

INFORME DE INVESTIGACION

Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en Costa Rica



Dr. Johnny Montenegro B.
Convenio INTA-IMN

INDICE

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
.	
2. Materiales y métodos	3
.	
2.1. Ubicación.	3
.	
2.1.1. Zona de vida.	3
2.2. Manejo de la plantación	3
2.3. Manejo experimental	4
2.3.1. Flujo de emisión del óxido nitroso del suelo	4
2.3.2. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno	4
2.3.2.1. Fertilización.	4
2.3.2.2. Tamaño de parcela	5
2.3.2.3. Tratamientos	5
2.3.2.4. Muestreo de óxido nitroso	6
2.3.2.5. Diseño experimental y análisis estadístico	7
2.3.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno	7
2.3.3.1. Fertilización	7
2.3.3.2. Tamaño de parcela	7
2.3.3.3. Tratamientos	8
2.3.3.4. Muestreo de óxido nitroso	9
2.3.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico	9
3. Resultados	10
3.1. Naranja	10
3.1.1. Flujo de emisión del óxido nitroso	10
3.1.2. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno	11

3.1.2.1. Patrón de emisión	11
3.1.2.2. Factor de emisión	12
3.1.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno.	13
3.1.3.1. Patrón de emisión	13
3.1.3.2. Factor de emisión	14
3.2. San Marcos de Tarrazú	16
3.2.1. Flujo de emisión del óxido nitroso	16
3.2.2. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno	16
3.2.2.1. Patrón de emisión	16
3.2.2.2. Factor de emisión	17
3.2.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno	18
3.2.3.1. Patrón de emisión	18
3.2.3.2. Factor de emisión	19
4. Conclusiones	21

INFORME DE INVESTIGACION

Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en Costa Rica

J. Montenegro¹

1. Introducción

Los sistemas de producción agrícola se encuentran dentro de las actividades humanas que se consideran fuente de gases con efecto invernadero. Si bien esos gases se generan como consecuencia de diferentes procesos naturales que ocurren por la acción de los microorganismos del suelo, algunos de ellos son estimulados por diferentes prácticas agrícolas que se realizan durante el proceso productivo tal como ocurre con la fertilización nitrogenada.

En este sentido, el sector cafetalero costarricense al igual que otras actividades agropecuarias donde se aplica este tipo de fertilizante, contribuye con la emisión de óxido nitroso (N₂O), un poderoso gas con efecto invernadero que tiene gran potencial de calentamiento.

Es por ello que preguntas tales como: Cuál es la magnitud de la emisión de N₂O generada por la actividad cafetalera costarricense? Difiere la cantidad de gas emitido con la fuente de nitrógeno utilizada? Existen diferencias en la cantidad emitida de este gas entre regiones productoras de café?, las cuales requieren respuesta para tener un panorama claro de la relación de esta actividad con el cambio climático.

Por esta razón existe gran interés en la cuantificación de este gas derivado de esta actividad económica, y en el caso de Costa Rica donde se desarrolla e implementa un NAMA cafetalero, es de vital importancia disponer de este tipo de información.

La NAMA café es una iniciativa que busca fortalecer la ecocompetitividad del sector cafetalero mediante un enfoque de baja emisión de gases con efecto invernadero, sin afectar negativamente la productividad de esta actividad y contribuir de esta manera a que este sector sea parte de la solución de una problemática global.

Esta iniciativa se enmarca dentro del Convenio Marco de Cooperación entre el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Instituto de Café de Costa Rica (ICAFE) y Fundecooperación para el desarrollo sostenible

¹ Investigador en Cambio climático y Agricultura, Convenio Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica, email: jmontenegro@inta.go.cr / jmontenegro@imn.ac.cr

(FUNDECOOPERACION), así como también, dentro del Convenio interinstitucional Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), ICAFE y FUNDECOOPERACION.

1.1.Objetivo general:

Determinar la emisión de óxido nitroso del suelo generado por la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en Costa Rica.

1.1.1. Objetivos específicos:

1.- Caracterizar el patrón de emisión de N_2O asociado con la aplicación de diferentes dosis y fuentes de fertilizantes nitrogenados al cultivo de café en fincas ubicadas en dos regiones productoras de Costa Rica: el Valle Occidental y, Los Santos.

2.- Cuantificar la emisión de N_2O resultante de la aplicación de diferentes dosis y fuentes de fertilizantes nitrogenados al cultivo de café en fincas ubicadas en dos regiones productoras de Costa Rica.

3.- Desarrollar los correspondientes factores de emisión para el N_2O derivado de la aplicación de diferentes dosis y fuentes de nitrógeno.

4.- Generar información que sirva como base para el desarrollo de opciones de mitigación, asociadas a la utilización de fertilizante nitrogenado en el cultivo de café.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación

Las investigaciones se desarrollaron en dos fincas de café seleccionadas por su representatividad por personal técnico del Icafé, una ubicada en la región productora del Valle Occidental, específicamente en Naranjo, y la otra en la región productora de Los Santos, en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

La escogencia de estas regiones para el desarrollo de las evaluaciones se basó en el hecho de que el área de cultivo de esta especie representa aproximadamente el 50% del área nacional bajo esta importante actividad agrícola.

2.1.1. Zona de vida

La zona de vida en **Naranjo** se clasifica como bosque húmedo premontano, con temperatura y precipitación media anual de 21°C y 2.200 mm, con un período seco definido que en términos generales se extiende desde diciembre hasta finales de abril. En el caso de **San Marcos de Tarrazú**, la zona de vida es de bosque muy húmedo premontano, con temperatura y precipitación media anual de 16°C y 2.223 mm, caracterizándose por tener un período seco que se extiende desde diciembre y hasta finales de abril.

2.2. Manejo de la plantación

En ambas regiones y para las fincas donde se realizaron las evaluaciones, todas las prácticas agrícolas aplicadas a la plantación de café durante la fase experimental se mantuvieron de acuerdo con el manejo normal de la plantación de café. Estas incluyeron desde el control de malezas, hasta la regulación de la sombra, pasando por la aplicación de cualquier producto químico utilizado para el control de problemas fitosanitarios. De igual forma, la cosecha se realizó conforme lo dispuso el manejo normal de la finca.

La densidad de plantación donde se ubicaron los experimentos en ambas regiones fue de 5.848 plantas ha⁻¹ (0,9 mts * 1,9 mts) de la variedad catuai con 7 y 15 años de plantada en Naranjo y San Marcos de Tarrazú, respectivamente, y sombra regulada de guaba (*Inga* spp) y poró (*Erythrina* spp).

En cada región se implementaron dos investigaciones, una para determinar la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes **dosis** de nitrógeno, y otra donde se determinó la emisión del mismo gas producto de la aplicación de diferentes **fuentes** de nitrógeno. Previo al inicio de estas investigaciones se determinó el flujo de emisión para el óxido nitroso.

2.3. Manejo experimental

2.3.1. Flujo de emisión del óxido nitroso del suelo

Previo al inicio de las evaluaciones de los dos trabajos de investigación antes mencionados, en cada región y una vez seleccionadas las parcelas donde se implementaron ambos experimentos, se realizó un muestreo de gases para tipificar el flujo de emisión del óxido nitroso del suelo bajo cultivo de café.

Para ello se colocaron seis cámaras estáticas en las parcelas, y se recolectaron muestras gaseosas de las mismas a partir del momento en que estas se colocaron sobre el suelo y, cada 15 minutos hasta completar 45 minutos de muestreo. De acuerdo con el comportamiento del flujo de emisión resultante de estos muestreos se determinó la cantidad de muestras a recolectar de cada cámara cada día de muestreo durante el período de evaluación de los experimentos antes señalados.

2.3.2. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno

2.3.2.1. Fertilización

En esta evaluación se realizaron tres eventos de fertilización en el ciclo anual del cultivo, las cuales se efectuaron de acuerdo con la práctica y época normal de aplicación de fertilizante en las regiones donde se ubican las fincas donde se implementaron los experimentos.

Las fechas de aplicación del fertilizante fueron:

En **Naranjo**:

- 1.- Primera fertilización: 1ª semana de Junio del 2016 (30 de mayo)
- 2.- Segunda fertilización: 3ª semana de Agosto del 2016 (16 de agosto)

3.- Tercera fertilización: 3ª semana de Octubre del 2016 (18 de octubre)

En **San Marcos de Tarrazú** la implementación de los ensayos en el campo se realizó en agosto, por lo que las fertilizaciones se realizaron:

- 1.- Primera fertilización: 3ª semana de Agosto del 2016 (23 de agosto)
- 2.- Segunda fertilización: 1ª semana de Noviembre del 2016 (01 de noviembre)
- 3.- Tercera fertilización: 2ª semana de Junio del 2017 (13 de junio)

En ambas regiones para determinar la emisión del óxido nitroso los muestreos se realizaron durante un año agrícola.

2.3.2.2. Tamaño de parcela

Previo a la aplicación de las dosis del fertilizante nitrogenado se seleccionaron las parcelas experimentales, las cuales estuvieron conformadas cada una por cinco hileras y cinco plantas por hilera, para un total de 25 plantas por parcela; la parcela útil la constituyeron las 15 plantas centrales, lugar donde se realizaron los muestreos y se recolectaron las muestras de gas conteniendo el N_2O .

2.3.2.3. Tratamientos

Se evaluaron cuatro dosis de fertilizante nitrogenado, cada una con tres repeticiones. Como fuente de nitrógeno se utilizó urea convencional ($CO(NH_2)_2$).

Los tratamientos evaluados fueron:

- I. T1: 0 kg de N ha^{-1} año⁻¹, testigo sin fertilización.
- II. T2: 100 kg de N ha^{-1} año⁻¹
- III. T3: 225 kg de N ha^{-1} año⁻¹
- IV. T4: 350 kg de N ha^{-1} año⁻¹

El fertilizante se aplicó de forma manual a la base de la planta de café, donde se colocó la dosis completa y correspondiente a cada uno de los eventos de fertilización programado (Cuadro 1).

En cada ciclo de fertilización se midió, en cada repetición de cada tratamiento y para cada región, el largo (cm) y ancho (cm) de la banda fertilizada.

Cuadro 1. Tratamientos, dosis anual y, cantidad aplicada de nitrógeno según evento de fertilización.

Tratamiento	Dosis anual kg N ha ⁻¹	1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *
			kg N ha ⁻¹	
1	0	0	0	0
2	100	33	33	33
3	225	75	75	75
4	350	117	117	117

* Evento de fertilización

2.3.2.4. Muestreo de óxido nitroso

El inicio de las determinaciones de la emisión de óxido nitroso en el campo se dio con el primer evento de fertilización, y se continuaron durante todo el año agrícola. La primera medición en Naranjo se realizó el 31 de mayo del 2016 y la última el 23 de mayo del 2017, mientras que en San Marcos de Tarrazú el primer muestreo se efectuó el 24 de agosto del 2016 finalizándose el 19 de julio del 2017.

La recolección de las muestras gaseosas se realizó considerando que mayores emisiones se presentan durante los primeros días luego de la aplicación del fertilizante, razón por la cual los muestreos fueron más frecuentes los primeros días después de aplicado el fertilizante para ir disminuyendo la frecuencia de los mismos conforme avanzó el tiempo de muestreo.

Para capturar el gas emitido por el suelo se utilizó la técnica de la cámara estática, las cuales fueron colocadas en la banda de fertilización y en la no fertilizada. Se recolectaron 6 muestras de gas por tratamiento, para un total de 48 muestras diarias en cada una de las regiones donde se implementó este experimento. Todos los muestreos se realizaron entre las 8 am y las 12 md.

Utilizando una jeringa se recolectó una muestra de gas de la cámara y se trasladó a un vial de 20 ml. previamente identificado y al vacío. Las muestras de gas se trasladaron al Laboratorio de Suelos del INTA donde se analizaron en un cromatógrafo de gases Agilent, equipado con un detector de captura de electrones.

Para cuantificar la concentración de N₂O presente en las muestras de gas recolectadas, se utilizó un software incorporado al cromatógrafo, el cual realizó la respectiva interpolación de

una curva de calibración construida a partir de gases patrón de N₂O certificados, balance nitrógeno.

2.3.2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos (dosis de fertilizante nitrogenado aplicado) y tres repeticiones. Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza y la comparación de medias utilizando la diferencia mínima significativa en Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2015) de acuerdo con el modelo:

$$Y_{kj} = \mu + T_{(k)} + B_j + (T*B)_{(k)j} + \varepsilon_{kj},$$

donde:

Y_{kj} es la emisión de N₂O (g ha⁻¹ a⁻¹),

μ es la media general,

$T_{(k)}$ es el efecto de tratamiento,

B_j es el efecto de bloque,

$(T*B)_{(k)j}$ es el efecto de la interacción bloque*tratamiento y,

ε_{kj} es el error experimental.

2.3.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno

2.3.3.1. Fertilización

En ambas regiones donde se implementó esta evaluación (Naranjo y San Marcos de Tarrazú), la aplicación de las fuentes de nitrógeno evaluadas se realizó en las mismas fechas de acuerdo con los eventos anotados en la sección 2.3.2.1.

2.3.3.2. Tamaño de parcela

El tamaño y conformación de las parcelas utilizadas en esta evaluación fueron iguales a las descritas en la sección 2.3.2.2. donde se caracterizó la emisión de óxido nitroso con diferentes dosis de fertilizante.

2.3.3.3. Tratamientos

Se evaluaron como opciones de mitigación cuatro diferentes fuentes de nitrógeno (Cuadro 2), todas aplicadas a 250 kg ha⁻¹.

Cuadro 2. Tratamientos, fórmula y nombre del compuesto nitrogenado evaluado en plantaciones de café. Costa Rica.

Tratamiento	Fórmula	Nombre del compuesto nitrogenado aplicado
T1	NH ₄ NO ₃	Nitrato y amonio
T2	CaNO ₃	Nitrato
T3	CO(NH ₂) ₂	Urea convencional
T4	CO(NH ₂) ₂	Urea recubierta con polímeros (RP)

El fertilizante se aplicó en la base de las plantas de café de acuerdo con el cronograma establecido (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos, dosis anual y, cantidad aplicada de nitrógeno según evento de fertilización.

Tratamiento	Dosis anual kg N ha ⁻¹	1 ^a *	2 ^a *	3 ^a *
			kg N ha ⁻¹	
T1	250	83	83	83
T2	250	83	83	83
T3	250	83	83	83
T4	250	83	83	83

* Evento de fertilización

2.3.3.4. Muestreo de óxido nitroso

Los muestreos para determinar la emisión de óxido nitroso se realizaron siguiendo el mismo protocolo estipulado en la sección 2.3.2.4. y que se utilizó en la evaluación de las diferentes dosis de nitrógeno. Las fechas de inicio y finalización son coincidentes para ambas investigaciones.

2.3.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental implementado en el campo y el análisis estadístico realizado a los datos de emisión del N_2O resultantes de la evaluación de las diferentes fuentes de nitrógeno fue el mismo que el utilizado para las dosis de nitrógeno y que se reseñó en el acápite 2.3.2.5.

3. Resultados

3.1. Naranjo

3.1.1. Flujo de emisión del óxido nitroso

El flujo de emisión detectado en el gas objeto del estudio, expresado como incremento de su concentración en función de tiempo, mostró que la concentración del mismo se incrementó de manera lineal (línea negra discontinua, Fig. 1) durante el tiempo de muestreo. Basado en ello se determinó que con la toma de dos muestras de gas en cada cámara, una cuando la misma se coloca en el campo y la otra al final de tiempo estipulado (45 minutos), era suficiente para capturar con confianza la emisión de N_2O a determinar en los dos experimentos planteados y a implementarse en esta localidad.

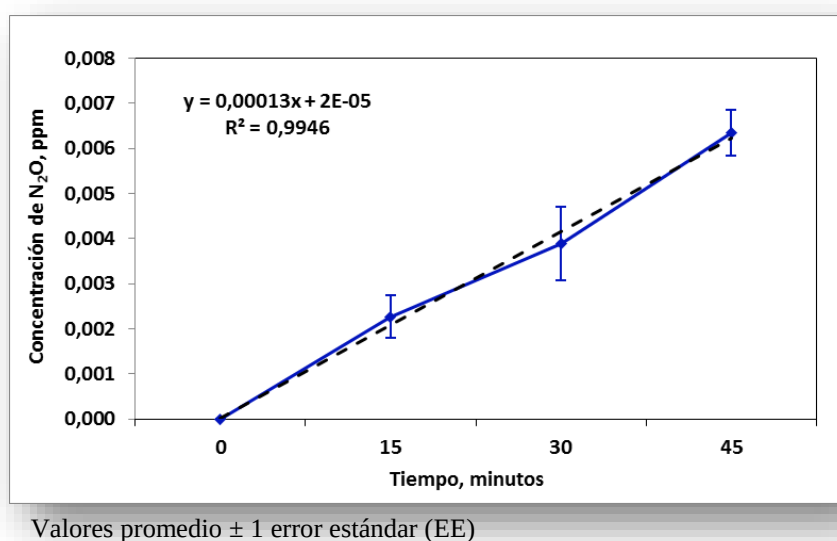


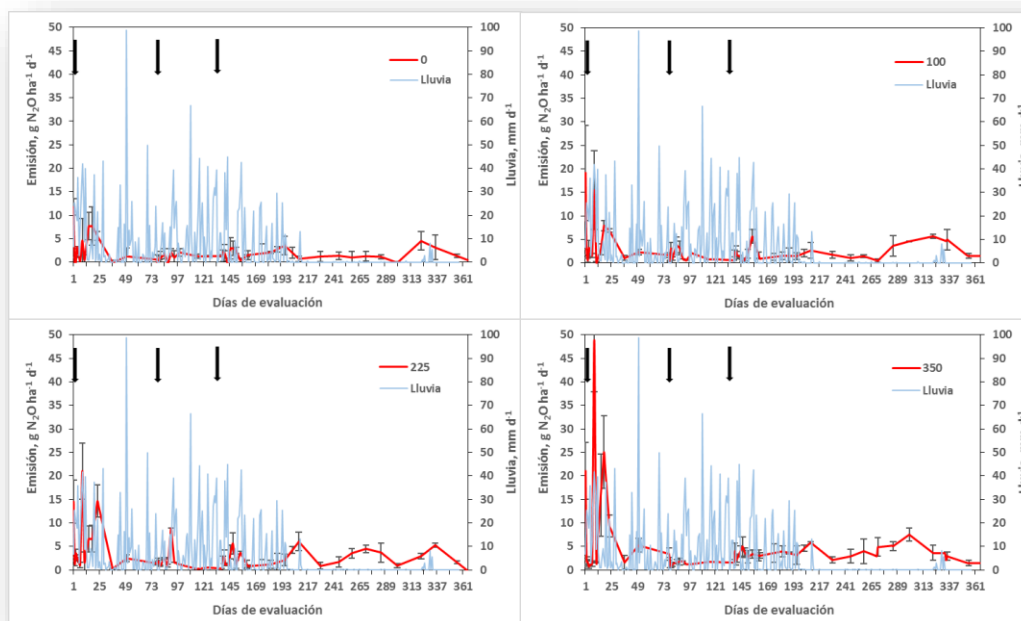
Figura 1. Flujo de emisión del óxido nitroso determinado en una plantación de café bajo sombra en Naranjo, Costa Rica.

3.1.2. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno

3.1.2.1. Patrón de emisión

El patrón de emisión determinado para el N_2O mostró que los mayores eventos de emisión se presentaron durante los primeros días posteriores a la aplicación del fertilizante nitrogenado independientemente de la dosis aplicada (Fig. 2).

En el primer evento de fertilización se detectaron los mayores picos de emisión. Probablemente este comportamiento es influenciado por la mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo resultado de la actividad microbiana incrementada por la acción de las primeras lluvias y que descomponen el material orgánico proveniente de los árboles leguminosos utilizados como sombra, lo cual libera nitrógeno contenido en él. Esta condición ha sido señalada en diferentes investigaciones realizadas en café para explicar la emisión determinada en la primera aplicación de fertilizantes en junio. Ello también explica el comportamiento observado en el tratamiento que no recibió fertilizante nitrogenado (T0) y que mostró un evento de emisión que sobrepasó los 5 g de N_2O ha⁻¹ d⁻¹.



Valores promedio $\pm$ 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

Figura 2. Patrón de emisión del óxido nítrico determinado con diferentes dosis de nitrógeno aplicada a una plantación de café bajo sombra en Naranjo, Costa Rica.

La influencia del reciclaje de nitrógeno en la emisión del N_2O , tal y como se comentó anteriormente, se puede observar claramente en los cuatro tratamientos al final de la época seca (cercano a los 313 días de evaluación, Fig. 2) donde eventos de precipitación hacen que se presenten incrementos en la magnitud de la emisión.

Los picos de emisión fueron más grandes con la mayor dosis de fertilizante aplicado, sin que por ello el patrón de emisión fuera diferente a los restantes tratamientos (Fig. 2). De hecho la escala utilizada en el axis de la emisión se mantiene para todos los tratamientos para facilitar la comparación visual de los eventos, misma que fue determinada y fijada por la dosis de 350 kg de nitrógeno $ha^{-1} año^{-1}$.

En términos generales, la emisión de este gas independientemente de la dosis de nitrógeno aplicada disminuye luego de la primera semana de evaluación para mantenerse en valores basales hasta el siguiente evento de fertilización. Las lluvias tampoco parecen tener efecto alguno en la emisión de este gas después de la primer semana de realizado el evento de fertilización (Fig. 2).

Luego de los eventos de emisión determinados inmediatamente después de las fertilizaciones se observaron pequeñas variaciones en la liberación de N_2O durante el transcurso de la evaluación, sin embargo, las mismas fueron bajas sin que superaran los 5 g de $N_2O ha^{-1} d^{-1}$,

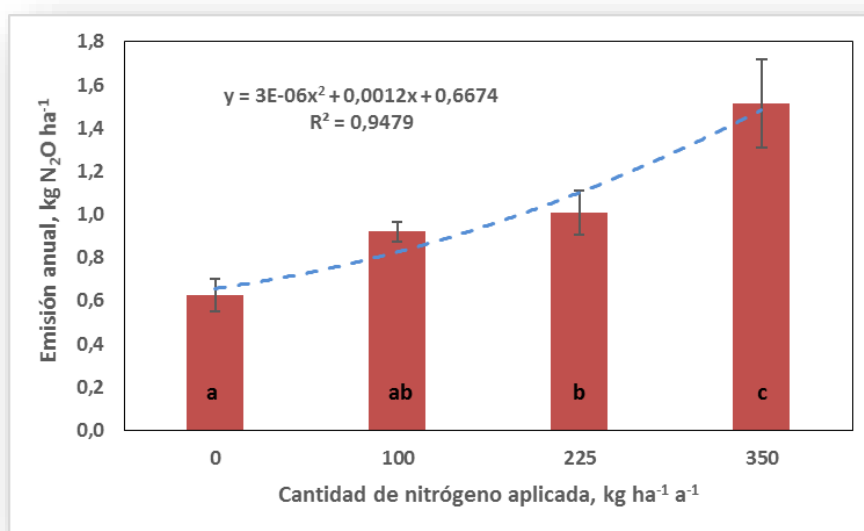
exceptuando las determinadas al final de la época seca (Fig. 2). Este comportamiento es similar al reportado en previas investigaciones efectuadas en diferentes lugares de nuestro país.

3.1.2.2. Factor de emisión

Un factor de emisión para un gas relaciona la cantidad emitida en un área y tiempo determinado, siendo la mayoría de las veces referenciado como $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, lo cual se determina mediante un proceso experimental.

En esta investigación, el mayor ($P < 0,05$) factor de emisión del N_2O se detectó con la aplicación de $350 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, niveles intermedios y similares entre sí aunque diferentes ($P < 0,05$) de la mayor dosis evaluada fueron determinados con la aplicación de 100 y $225 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. El menor ($P < 0,05$) factor de emisión se presentó cuando sin la aplicación de fertilizante (Fig. 3) aunque similar a la aplicación de $100 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

De acuerdo con los anteriores resultados, se obtuvo tanto la curva de mejor ajuste la cual es de tendencia polinómica (Fig. 3), como también la respectiva ecuación. Esta puede ser utilizada para obtener la posible emisión que se presentaría cuando se apliquen cantidades de fertilizante nitrogenado que se encuentren entre el límite superior e inferior de las evaluadas en la presente investigación, con la misma fuente de nitrógeno y para la zona o región donde se realizó esta evaluación.



Valores promedio $\pm 1 \text{ EE}$, columnas con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

Figura 3. Emisión anual de óxido nitroso determinado con diferentes dosis de nitrógeno aplicado a una plantación de café bajo sombra en Naranjo, Costa Rica.

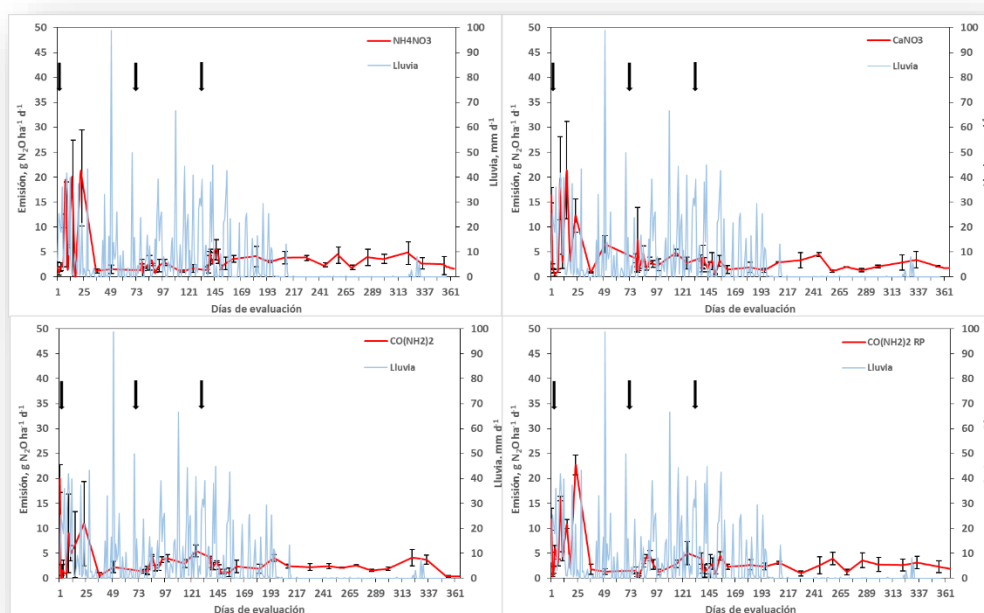
La tendencia de la emisión del N_2O con las dosis crecientes de nitrógeno no es lineal, tal y como ha sido reseñado en diferentes investigaciones, y muestra que cuando la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado al cultivo de café se incrementa en niveles superiores a los requerimientos del cultivo la emisión de óxido nitroso aumentó de manera polinómica.

3.1.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno

3.1.3.1. Patrón de emisión

El patrón de emisión del N_2O proveniente de las diferentes fuentes de nitrógeno evaluadas mostró un comportamiento similar; durante los primeros días luego del primer evento de fertilización fue donde se presentaron las mayores emisiones, para mostrar luego valores basales (Fig. 4).

La lluvia parece influenciar la emisión de este gas solamente durante los primeros días luego de aplicado el fertilizante, período en el cual coinciden eventos de emisión con los lluviosos (Fig. 4). También se puede observar este efecto al inicio de la estación lluviosa, aproximadamente a los 313 días de evaluación, ya que cuando se presentan las primeras lluvias se incrementa la emisión de este gas (Fig. 4).



Valores promedio $\pm$ 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

Figura 4. Patrón de emisión del óxido nitroso determinado con diferentes fuentes

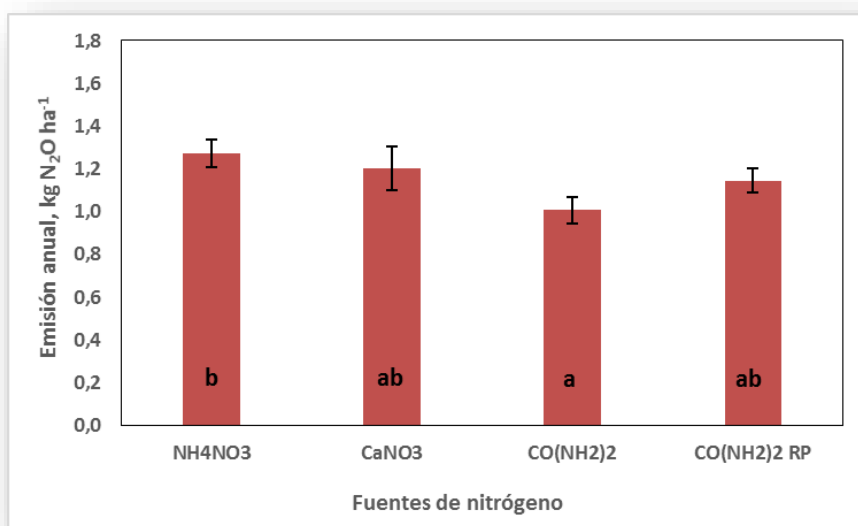
de nitrógeno aplicadas a una plantación de café bajo sombra,
Naranjo, Costa Rica.

El aumento de la humedad del suelo producto de las lluvias incrementa la actividad microbiana en el suelo. Esto hace que se aumente la descomposición de la materia orgánica en el suelo y se libere nitrógeno contenido en esta, ello incrementa la disponibilidad de precursores en el suelo lo cual provoca incremento en la emisión del N_2O . Ello estaría indicado por el incremento de NH_4^+ y NO_3^- que son el resultado de la mineralización del nitrógeno.

En términos generales, luego de pasada la influencia de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados, la emisión de este gas es baja y se mantiene con ligeras oscilaciones en el tiempo en valores que se pueden considerar basales.

3.1.3.2. Factor de emisión

El factor de emisión mostró ser menor ($P < 0,05$) cuando la forma de nitrógeno aplicada fue la urea convencional ($CO(NH_2)_2$), aunque este no difirió de los factores obtenidos con el nitrato de calcio ($CaNO_3$) y la urea RP (Fig. 5). El mayor valor ($P < 0,05$) para el factor de emisión se determinó con la aplicación de nitrógeno conteniendo amonio y nitrato (NH_4NO_3).



Valores promedio $\pm$ 1 EE, columnas con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

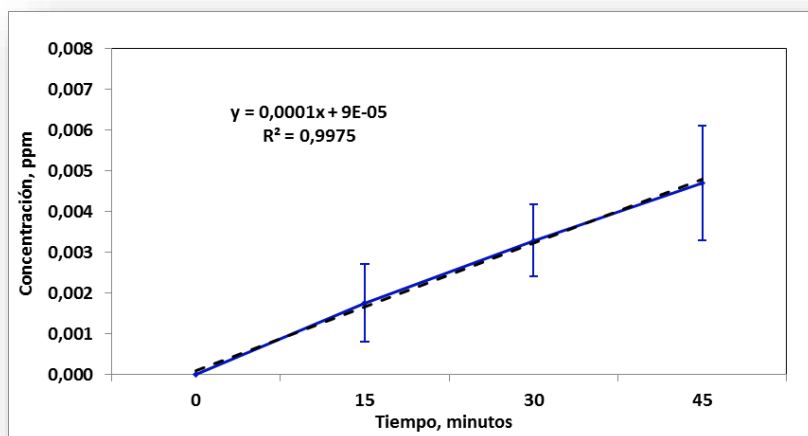
Fig. 5. Emisión anual de óxido nitroso determinado con diferentes dosis de nitrógeno aplicado a una plantación de café bajo sombra en Naranjo, Costa Rica.

Finalmente, es interesante observar que independientemente de la fuente de nitrógeno aplicado, si la misma contiene nitrato (NO_3^-) la emisión tiende a ser mayor que las restantes fuentes evaluadas (Fig. 7). De igual forma, la presencia de más de un precursor parece influenciar la emisión aunque no de manera significativa. Las ureas, que requieren un proceso de hidrólisis para la formación del NH_4^+ mostraron tendencia a emitir menos óxido nitroso.

3.2. San Marcos de Tarrazú

3.2.1. Flujo de emisión del óxido nitroso

El flujo de emisión mostró incremento lineal en la concentración (Fig. 6) durante el tiempo de muestreo. Por esta razón la recolección de dos muestras de gas en cada cámara, una al momento de colocarla en el campo, y otra 45 minutos después fue suficiente para cuantificar la emisión de este gas resultante de las investigaciones donde se aplicaron diferentes fuentes y dosis de nitrógeno.



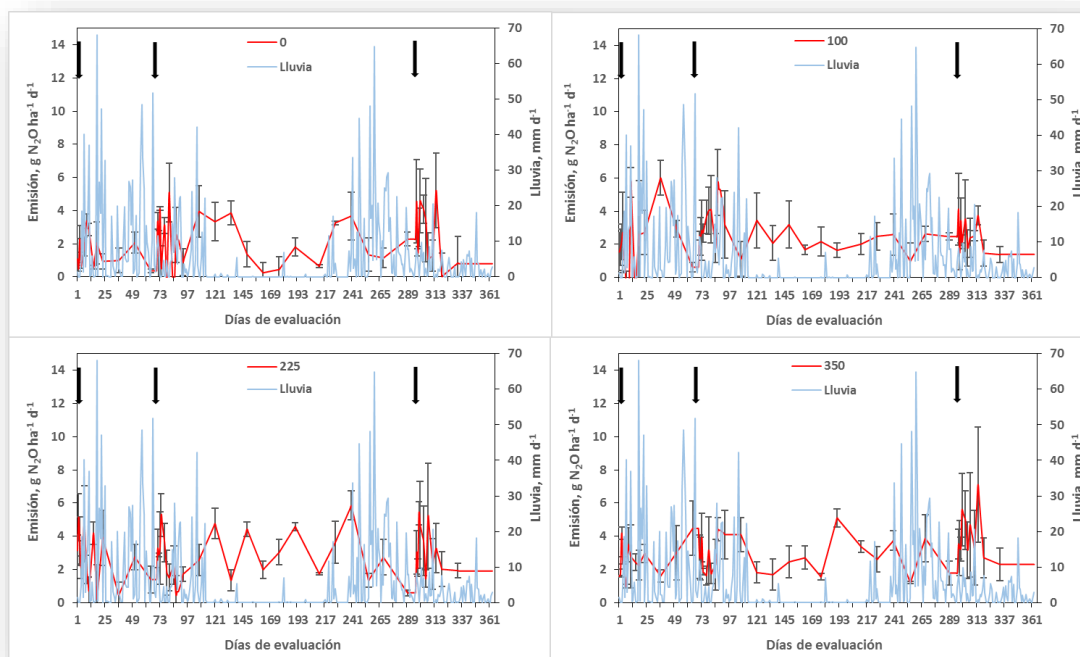
Valores promedio $\pm$ 1 EE

Figura 6. Flujo de emisión del óxido nítrico determinado en una plantación de café bajo sombra en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

3.2.2. Determinación de la emisión de óxido nítrico derivada de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno

3.2.2.1. Patrón de emisión

La emisión del óxido nítrico mostró un comportamiento fluctuante a lo largo del año, e independientemente de la dosis aplicada, los mayores eventos de emisión se presentaron durante los primeros días posteriores a la aplicación del fertilizante nitrogenado (Fig. 7), observándose mayores valores promedio de emisión en la tercera aplicación de nitrógeno.



Valores promedio $\pm$ 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

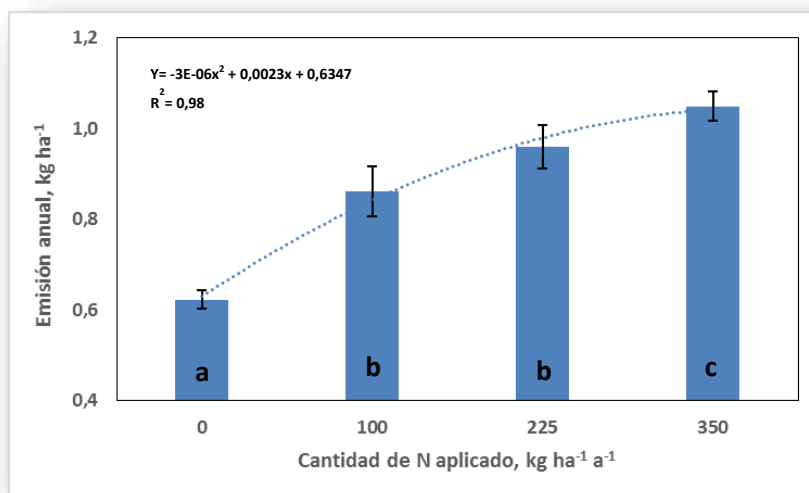
Figura 7. Patrón de emisión anual del óxido nitrroso, determinado con diferentes dosis de nitrógeno aplicados a una plantación de café bajo sombra en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

Con respecto al nivel de emisión basal a lo largo del año, el mismo se incrementa con la dosis de nitrógeno aplicada (Fig. 7).

Un aspecto a resaltar es el hecho de que con el inicio de las lluvias (día 217 de evaluación) se incrementó la emisión. El mayor contenido de agua en el suelo, producto del inicio de las lluvias, estimulan la actividad microbiana del suelo con el subsecuente aumento de la descomposición de la materia orgánica y con ello se presenta la liberación de compuestos nitrogenados contenidos en la materia orgánica, los cuales sirven como precursores del N_2O y ello explica para el incremento de la emisión observado. Previas investigaciones han señalado estas condiciones para explicar este aumento en la emisión del N_2O .

3.2.2.2. Factor de emisión

La emisión anual de óxido nitrroso determinada fue menor ($P < 0,05$) sin la aplicación de fertilizante, los mayores niveles ($P < 0,05$) se presentaron con la dosis de $350 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. La magnitud de la emisión anual con la aplicación de 100 y $225 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ fue similar entre ambos tratamientos, aunque diferentes ($P < 0,05$) de los restantes tratamientos (Fig. 8).



Promedio $\pm$ 1 EE, Valores con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

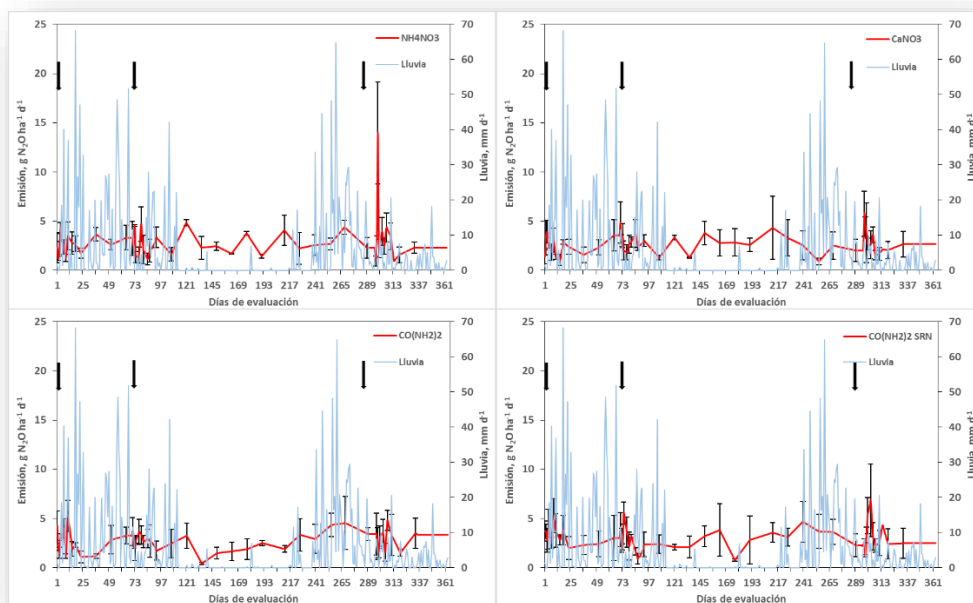
Figura 8. Emisión anual de óxido nitroso determinada con diferentes dosis de nitrógeno aplicado a una plantación de café bajo sombra en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

De acuerdo con los valores determinados, la curva de mejor ajuste es de tendencia polinómica de segundo orden ($r^2=0,98$), por lo que utilizando la ecuación correspondiente (Fig. 8) es posible obtener un estimado de la emisión que se podría generar si se fertiliza con alguna cantidad de nitrógeno que se ubique entre el valor menor y mayor utilizado en esta investigación, siempre y cuando se aplique la misma fuente de nitrógeno que la empleada en este experimento y para la zona donde el mismo se realizó.

3.2.3. Determinación de la emisión de óxido nitroso derivada de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno

3.2.3.1. Patrón de emisión

La emisión de N_2O proveniente de las diferentes fuentes de nitrógeno evaluadas mostró un comportamiento similar y fluctuante a lo largo del año. En general las mayores emisiones se presentaron en los días siguientes a la fertilización, siendo el promedio de esta mayor durante los primeros días luego del último evento de fertilización, que en esta localidad se realizó a inicios de junio (Fig. 9).



Valores promedio $\pm$ 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

Figura 9. Patrón de emisión del óxido nitroso determinado con diferentes fuentes de nitrógeno aplicados a una plantación de café bajo sombra en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

Después de la fertilización los picos de emisión del N_2O coinciden con eventos de lluvia pero en el caso de las ureas los eventos de emisión ocurrieron pocos días luego de la lluvia (Fig. 9). Esto último se explica por el proceso de hidrólisis que ocurre con este compuesto nitrogenado donde se libera amonio y con las condiciones de suelo producto de la lluvia ocurre nitrificación y denitrificación, procesos que conllevan a la formación del óxido nitroso.

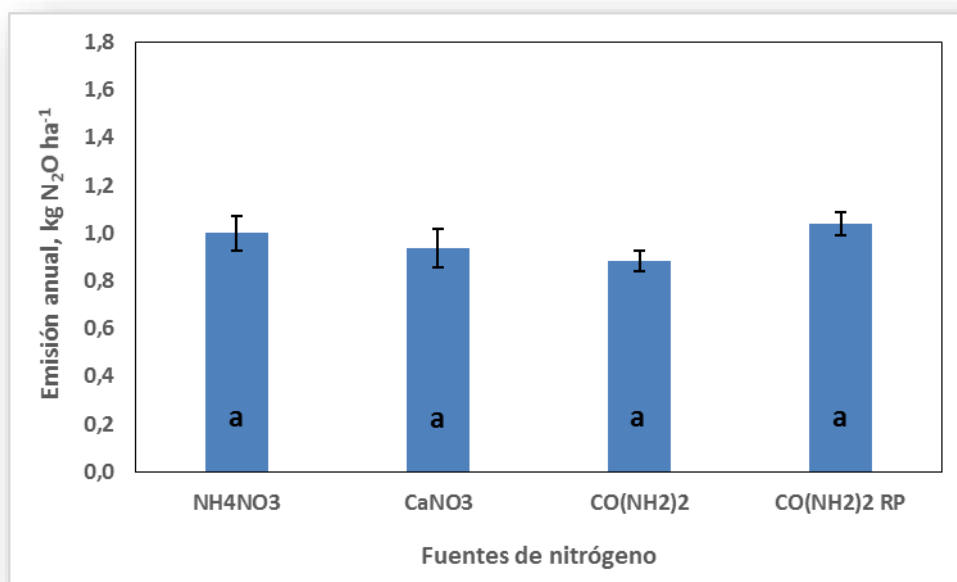
La lluvia ejerce efecto en la magnitud de la emisión observada mediante el incremento de la humedad del suelo y la disminución de la disponibilidad de oxígeno en este. El incremento en la disponibilidad de nitrógeno proveniente de la fertilización aunado a las condiciones de suelo anteriormente mencionadas hace que se favorezca la formación y posterior liberación del N_2O .

En términos generales, luego de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados la emisión de este gas es baja y se mantiene con ligeras oscilaciones en el tiempo en valores que se pueden considerar basales, los cuales son inferiores a $3 \text{ g ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

3.2.3.2. Factor de emisión

La emisión anual entre las diferentes fuentes de nitrógeno evaluadas fue similar ($P > 0,05$, Fig. 10) lo cual parece indicar que para cualquiera de ellas aplicar el mismo factor de emisión sería razonable. En consecuencia, para esta dosis en particular ($250 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y para la

región donde se realizó esta evaluación el factor de emisión sería $0,97 \pm 0,03 \text{ kg de N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, aunque la aplicación de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ parece tener tendencia a emitir menos N_2O (Fig. 10).



Promedio ± 1 EE, Valores con diferente letra difieren al nivel $P < 0,05$

Figura 10. Emisión anual acumulada de N_2O determinada con diferentes fuentes de nitrógeno aplicadas a una plantación de café bajo sombra en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

Es interesante observar que independientemente de la fuente aplicada, si la misma contiene el nitrógeno en la forma de nitrato (NO_3^-) la emisión tiende a ser mayor que con la urea convencional (Fig. 10). De igual forma, si el fertilizante tiene dos precursores del N_2O (NH_4^+ y NO_3^-) la emisión de este gas tiende a incrementarse comparado con aquella fuente que solo tiene uno.

4. Conclusiones

De acuerdo a las condiciones en las cuales se desarrollaron las presentes investigaciones se puede concluir para **todos** los experimentos:

.- Existe un patrón de emisión, en el cual se observaron los mayores eventos inmediatamente después de la aplicación del fertilizante, los cuales disminuyen a partir de la segunda-tercera semana después de la fertilización.

.- Los eventos de mayor magnitud en la emisión se presentaron en la primera fertilización realizada a finales de mayo del 2016 en la comunidad de Naranjo, o bien en la última realizada en San Marcos de Tarrazú.

.- Las lluvias parecen influenciar la emisión solamente durante los primeros días luego de aplicado el fertilizante donde coinciden eventos de emisión con los lluviosos.

En el caso de los experimentos donde se evaluaron las diferentes **dosís** de fertilizante nitrogenado, se concluye que:

.- Se determinó que existe emisión de N_2O aún sin aplicación de fertilizante nitrogenado, ello fue observado en el tratamiento testigo.

.- La emisión de óxido nitroso determinada en el tratamiento sin fertilizante nitrogenado fue estadísticamente menor a los restantes tratamientos.

.- Se determinó incremento en la emisión del óxido nitroso conforme se aumentó la cantidad aplicada de fertilizante nitrogenado, aunque las dosis de 100 y 225 kg de N $ha^{-1} a^{-1}$ mostraron similares valores desde el punto de vista estadístico.

.- La mayor emisión de N_2O se determinó con la aplicación de 350 kg de N $ha^{-1} a^{-1}$.

Para el experimento donde se evaluaron las diferentes **fuentes** de fertilizante nitrogenado, se concluye que:

.- La aplicación de nitrógeno con la urea convencional, comparado con el nitrato de amonio, resultó en menor emisión de óxido nitroso en Naranjo, y en general con tendencia a emitir menos del gas en mención que las restantes fuentes.

.- La presencia de precursores del N_2O , en la forma química del nitrógeno utilizado como fertilizante, parece influenciar la emisión de este gas, siendo mayor la emisión cuando hubo presencia de ellos.

Basado en lo anterior se recomienda:

.- Utilizar la información generada para estimar la cantidad de óxido nitroso generada por la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en zonas agroecológicas similares cuando se usen dosis y fuentes similares a las evaluadas en las presentes investigaciones.

.- Utilizar la fuente de nitrógeno que mostró menor emisión de óxido nitroso para ser aplicada en plantaciones ubicadas en las zonas agroecológicas donde se realizaron las presentes evaluaciones.

.- Continuar con las evaluaciones de campo por al menos un año más, de manera que se pueda obtener información de la emisión del óxido nitroso bajo la influencia cambiante de las variables climáticas que usualmente difieren entre años.

.- La continuación de este tipo de evaluación por períodos mayores a un año posibilita la obtención de datos más robustos y el índice de emisión se podrían extrapolar con mayor seguridad.

.- Realizar este tipo de evaluación en otras zonas cafetaleras de relevancia en el país para tener datos más específicos y de acuerdo con las condiciones agroecológicas donde las mismas se desarrollan.

