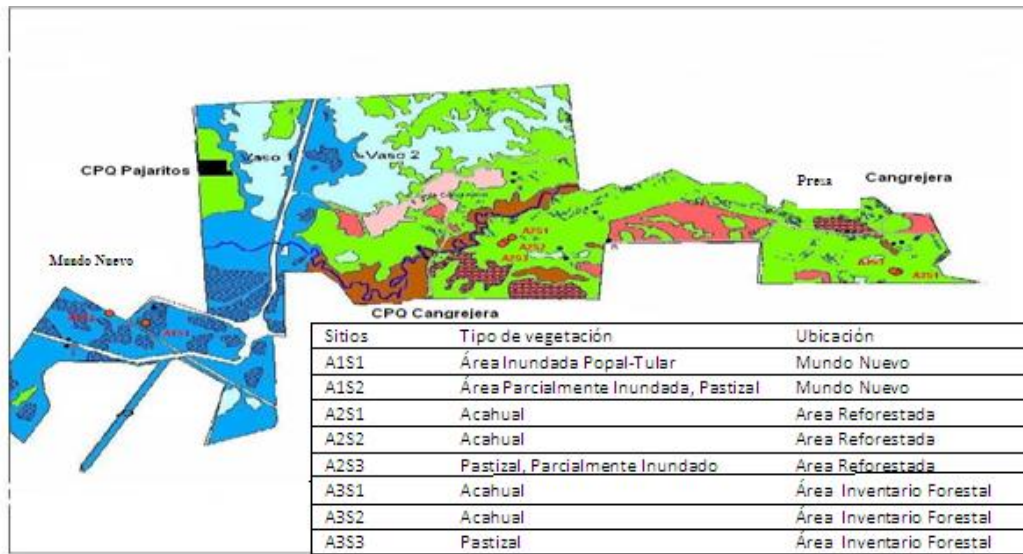


Fig. 3. Sitios de muestreo de flujos de N₂O en las áreas identificadas.

Se midió temperatura al interior de la cámara, temperatura ambiente y temperatura del suelo utilizando Termopares (tipo T Cobre-Constantan), para registrar variaciones y corregir valores de las emisiones.

Además, se determinó humedad relativa (sensor MET ONE 083C-1-35), Presión ambiental (sensor MET ONE 090D) y salinidad de suelos (conductivímetro HANNA HI 99310), todo conectado a un Datalogger (Campbell Scientific 21 X SM 4M).

Se tomó la primera muestra de gas al cerrar la cámara, insertando la jeringa (gastight) en la septa para extraer un volumen de 20 ml. que se inyectó en un vial (headspace) del mismo volumen previamente etiquetado, se tomaron 6 muestras por cámara, considerando 6 diferentes tiempos (t₀, t₁, t₂,...,t₅). El muestreo por sitio, por número de cámaras y número de muestras representa un total de 18 submuestras por día en dos periodos diferentes.

Se trasladaron los viales en bolsas, y se transportaron al laboratorio para su análisis posterior (se almacenaron a temperatura ambiente en un lugar fresco por no más de un mes).

Las emisiones de N₂O se analizaron por cromatografía de gases con las siguientes especificaciones:

N₂O Detector de Captura de Electrones (GC-ECD), columna Porapak Q 5.0 m, usando mezcla de argón y metano como gas acarreador. Se tomó la muestra con jeringa *gas-tight* de 10 ml (SGE), inyectando 2 ml directamente al Cromatografo de gases y en corrida de 10 minutos se determino el pico característico con un tiempo de retención de 8 minutos las áreas correspondientes de acuerdo a la concentración por muestra analizada, el análisis cualitativo fue por tiempos de retención absolutos, el cuantitativo se llevó a cabo con un estándar de óxido nitroso (ALPHAGAZ, 99.995%). Las diluciones se llevaron a cabo por el método de presiones parciales.

Se obtuvieron flujos promedio por sitio. Cada valor representa la media aritmética del resultado de tres cámaras con cinco valores de flujo y seis de concentración determinados por coeficientes de regresión de la curva de calibración y calculados por medio de regresión utilizando tiempos acumulados a partir de la primera toma de muestra, el flujo es considerado como incremento de concentración en función del volumen de la cámara, así como el área superficial cubierta utilizando la siguiente fórmula:

$$F = (\Delta C * 10^{-9} * V_c * \rho) / (\Delta t * A_c) \quad (1)$$

Donde ΔC = incremento en concentración (ppb), V_c = volumen de la cámara, ρ = densidad calculada a partir de la ley de los gases, Δt = incremento en tiempo y A_c = área de la cámara, obteniéndose flujos que se muestran en la sección de resultados y discusión.

Las propiedades físicas y químicas de suelos las determinó el grupo de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM: el pH por potenciometría con KCL 1 M, y en agua (1: 2.5) a temperatura ambiente según Schlichting et al. (1995).

La Conductividad Eléctrica (C.E. 1:2.5) con un conductímetro en extracto de saturación tomando en cuenta la capacidad de campo (CC) y la densidad aparente (D.A.) mediante la fórmula:

$$\text{C.E. (Ex.Sat.) (mS/cm)} = \text{C.E. (1:5) (mS/cm)} \times 250 \times \text{D.A. (g/cm}^3\text{)} / \text{CC (Vol\%)}$$

Los cationes intercambiables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , H^+ y Al^{+++}) se extrajeron con acetato de amonio 1 M pH 7, (1:10), y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica (Ca, Mg, Al), flamometría (Na y K) y potenciometría (H), (Schlichting et al. 1995).

La Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CIC efectiva) se calculó a través de la suma de cationes intercambiables.

Para el Contenido de Carbono orgánico ($C_{\text{org.}}$) se realizó una oxidación vía húmeda con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 2N durante 90 minutos a 120 °C y posteriormente se determinaron fotométricamente los iones Cr_3^+ a una longitud de onda de 578 nm.

La concentración de carbono se calculó por medio de una curva de calibración elaborada con glucosa (Schlichting et al., 1995).

Para el Nitrógeno total (Nt): se realizó digestión con ácido sulfúrico concentrado y se recuperó en forma de NH_4 por destilación adicionando NaOH y se determinó por titulación según el método de Kjeldahl (ISRIC, 1992).

Para Fósforo Disponible (Pdisp) se realizó extracción con NH_4F 0.03 N y HCl 0.025 N según Bray y Kurtz, y se determinó por colorimetría en forma de complejo de molibdato de amonio usando SnCl_2 como reductor.

La Densidad Aparente (D.A.) se determinó por gravimetría usando muestras inalteradas tomadas con cilindros de 100 ml de capacidad después de secar la muestra a 105°C hasta peso constante.

La Textura se estimó en campo mediante prueba al tacto (Siebe et al., 1996).

IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El paquete de software Statgraphics Plus 4.1 fue utilizado para realizar análisis de varianza de los datos y para calcular coeficientes de regresión entre las diferentes variables de suelo y los flujos de emisión de N_2O . El nivel de confianza para la Significancia estadística fue determinado por la prueba t-student.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan flujos promedio de emisión de óxido nítrico por cámara, en dos periodos de muestreo.

Tabla I. Flujos de emisión de N₂O por periodo.

	A1S1	A1S2	A2S1	A2S2	A2S3	A3S1	A3S2	A3S3
□ g N ₂ O-N/m ² h	SECAS							
	3.69	-5.28	-0.167	0.414	1.33	1.73	-1.17	-1.71
	7.28	8.45	0.612	-2.98	2.72	-1.68	1.17	-0.343
	14.9	0.926	1.14	0.420	-0.208	-3.66	-0.310	-0.842
	LLUVIAS							
	403	706	39.8	626	-112	120	183	174
	72.9	763	2.62	370	-28.1	-214	63.4	187
	-128	-135	53.2	848	-4.78	114	114	166

V.1. Emisiones por áreas

En cuanto a emisiones por áreas se compararon Mundo Nuevo (A1), Área de Reforestación (A2) e Inventario Forestal (A3), obteniéndose en periodo seco para el área de Mundo Nuevo con sitio inundado y potencialmente inundable valores promedio más altos de producción y emisión de N₂O con 8.64 µg de N₂O/m²h (Tabla 3) siendo estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$) a las otras dos áreas (Figura 4), ya que la producción y emisión de óxido nitroso en esta área se favorece por el mayor porcentaje de humedad que la caracteriza, incrementando la actividad microbiológica por nitrificación y desnitrificación, el sitio permanentemente inundado (A1S1) con ambiente más reductor origina que el material orgánico aportado por vegetación de Popal-Tular propicia que la desnitrificación sea el proceso que produce el N₂O, por el contrario el sitio potencialmente inundable (A1S2) y con vegetación de pastizal presenta un volumen alto de carbono orgánico (33.64 µg/g) y humedad remanente que favorece en un ambiente más aerobio el proceso de nitrificación con emisiones de 1.37 µgN₂O/m²h.

Para el periodo lluvioso el análisis estadístico ($\alpha = 0.05$) no muestra diferencia estadística entre las áreas, señalando que aunque los valores se incrementan significativamente no hay evidencia que señale algún comportamiento distinto con respecto a las emisiones lo que puede observarse en la Figura (5)

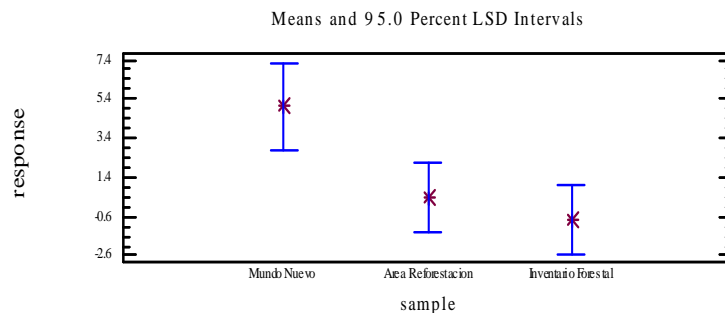


Fig. 4. Producción y emisión de N₂O por áreas, periodo seco

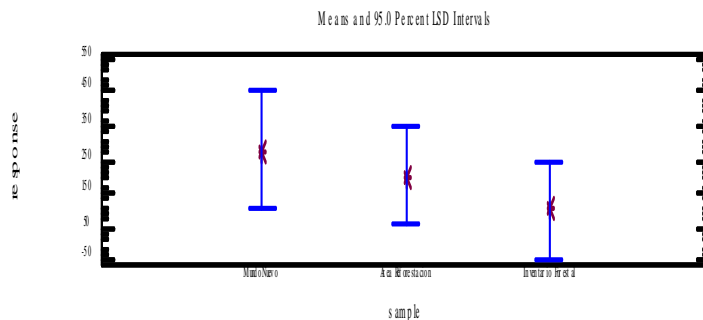


Fig. 5. Producción y emisión de N₂O por áreas, periodo lluvioso.

En la Tabla 2 se presentan propiedades físicas y químicas de los sitios muestreados, que se asociaron con flujos para identificar si estas propiedades influyen en la producción de oxido nitroso para las condiciones particulares de las áreas de estudio.

Tabla II. Propiedades Físico Químicas de sitios seleccionados para el muestreo de N₂O en dos periodos

SECAS					
SITIOS	Densidad Aparente g/cm ³	Carbono orgánico mg/g	Nitrógeno Total (%)	pH en KCl 1:2.5	Capacidad Máxima Retención Agua
A1S1	0.2	110.45	0.77	3.95	88.48
A1S2	0.88	33.64	0.22	3.67	71.8
A2S1	1.04	27.36	0.21	3.69	53.97
A2S2	1.08	24.18	0.23	3.52	51.62
A2S3	1.35	16.88	0.19	4.24	55.39
A3S1	0.96	33.04	0.27	3.56	61.89
A3S2	1.12	25.04	0.14	3.92	53.48
A3S3	0.61	37.57	0.12	4.19	71.12
LLUVIAS					
SITIOS	Densidad Aparente g/cm ³	Carbono orgánico mg/g	Nitrógeno Total (%)	pH en KCl 1:2.5	Capacidad Máxima Retención Agua
A1S1	0.2	110.45	0.77	4.13	110.13
A1S2	0.88	33.64	0.22	4.2	81
A2S1	1.04	27.36	0.21	4.36	68.09
A2S2	1.08	24.18	0.23	3.81	75.8
A2S3	1.35	16.88	0.19	4.33	79.85
A3S1	0.96	33.04	0.27	4.25	67.94
A3S2	1.12	25.04	0.14	3.82	69.19
A3S3	0.61	37.57	0.12	4.92	66.36

Tabla III. Promedio de emisiones de N₂O, por periodo.

Sitios	$\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ Promedio (periodo seco)	$\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ Promedio (periodo lluvioso)
A1S1	8.6357	116
A1S2	1.3671	444
A2S1	0.5277	31.9
A2S2	-0.7153	615
A2S3	1.2822	-48.4
A3S1	-1.2031	6.59
A3S2	-0.1025	120
A3S3	-0.9656	176

V.2. Emisiones por sitios

En cuanto al comportamiento por sitios para el periodo seco en el área de Mundo Nuevo (A1) no hubo diferencias estadísticamente significativas a pesar del mayor volumen de emisiones y condiciones contrastantes.

Para el área de Reforestación (A2) se presenta un comportamiento similar ya que no muestran diferencias estadísticas de los flujos de emisión obtenidos.

El área de Inventario Forestal (A3) más conservada muestra un comportamiento similar entre los sitios descartando las suposiciones por diferencias del lugar que ocupan las cámaras en los sitios muestreados.

Para el periodo lluvioso en Mundo Nuevo no se presentaron diferencias estadísticas, significativas, aun cuando el volumen de emisiones se incremento de manera significativa.

En Área de Reforestación solo el sitio A2S2 ubicado en ladera media resulto diferente estadísticamente ($\alpha = 0.05$), por la forma cóncava que almacena materiales nitrogenados y junto al volumen de agua característico de este periodo promueve su transformación y en consecuencia mayor producción y emisión de N₂O ($615 \mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$) (Fig. 6).

Para el área de Inventario Forestal no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los sitios.

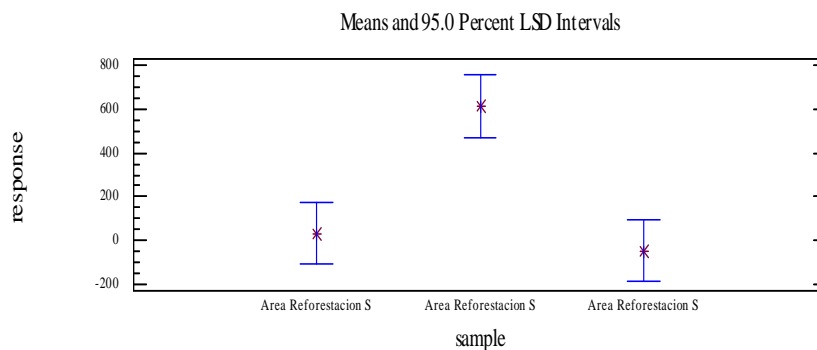


Fig. 6. Emisión de N₂O por sitios, área de Reforestación periodo lluvioso.

V.3. Cobertura Vegetal

El tipo de cobertura vegetal determina la producción diferenciada de emisiones, por su aporte orgánico y actividad microbiológica, que junto con la inundación favorecen la desnitrificación como principal proceso de producción de N_2O . Weitz et al. (2001) señalan que en suelos inundados domina la desnitrificación dando como resultado la producción y consumo de formas reducidas de nitrógeno (N_2O y N_2). Para A1S1 con vegetación de Popal-Tular (Tabla 3) se presentaron emisiones de $8.64 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h (las más altas), no así para el área con pastizal (A1S2), que favorece la producción de N_2O en el periodo seco por aporte permanente de materia orgánica que se recicla en ambiente más aeróbico que produce este gas por nitrificación. Veldkamp et al. (1999) mencionan que los incrementos están asociados con la conversión de selvas a pastizales influyendo sobre el ciclo de N en el suelo, particularmente en la mineralización, nitrificación y desnitrificación y por lo tanto en las emisiones de óxidos de nitrógeno, asimismo la composición química del material principalmente gramíneas limita la presencia del nitrógeno en el suelo disminuyendo así la producción a $1.37 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h . Para el área de Reforestación en el sitio A2S1 ubicado como ladera alta con vegetación de acahual se observa que el deterioro del suelo y su vegetación favorecen la pérdida de nutrientes principalmente nitrógeno por escurrimiento del agua y por aumento en la mineralización de materiales carbonados y nitrogenados, lo que limita la producción a $0.53 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h , el A2S2 identificado como ladera media con vegetación de acahual actúa como sumidero debido a la densidad de vegetación, ya que el aporte de nitrógeno y grado de conservación del sitio establece condiciones adecuadas para los procesos de transformación del N y su mayor aprovechamiento por las plantas, evitando una producción significativa de N_2O lo que puede identificarse por los valores negativos ($-0.71 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h). El contenido de nutrientes del suelo también incrementa la competencia entre microorganismos y la cubierta vegetal, agotando los depósitos de nitrógeno y consecuentemente reduciendo las emisiones (Yamulki et al., 1997). Para el A2S3 ubicado en ladera con pastizal, se observa producción más dinámica de N_2O , ya que se presentan ambientes aeróbicos como anaeróbicos así como zonas de captación de materiales migrados por movimiento del agua y depositados para ser transformados rápidamente produciendo $1.28 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h . Para el área de Inventario Forestal con vegetación de acahual y menor grado de deterioro se observa producción mínima de este gas debido a la protección que ejerce la cobertura vegetal sobre el suelo estableciendo condiciones óptimas de transformación de materiales carbonados y nitrogenados que son consumidos en el suelo por plantas y microorganismos por lo que la distribución de esta vegetación limita la liberación de N_2O a la atmósfera para los sitios A3S1, A3S2, A3S3, que actúan como sumideros.

Para el periodo lluvioso (Tabla 3) el factor humedad jugó un papel determinante en la producción de N_2O . Ball et al. (1999) señalan que picos de emisión de N_2O se asocian con altas precipitaciones, a su vez Wolf y Russow (2000) establecen que la saturación de agua promueve la emisión de N_2O vía desnitrificación. En suelos tropicales húmedos la temperatura y contenido de humedad son factores óptimos para procesos microbiológicos (Weitz et al., 2001). Dobbie y Smith (2003) argumentan que los flujos de N_2O se incrementan inmediatamente después de los eventos de lluvia, lo que también concuerda con lo señalado por Bergsma et al. (2002). Lo que permite explicar que A1S1 aumente su producción de óxido nítrico a $116 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h , en A1S2 la inundación temporal favorece la producción de $444 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h , en A2S1 la saturación de agua limita su producción, obteniéndose un flujo de $31.9 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h , no así para el A2S2 donde el intercambio gaseoso favorece la liberación de N_2O durante el drenado, y por el tipo de pendiente cóncava, lo que permite que el escurrimiento superficial incremente la cantidad de N transformado obteniendo un flujo de $615 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h , el A2S3 que se inunda temporalmente inhibe la actividad microbiológica y por lo tanto limita la producción a $-8.4 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h . El sitio A3S1 presenta el nivel más bajo de producción ($6.59 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h), no así para el A3S2 que presenta un volumen importante de N_2O ($120 \mu\text{g}$ de N_2O/m^2h) por la posición en el entorno geográfico y por la pendiente de tipo convexo que facilita la expulsión de gases

por infiltración, el A3S3 por su vegetación de pastizal y su reciclamiento en el suelo favorece la producción de 176 µg de N₂O/m²h.

V.4. Cambios en los parámetros de suelo

Nitrógeno mineral de suelo

El contenido de nitrógeno en suelo y sus condiciones de transformación juegan un papel fundamental en la producción de N₂O y en consecuencia su liberación a la atmósfera, su abundancia permite por reacciones de nitrificación o desnitrificación mediadas por la humedad presente y el tipo textural de suelos, una mayor o menor producción. Matson y Vitousek (1995) mostraron que las emisiones de N₂O correlacionaron estadísticamente con la mineralización del N a través de un amplio rango de sitios de selva tropical. Los procesos se promueven por ambientes oxidantes o reductivos que prevalecen en el suelo después de drenar el exceso de agua o por el grado de saturación, produciendo N₂O por nitrificación en un ambiente aerobio con suelo bien drenado y textura franca o bien como producto de desnitrificación en ambiente anaerobio, con suelos poco drenados y textura mas arcillosa. Ciertos organismos nitrificantes generan N₂O a partir de la reducción del NO₂⁻, el cual producen bajo condiciones limitantes de oxígeno (Stevens et al., 1997). De los resultados obtenidos para el periodo seco (Tabla 2) se observa que la interacción de flujos de N₂O y contenido de N total (Fig. 7) muestran relación directa, lo que se comprobó con la regresión efectuada. El significado estadístico señala relación moderadamente fuerte entre las variables (coeficiente de correlación de 0.7857 y nivel de confianza del 99%) obteniendo el siguiente modelo de predicción mediante la siguiente fórmula:

$$E = -2.90886 + 14.9057 * \text{Nitrógeno}$$

Las predicciones pueden considerar propiedades de suelos que no presenten variabilidades extremas y que pueden ser estimadas en campo, además mediante la utilización de mayor numero de propiedades y regresión múltiple se puede seleccionar una fórmula que se acerque a emisiones obtenidas en campo, para validarlas y determinar un modelo de predicción.

También debe observarse que sitios con mayor contenido de N y mayor mineralización son fuentes emisoras de este gas si ha habido modificación del suelo y de sus propiedades, por otro lado sitios con mayor conservación del suelo y su vegetación actúan como sumideros ya que se consumen estas emisiones y se impide su liberación hacia la atmósfera, favoreciendo que el ciclo de N mantenga su naturaleza dinámica dentro de los diferentes procesos y productos que de él se obtienen.

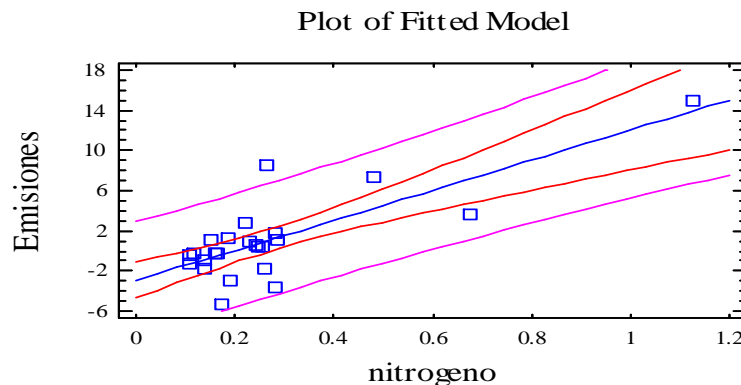


Fig. 7. Correlación de emisiones de N₂O y contenido de N total periodo seco.

Para el periodo lluvioso podemos observar que se presenta una emisión más alta pero no permanente debido al intercambio gaseoso obligado por el movimiento de agua dentro del suelo, lo que origina la

producción de emisiones pico al establecerse la temporada de lluvias y posteriormente decae permaneciendo en un volumen de emisión menor.

Del análisis de regresión efectuado para el periodo lluvioso se puede observar (Fig. 8) que existe una buena correlación (coeficiente de 0.5396 y 99% de confianza) y se concluye que hay una relación moderadamente fuerte entre las variables lo que nos lleva también a la obtención de un modelo lineal de predicción representado por la siguiente fórmula:

$$E = -42.9745 + 232.141 * \text{Nitrógeno}$$

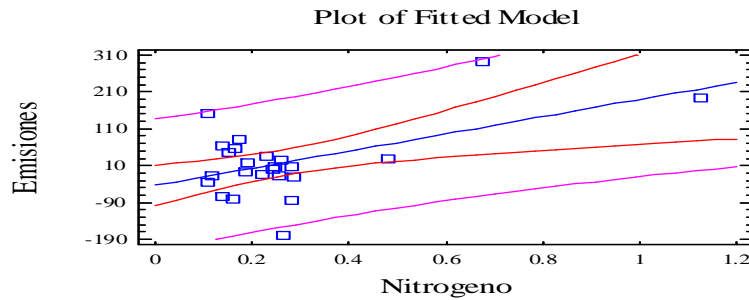


Fig. 8. Correlación de emisiones de N₂O y contenido de N total periodo lluvioso.

Es conveniente señalar que aunque el periodo lluvioso es importante dentro de las producciones anuales de N₂O es más importante considerar el efecto que el periodo seco tiene para la producción de este gas por su duración.

V.5. Carbono orgánico de suelo

Existe un comportamiento similar considerando la relación C/N señalando que el periodo seco en sitios con pastizal y humedad residual hay mayor producción de N₂O, los demás sitios por su tipo, diversidad y distribución de vegetación actúan como sumideros consumiendo el N₂O e impidiendo que este sea liberado a la atmósfera.

En cuanto al análisis de regresión para este periodo se observa (coeficiente de correlación de 0.6399 y un nivel de confianza del 99%) que existe relación moderadamente fuerte entre estas variables (Fig. 9) lo que permite determinar el modelo lineal de predicción siguiente:

$$E = -2.7795 + 0.13757 * \text{Carbono}$$

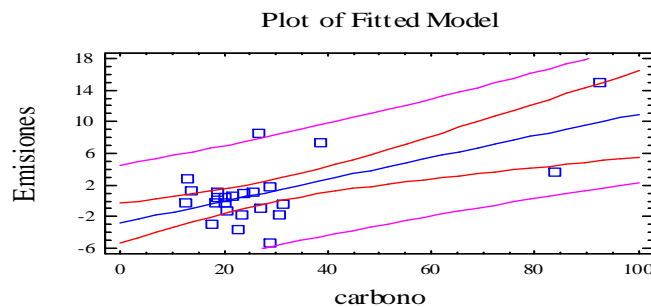


Fig. 9. Correlación de emisiones de N₂O y contenido de C periodo seco.

Para el periodo lluvioso se presenta el mismo comportamiento que para N total por la interacción entre el C y el N por lo que solo se señalan resultados del análisis de regresión donde el coeficiente de

correlación fue de 0.6874 y un nivel de confianza de 99% mostrando una relación estadísticamente significativa entre las emisiones y contenido de carbono. (Fig. 10).

Finalmente el modelo lineal de predicción obtenido es el siguiente:

$$E = -75.0713 + 3.35108 * \text{Carbono}$$

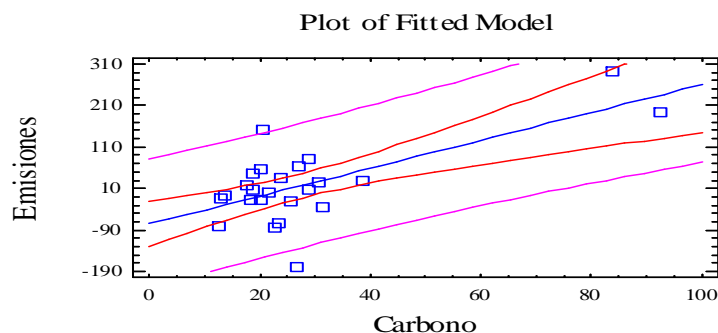


Fig. 10. Correlación de emisiones de N_2O y contenido de C periodo lluvioso.

VI. CONCLUSIONES

Las emisiones de N_2O puntuales que se determinaron en campo son producto de factores ambientales como de suelos, dicha interacción determina la producción de pulsos de emisión, no obstante existe evidencia de que estos flujos se incrementan con respecto al tiempo manifestando comportamientos complejos que dependen del volumen de humedad, temperatura y principalmente de contenidos de N y C, promoviendo su producción la actividad microbiológica en sus procesos de nitrificación y desnitrificación, para el periodo seco la producción de N_2O es más constante puesto que la mineralización de compuestos orgánicos incorporados se aumenta por la humedad presente que está entre 40 y 60% facilitando en condiciones más aerobias procesos de nitrificación y la liberación de este gas a la atmósfera, por otro lado la presencia de mayor número de especies vegetales, su distribución y diversidad impiden la liberación de este gas que se consume en procesos de transformación del N y por lo tanto el suelo junto con su cobertura vegetal actúan como sumidero, no así para aquellos suelos perturbados o modificados que muestran una dinámica de transformación más acelerada de sus orgánicos incorporados y que pierden más elementos por lixiviación o volatilización y tienden a ser fuentes emisoras de N_2O . Las emisiones en lluvias después de las primeras precipitaciones son altas debido al intercambio gaseoso originado por infiltración, pero posteriormente disminuyen por saturación de humedad en el suelo, lo que podría explicar el aumento general de emisiones pero es más importante considerar las emisiones en secas donde su producción es permanente y con mayor duración.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a PEMEX por las facilidades y el apoyo económico para el desarrollo del proyecto de investigación, al Sr. Melesio Saldaña Hernández por sus apoyo para la realización de las cámaras de muestreo, a la M. en C. Bertha E. Mar Morales por su apoyo en la parte logística, al M. en C. José Manuel Hernández por su apoyo en el trabajo de laboratorio y al laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abbasi M.K. and Adams W.A. 2000. Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1251-1259
- [2] Ambus P., H. Clayton, J.R.M. Arah, K.A. Smith and S. Christensen. 1993. Similar N₂O flux from soil measured with different chamber techniques. Short communication. *Atmospheric Environment*. 27A:121-123.
- [3] Ball B.C., J.P. Parker and A. Scott. 1999. Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland 2. Nitrous oxide, soil N status and weather. *Soil & Tillage Research* 52: 191-201
- [4] Bergsma, T.T., Robertson, P.G. and Ostrom, N.E. 2002. Influence of soil moisture and Land Use History on denitrification end-products. *J. Environ. Qual.* 31: 711-717.
- [5] Calderón F.J. and Jackson L.E. 2002. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil nitrogen dynamics microbial biomass and carbon dioxide efflux. *J. Environ. Qual.* 31:752-758.
- [6] Dobbie K.E. and Smith K.A. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* 9: 1-15
- [7] FAO and IFA, 2001. Global estimates of gaseous emissions of NH₃ and N₂O from agricultural land. First version. 106 pp.
- [8] García-Méndez G., Maass J.M., Matson P.A. and Vitousek P.M. 1991. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in México. *Oecologia*. 88: 362-366
- [9] ISRIC (1992): Procedures for soil analysis. International Soil Reference and Information Center. 3^a. Edición, Wageningen.
- [10] Kaiser E.-A., Khors K., Kücke M., Schnug E., Munch J.C. and Heinemeyer O. 1998. Nitrous oxide release from arable soil: importance of perennial forage crops. *Biol Fertil Soils* 28: 36-43
- [11] Keller, M., Kaplan, W.A. and Wofsy, S.C., 1986. Emissions of N₂O, CH₄ and CO₂ from tropical soils. *J. Geophys Res.* 91: 11,791 – 11,802.
- [12] Lemke R.L., R.C. Izaurralde, S.S. Malhi, M.A.Arshad, and M. Nyborg. 1998. Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils of the Boreal and Parkland Regions of Alberta. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 62: 1096-1102.
- [13] Luizao, F.J., Matson P.A., Livingston G.P., Luizao R., Vitousek P.M. 1989. Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochem Cycles* 3: 281-285
- [14] Longoria, R.R., Carbajal, B. G., Mar, M.B.E., and Ruiz, S.G. 2003. Nitrous oxide flux in Maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during “El Niño” year 1998. *Atmósfera*. 231-244.
- [15] Matson P.A. and Vitousek P.M. 1990. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience* 40: 667-672
- [16] Matson, P.A. and Vitousek, P.M. 1995. Nitrogen trace gas emissions in a tropical dry forest ecosystem. In *Seasonally Dry Tropical Forests*. Cambridge University Press. 450 pag.
- [17] Mogge, B., E.A. Kaiser, J.C. Munch. 1999. Nitrous oxide emissions and denitrification N-losses from agricultural soils in the Bornhöved Lake region: influence of organic fertilizers and land-use. *Soil Biology & Biochemistry* 31:1245-1252.
- [18] Müller C., R.R. Sherlock, P.H. Williams. 1997. Mechanistic model for nitrous oxide emission via nitrification and denitrification. *Biol. Fertil. Soils*. 24:231-238.
- [19] Ni, W.Z. and Z.L. Zhu. 2001. Gaseous nitrogen losses and nitrous oxide emission from a flooded paddy soil as affected by illumination and copper addition. *Biol. Fertil. Soils* 34: 460 – 462.
- [20] Nobre A.D., Keller M., Crill P.M. and Harriss R.C. 2001. Short-term nitrous oxide profile dynamics and emissions response to water, nitrogen and carbon additions in two tropical soils. *Biol. Fertil. Soils* 34: 363–373.

- [21] Potter S.C., Riley H.R. and Klooster A.S., 1997. Simulation modeling of nitrogen trace gas emissions along an age gradient of tropical forest soils. *Ecological Modelling*. 97: 179–196.
- [22] Prinn R., Cunnold D., Rasmussen R. Simmonds P., Aylea F., Crawford A., Fraser P. and Rosen R. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *Journal of Geophysical Research* 95: 18369-18385
- [23] Röver Manuela, O. Heinemeyer and E. A. Kaiser. 1998. Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter. *Soil Biology & Biochemistry*. 30:1859-1865.
- [24] Schlichting, E., Blume, H.-P., and Stahr, K. 1995. *Bodenkundliches Praktikum*, 2nd Edition, Pareys Studentexte 81, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin
- [25] Siebe, Ch., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica del suelo en el campo. Publicación Especial No. 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo
- [26] Smith M.S. and Tiedje J.M. 1979. Phases of denitrification following oxygen depletion in soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 11: 261-267
- [27] Smith K.A. 1997. The potential for feedback effects induced by global warming on emissions of nitrous oxide by soils. *Global Change Biol*. 3: 327 -338.
- [28] Smith K.A., Thomson P.E., Clayton H., McTaggart I.P. and Conen F. 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 19: 3301-3309
- [29] Stevens, R.J., Laughlin, R.J., Burns, L.C., Arah, J.R.M. and Hood, R.C. 1997. Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from soil. *Soil Biology & Biochemistry* Vol. 29 No. 2 : 139-151.
- [30] Veldkamp, E., E. Davidson, H. Erickson, M. Keller and A. Weitz. 1999. "Soil nitrogen cycling and nitrogen oxide emissions along a pasture chronosequence in the humid tropics of Costa Rica. *Soil Biology & Biochemistry*. 31:387-394.
- [31] Whalen S.C. 2000. Nitrous oxide Emission from and agricultural soil fertilized with liquid swine waste or Constituents. *Soil Science of America Journal*. 64: 781-789.
- [32] 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 & Biochemistry*. 33:1077-1093.
- [33] Wolf, I. and R. Russow. 2000. Different pathways of formation of N₂O, N₂ and NO in black earth soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 32:229-239.
- [34] Yamulki, S., Harrison, R.M., Goulding, K.W.T. and Webster, C.P. 1997. N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland effect of soil pH. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 29. No. 8: 1199-1208.
- [35] Yan, X., Y. Hosen and K. Yagi. 2001. Nitrous oxide and nitric oxide emission from maize field plots as affected by N fertilizer type and application method. *Biol. Fertil. Soils*. 34:297-303