



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos

Laura Natalia Arenas Calle

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia
2015

Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos

Laura Natalia Arenas Calle

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Directores:

Juan Carlos Menjivar Flores., Ph.D

Ngonidzashe Chirinda., Ph.D

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia

2015

*A mi familia, y a todas las personas que
Me acompañaron y apoyaron durante este proceso.*

Agradecimientos

Al doctor Ngonidzashe Chirinda por brindarme la oportunidad de trabajar y aprender bajo su supervisión, convirtiéndose en un gran ejemplo a seguir, igualmente a la red CLIFF (The Climate Food and Farming Network) por el apoyo económico durante el desarrollo del trabajo.

Al profesor Juan Carlos Menjivar Flores por su apoyo moral y académico desde mi llegada a la universidad, además de la gran formación académica en suelos.

Al laboratorio de Gases de efecto invernadero-CIAT (Sandra Loaiza, Paula Chaparro, Andres Urrea y Catalina Trujillo) por todo el aprendizaje y apoyo en el trabajo de campo y laboratorio, igualmente por su amistad incondicional y el agradable ambiente de trabajo.

Al grupo de Suelos-CIAT por todo el apoyo y cariño.

A todas las personas en CIAT pertenecientes a otros grupos a los cuales acudí y me ayudaron desinteresadamente, muchas gracias!.

Resumen

El suelo libera hacia la atmosfera una cantidad significativa de gases de efecto invernadero (GEI) como CH₄, N₂O y CO₂ provenientes de diferentes usos del suelo. En el suelo, la técnica de la cámara estática cerrada es la técnica más usada para hacer mediciones de GEI y los científicos trabajan en mejorar la técnica y hacer más confiables los datos obtenidos. En el presente estudio, se evaluó el momento del día óptimo para medir GEI, fueron comparadas las mediciones hechas con diferentes diseños de cámara estática cerrada y metodologías de muestreo (Convencional y *Gas Pooling*), así como los intervalos de tiempo óptimos. Todas estas evaluaciones fueron llevadas a cabo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y las muestras fueron analizadas en el laboratorio de GEI usando cromatografía gaseosa. Los resultados mostraron que el tiempo del día óptimo fue entre las 8-12 pm, esto estuvo en de acuerdo con diferentes autores, sin embargo se considera que evitar los picos altos de temperatura en el día puede ser un buen criterio. Respecto a los diseños de cámaras, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los flujos de GEI de diferentes diseños. Estas diferencias pudieron deberse a las diferentes alturas de las cámaras, a la mezcla de la muestra o el alta diferencia de la temperatura del aire dentro del espacio de la cámara. Los flujos de N₂O y el CH₄, fueron más altos en el diseño convencional que en el diseño propuesto porque estos son gases traza y la cámara grande pudo perder sensibilidad (límite de detección). La metodología convencional y *Gas Pooling*, conservaron la misma tendencia en los flujos y difieren entre 1-6% en CH₄, 10-20% en CO₂, y 36% en N₂O, en la mayoría de los casos este porcentaje se debe a puntos atípicos en el promedio.

Key Words: cámara estática cerrada, Diseños, Metano, Óxido nitroso, Dióxido de carbono, *Gas Pooling*.

Abstract

The soil release to atmosphere a significant amount to GHG like CO₂, CH₄ and N₂O from different land use. In the soil, the static chambers technique is the most used technique for measuring GHG, scientific work in improve the technique and make more reliable the data obtained. In the present study, were evaluated the optimal time of daytime for GHG measuring, were compared of measurements made with different static closed chamber designs and methodology of sampling (Conventional and *Gas Pooling*) as well as the optimal time intervals for measuring GHG in soils. All evaluations were carried in the International Center of Tropical Agriculture (CIAT) and the samples were analyzed in GHG laboratory using gas cromathography. The results showed that the optimal time of daytime was between 8-12 pm, this was agreeing with different authors however, it is considered that avoid the high temperature peaks in the day, can be a good criteria. Respect to chamber designs, were found significative differences ($P < 0.05$) between GHG fluxes of diffentes designs, These differences, maybe due to height, mixing of sample or the high difference in the temperature inside of chamber between designs. The N₂O and CH₄, fluxes were more higher in the conventional design (smaller) than in the proposal design because them are trace gases and big chambers could lose sensibility (limit of detection). The Conventional and Gas Pooling methodologies preserve the same tendency in the fluxes and differ between 1-6% in CH₄, 10-20% in CO₂, and 36% in N₂O, the mostly case this percent it's due to outliers in the average.

Key Words: Static-closed chamber, Designs, Methane, Nitrous oxide, Dioxide Carbon, *Gas Pooling*.

Lista abreviaturas

Abreviatura	Término
GEI	Gases de efecto invernadero
CO₂	Dióxido de carbono
CH₄	Metano
O₃	Ozono troposférico
CFC	Clorofluorocarbonos
GWP	Global Warming Potential
PVC	Policloruro de vinilo
NH₄⁺	Amonio
N₂	Nitrógeno
NO₃	Nitrato
NO₂	Nitrito
N₂O	Óxido nitroso
ECD	Detector por captura de electrones
FID	Detector por ionización de llama
PPM	Partes por millón

Lista de gráficas y figuras

Figura 1-1: Efecto invernadero y calentamiento global	21
Figura 1-2: Ciclo del CO ₂ en el suelo y sus transformaciones	23
Figura 1-3: Ciclo del metano.....	25
Figura 1-4: Formación del Óxido nitroso en el suelo.....	27
Figura 1-5: Diámetro y longitud óptimos para un tubo de ventilación a diferentes condiciones	32
Figura 1-6: Concepto de la técnica de “Gas Pooling”	37
Figura 2-1: Cromatógrafo de gases GC-2014.....	39
Figura 2-2: imágenes del diseño propuesto.....	41
Figura 2-3. Ubicación geográfica del área de muestreo.....	42
Figura 2-4.: Esquema de las parcelas y la distancia entre cámaras	44
Grafica 3-1: Flujos diarios de CO ₂ en las diferentes épocas de muestreo	48
Gráfica 3-2: Flujos de CO ₂ y temperatura de aire durante 24 horas.....	49
Gráfica. 3-3: Cociente entre el flujo promedio diario de CO ₂ y los flujos de cada hora	51
Grafica 3-4: Flujos diarios de CH ₄ en las diferentes épocas de muestreo.....	53
Gráfica 3-5: Flujos de CH ₄ y temperatura de aire durante 24 horas.....	54
Gráfica. 3-6: Cociente entre el flujo promedio diario de CH ₄ y los flujos de cada hora	55
Grafica 3-7: Flujos diarios de N ₂ O en las diferentes épocas de muestreo.	57
Gráfica 3-8: Flujos de N ₂ O y temperatura de aire durante 24 horas.....	59
Gráfica. 3-9: Cociente entre el flujo promedio diario de N ₂ O y los flujos de cada hora para	61
Gráfica 3-10. Promedio de la temperatura (°C) interna de la cámara, temperatura ambiental y temperatura máxima de cada día de muestreo.....	64
Gráfica 3-11: Comparación de flujos de CO ₂ medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes	67
Gráfica 3-12: Tasa de emisión de CO ₂ a diferentes intervalos de tiempo transcurridos durante el muestreo	68

Gráfica 3-13. Comparación de flujos de CH ₄ medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes	70
Gráfica 3-14. Comparación de flujos de N ₂ O medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes	71
Gráfica 3-12. Flujos acumulados para CO ₂ usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes	73
Gráfica 3-13. Flujos acumulados para CH ₄ usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes	74
Gráfica 3-14. Flujos acumulados para N ₂ O usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes	75
Grafica 3-14. Flujos de CO ₂ de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de <i>Gas Pooling</i>	77
Grafica 3-15. Flujos de CH ₄ de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de <i>Gas Pooling</i>	78
Grafica 3-16. Flujos de N ₂ O de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de <i>Gas Pooling</i>	79

Lista de Tablas

Tabla 1-1: Potencial de Calentamiento global de los principales Gases de efecto invernadero. (IPCC., 2007).....	21
Tabla 1-2: Comparación entre las técnicas de la cámara estática y las técnicas micrometeorológicas	29
Tabla 2-1: Características generales de una cámara estática cerrada con valores poco recomendados, recomendados y valores del diseño propuesto	41
Tabla 2-2: Especificaciones generales de los tres diseños de cámaras comparados. Cámara pequeña y cámara grande de PVC y cámara propuesta	43
Tabla 3-1. Comparación de diferentes aspectos técnicos de los diseños de cámaras convencional y el diseño de cámara propuesto	63
Tabla 3-5. Coeficientes de correlación de Pearson y diferencia expresada en porcentaje para los flujos de GEI medidos con las técnicas convencional y “ <i>Gas Pooling</i> ”	76

Contenido

Resumen	VI
Abstract.....	VII
Lista abreviaturas.....	VIII
Lista de gráficas y figuras	IX
Lista de Tablas.....	XI
Introducción	15
Planteamiento del problema.....	17
Objetivos.....	18
Justificación	19
1. Marco teórico	20
1.1. Gases de efecto invernadero y calentamiento global	20
1.2. Gases de efecto invernadero provenientes del suelo	22
1.2.1. Dióxido de carbono proveniente del suelo	22
1.2.2. Metano proveniente del suelo	24
1.2.3. Óxido nitroso proveniente del suelo	26
1.3. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos.....	28
1.4. Diseño de Cámara estática cerrada	29
1.4.1. Materiales	30
1.4.2. Dimensiones.....	31
1.4.3. Ventilación	32
1.4.4. Mezcla del Gas	33
1.5. Condiciones que afectan las mediciones de gases de efecto invernadero realizadas con cámara estática cerrada en suelos	33
1.5.1. Temperatura	33

1.5.2.	Diferencia de Presión	34
1.5.3.	Perturbaciones del suelo	34
1.5.4.	Variaciones Espacio-Temporales	35
1.6.	Técnica de muestro convencional	36
1.7.	Técnica de muestreo “ <i>Gas Pooling</i> ”	36
2.	Materiales y métodos	38
2.1.	Localización	38
2.2.	Diseño experimental.....	38
2.3.	Análisis estadístico de la información	39
2.4.	Cuantificación de GEI en laboratorio	39
2.5.	Diseño Y Construcción De Cámara Estática Cerrada.....	40
2.6.	Fase de Campo.....	42
2.6.1.	Momento del día apropiado de muestreo	42
2.6.2.	Comparación de los flujos de GEI con diferentes diseños de cámaras estáticas cerradas	43
2.6.3.	Comparación de Técnicas de Muestreo	45
2.6.4.	Tiempo adecuado del muestreo	45
2.7.	Calculo de Flujos.....	46
3.	Resultados y discusión.....	47
3.1.	Momento del día adecuado para realizar muestreos	47
3.1.1.	Variación temporal del dióxido de carbono CO ₂	47
3.1.2.	Variación diaria del CO ₂ en el suelo	48
3.1.3.	Momento del día adecuado para medir CO ₂	51
3.1.4.	Variación temporal del Metano (CH ₄)	52
3.1.5.	Variación diaria del CH ₄ en el suelo	54
3.1.6.	Momento del día adecuado para medir CH ₄	55
3.1.7.	Variación temporal del Óxido Nitroso (N ₂ O)	57
3.1.8.	Variación diaria del N ₂ O en el suelo	58
3.1.9.	Momento del día adecuado para medir N ₂ O.....	60
3.1.10.	Momento del día óptimo para medir los GEI en el suelo	61
3.2.	Comparación de los flujos de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O usando diferentes diseños de cámara estática cerrada	62
3.2.1.	Comparación de la temperatura interna de la cámara en los diferentes diseños	64

3.2.2.	Flujos de CO ₂ usando diferentes diseños de cámara estática cerrada.....	66
3.2.3.	Flujos de CH ₄ y N ₂ O usando diferentes diseños de cámara estática cerrada	69
3.2.4.	Comparación de flujos acumulados de los GEI.....	73
3.3.	Comparación las emisiones de GEI obtenidas con la técnica de Gas Pooling y las de la técnica convencional	76
3.3.1.	Flujos de CO ₂ a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling	77
3.3.2.	Flujos de CH ₄ a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling	78
3.3.3.	Flujos de N ₂ O a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling	79
3.3.4.	Análisis a partir de los resultados obtenidos usando la técnica convencional y Gas Pooling	80
4.	Conclusiones	81
5.	Recomendaciones	82
	Bibliografía.....	83

Introducción

La creciente preocupación por el calentamiento global y subsecuente cambio climático ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la precisión en la estimación de los flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en una amplia gama de escalas. De los múltiples sectores responsables de las emisiones de GEI, la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, la cual, según la FAO ha incrementado sus emisiones en más del 130% en los últimos 50 años en la región de América Latina y el Caribe, requieren del uso de diferentes técnicas que se ajusten a la amplia variedad de sistemas, prácticas y manejos que deben ser evaluados, generando datos e información confiables.

Dentro de las técnicas para la estimación de emisiones provenientes del suelo, que van desde técnicas micrometeorológicas hasta modelamiento matemático, existe una técnica basada en diferentes tipos de cámaras estáticas que son probablemente el método más utilizado en la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el suelos. (Norman *et al.*, 1997; Davidson *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2006; Heinemeyer y McNamara, 2011).

De los diferentes tipos de cámaras existentes, la cámara estática cerrada es la alternativa más económica y práctica dentro de todas las cámaras conocidas para llevar a cabo estudios de respiración de suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), entre otros. Sin embargo, la perturbación del suelo en el momento de la instalación, la heterogeneidad del suelo, las condiciones meteorológicas y el microclima que se genera dentro de las cámaras al momento de tomar las muestras entre otros factores puede afectar el resultado final de la medición.

Los aspectos metodológicos susceptibles a generar un sesgo en los datos, no han pasado inadvertidos para los investigadores quienes han trabajado en diseñar e implementar mejoras en los diseños existentes de cámaras estáticas con el fin de minimizar los errores de estimación. Una extensa literatura reporta los efectos de las diferencias de presión, humedad, temperatura y heterogeneidad del suelo sobre el comportamiento de los gases dentro de la cámara, paralelamente se han evaluado los aspectos técnicos del diseño de la cámara, tales como el tipo de material, dimensiones, forma geométrica, ventilación, aislamiento, entre otros.

Con subestimaciones que bajo algunas condiciones puede ser de 20% hasta 40% (Christiansen *et al.*, 2011; Livingston y Hutchinson, 1995) los investigadores deben sumar verdadera importancia al diseño y protocolo de muestreo del cual se obtienen los datos que alimentan los modelos matemáticos con los que se busca predecir la evolución de las emisiones, para de esta forma contar con una mayor confiabilidad cuando se realizan comparaciones entre diferentes investigaciones y se realizan conceptos científicos sobre los impactos de determinado sistema o manejo del suelo

Planteamiento del problema

La subestimación de los flujos de gases en el suelo tiene importantes implicaciones en la cuantificación de los gases de efecto invernadero y en la determinación precisa de los aportes que realizan al calentamiento global. (Venterea y Baker., 2008) Se tiene amplio conocimiento de que la instalación de la cámara en el suelo suprime el gradiente de concentración en la interfase suelo-atmósfera lo que resulta en la no linealidad de los datos y una subestimación del flujo hasta en un 40% (Livingston y Hutchinson, 1995; Venterea et al, 2008).

Debido a que la metodología tiene implícita una intervención y alteración de las condiciones ambientales habituales, Rochette y Eriksen-Hamel (2008), concluyeron que del 50 al 60% de los datos reportados son datos que tienen niveles de confianza bajos o muy bajos debido a métodos inadecuados. Estudios previos (Rochette *et al.*, 1992; Norman *et al.*, 1997; Pumpanem *et al.*, 2004) muestran claramente una subestimación de los flujos en los sistemas de cámara cerrada ya que la respuesta ambiental puede no reflejar las condiciones in situ del flujo de gas y como tal, en caso de existir estimaciones con un sesgo ya sea positivo o negativo no sería adecuado para sustentar el desarrollo de un modelo exacto y su validación (Heinemeyer y McNamara, 2011).

Los problemas relacionados con la metodología de la cámara tales como la acumulación del gas en la parte superior de la cámara, perturbaciones de presión o fugas han sido evaluados como los causantes de los sesgos que pueden causar errores en mediciones, pero estas fuentes de error ya han sido ampliamente descritas y analizadas en la literatura y se pueden minimizar o evitar con diseños de cámara y protocolos de toma de gases adecuados que logren minimizar y homogenizar las diferencias en las condiciones ambientales en que se miden los gases. (Davidson, *et al.*, 2002; Christiansen *et al.*, 2011).

Objetivos

General

Evaluar las emisiones de flujos de gases de efecto invernadero en suelos del centro internacional de agricultura tropical (CIAT), obtenidas a partir de diferentes diseños de cámara estática cerrada, usando dos metodologías de muestreo (Convencional y *Gas Pooling*).

Específicos

- Establecer un momento óptimo para realizar las mediciones basadas en las variaciones diurnas de las emisiones de GEI.
- Comparar las mediciones de flujos de gases (CO₂, CH₄ y N₂O) determinadas con la cámara estática cerrada convencional y un modelo de cámara propuesto.
- Comparar las emisiones de GEI obtenidas con la técnica de *Gas Pooling* y las de la técnica convencional.

Justificación

La ventaja de las cámaras en comparación con otras técnicas de medición, como los enfoques micrometeorológicos, es su fácil implementación y bajo costo de operación. Debido a que los requisitos de energía son bajos, las mediciones con cámara cerrada se pueden realizar en las regiones remotas, además no se requieren grandes áreas experimentales por lo cual facilita realizar experimentos con muchos tratamientos (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011). Dado que la metodología presenta una cantidad significativa de ventajas técnicas y metodológicas vale la pena enfocar los esfuerzos en mejorar los diseños y protocolos para reducir los sesgos generados durante los muestreos con las cámaras.

Con el fin de minimizar estos errores relacionados con las medidas de gases en el suelo, (como el CO₂, CH₄ y N₂O), existe la necesidad de llevar a cabo la evaluación de las cámaras con el fin de reevaluar su diseño y proponer mejoras. Es imperativo afianzar los conocimientos sobre las diferencias entre los distintos diseños de cámaras estáticas normalmente utilizadas para medir los flujos de gases en suelos con el fin de determinar la viabilidad técnica de estas y de qué manera se podría reducir los errores de muestreo.

Lo que se busca con investigaciones que aborden aspectos técnicos y metodológicos de la captura de gases en el suelo, es mejorar las condiciones en las que se toman las muestras, buscando minimizar las estimaciones erróneas durante el muestreo considerando la extensa revisión que se ha hecho sobre los factores que pueden subestimar o sobreestimar los flujos a la hora de extrapolarlos y así reducir la incertidumbre que acompañan los datos, de esta forma los modelos que se alimentan con dicha información podrán tener una mejor aproximación al fenómeno tal como se da en el ambiente y así los investigadores tener una visión más realista de los impactos generados en ecosistemas objeto de estudio

1. Marco teórico

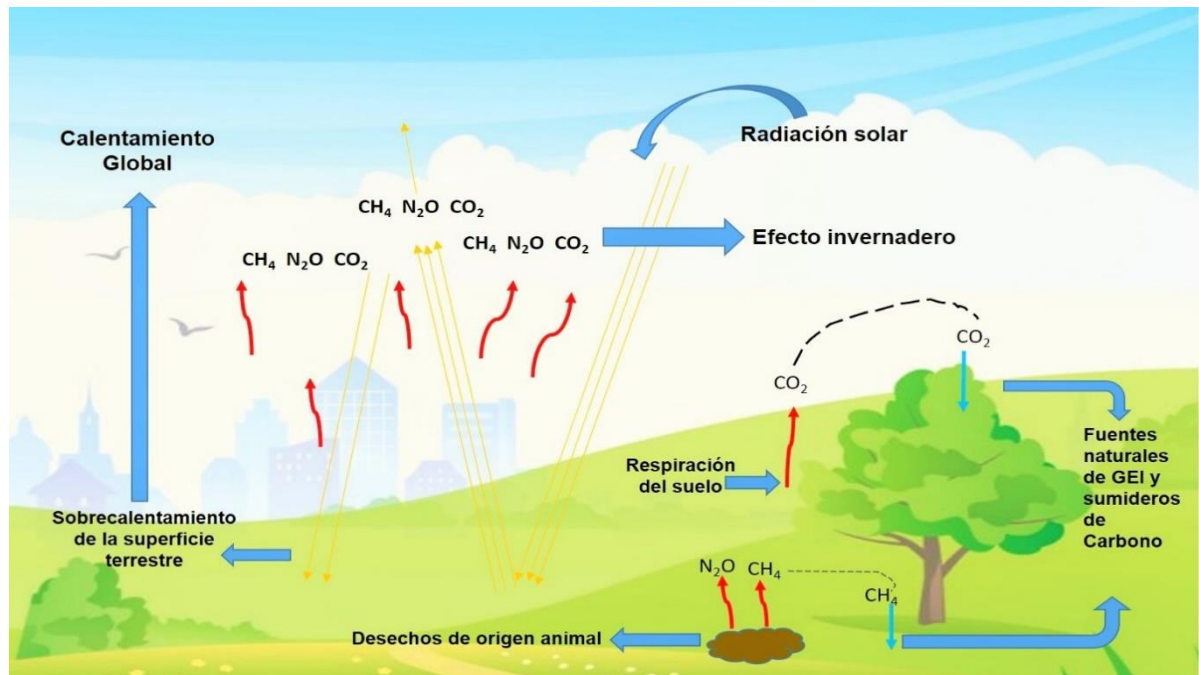
1.1. Gases de efecto invernadero y calentamiento global

Durante las últimas décadas, el calentamiento global ha sido estudiado por diferentes disciplinas, las cuales han estimado aumentos en la temperatura de la atmósfera y los océanos, debido principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono troposférico (O_3) y los clorofluorocarbonos (CFC) (IPCC., 2007).

Lo que la comunidad científica ha definido como calentamiento global, es el aumento de la temperatura debido a un incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que ha llevado a una mayor retención de la radiación solar sobre la superficie del planeta, reduciendo las pérdidas atmosféricas de esta radiación, generándose así, dicho sobrecalentamiento. (Chiaradia *et al.*, 2009, Muñoz *et al.*, 2010) (Figura 1-1). Este incremento de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC), es derivado de las actividades antropogénicas como deforestación, quema de biomasa, sobreexplotación de combustibles fósiles, agricultura y establecimiento de sistemas pecuarios entre otras actividades. (Hsu *et al.*, 2009).

Estas actividades humanas, generan una cantidad de GEI mucho mayor a la que los ecosistemas se encuentran en capacidad de asimilar, llevando su capacidad de amortiguación al límite, produciendo así, desequilibrios en los flujos de estos gases emitidos a la atmósfera, incluso transformando en importantes fuentes de emisión algunos ecosistemas (Shaver *et al.*, 2000).

Figura 1-1: Efecto invernadero y calentamiento global



Fuente: Elaboración propia

Después de ser liberados a la atmósfera, los GEI presentan diferente capacidad de provocar calentamiento global, lo cual depende de su poder de radiación y el tiempo promedio que la molécula del gas permanece en la atmósfera. Estos dos factores son considerados para determinar lo que se conoce como el “Potencial de Calentamiento Global” o GWP (Global Warming Potential). La Tabla 1-1 muestra la contribución al calentamiento global de los principales gases de efecto invernadero.

Tabla 1-1: Potencial de Calentamiento global de los principales Gases de efecto invernadero. (IPCC., 2007)

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL			
GAS	20 años	100 años	500 años
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1	1	1
Metano (CH ₄)	72	25	8
Óxido Nitroso (N ₂ O)	289	289	153

1.2. Gases de efecto invernadero provenientes del suelo

El suelo es una de las principales fuentes de GEI, tanto por las emisiones de origen antropogénico debidas a la gestión y manejo de los usos del suelo las cuales contribuyen al 20% de las emisiones antropogénicas totales, como por las emisiones biogénicas provenientes de procesos biogeoquímicos dentro de los ecosistemas (IPCC., 2007, Blagodatsky y Smith., 2012, Smith *et al.*, 2003, Metay., *et al* 2007). A su vez, los suelos pueden actuar como sumideros de CH_4 y N_2O , por lo tanto, la evaluación de la capacidad y potencial captura de carbono por parte de los suelos se presenta como una opción para reducir emisiones de GEI reduciendo el efecto negativo que causa el aumento de las concentraciones de estos gases en la atmósfera (Singh *et al.*, 2010, Chapuis-Lardy *et al.*, 2007).

Según reportes de Magrin *et al.*, (2014), en el período comprendido entre 2001-2010, la mayor fuente de emisiones dentro del componente suelo y usos de la tierra fue la agricultura (50%), seguido por la conversión de bosques (38%), la degradación de sabanas (11%) y quema de biomasa (1%); en contraste, el Bosque (manejo forestal y forestación) aportaron el (100%) de la captación de carbono, actuando así como sumidero. El alto porcentaje atribuido a la agricultura se debe a las diferentes practicas agronómicas como la fertilización sintética, la inundación de grandes áreas para el cultivo de arroz y el manejo de las pasturas para ganadería, entre otras actividades (IPCC., 2007, Diaz-Rojas *et al.*, 2014).

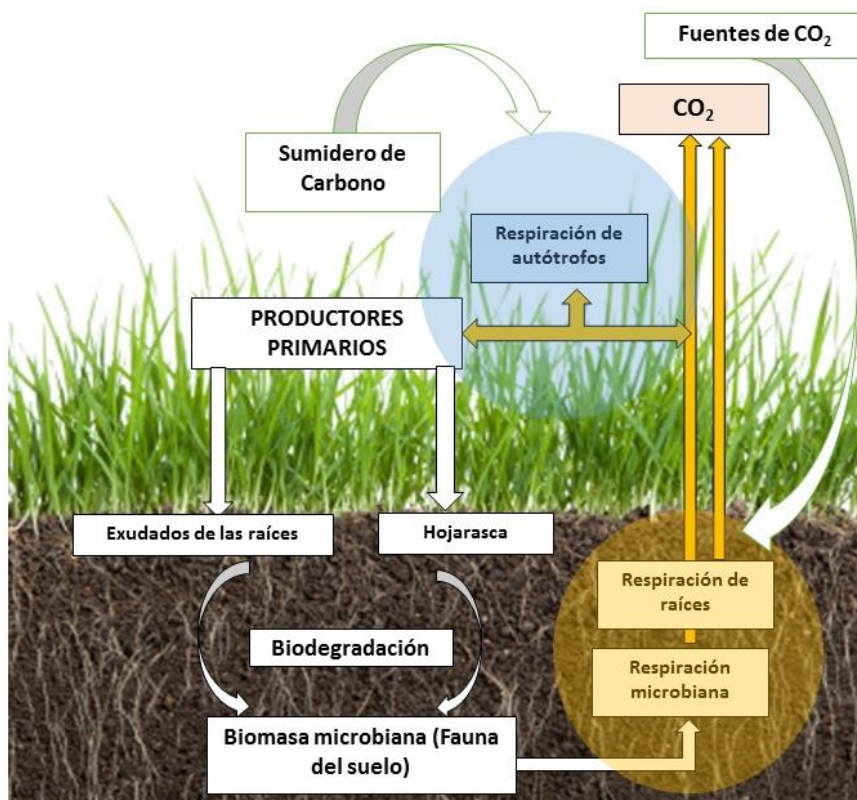
1.2.1. Dióxido de carbono proveniente del suelo

El dióxido de Carbono (CO_2) es el gas de efecto invernadero más importante y representativo ya que aporta el 77% de las emisiones de gases antropogénicos (Hsu *et al.*, 2009). Aunque el potencial de calentamiento global del CO_2 es el más bajo, desempeña un papel vital en los procesos de respiración y fotosíntesis en las plantas al ser la única fuente de carbono usada en el este proceso, siendo entonces un componente importante dentro del ciclo biogeoquímico del carbono.

Dentro del ciclo del carbono en el cual el dióxido de carbono es protagonista, la actividad microbiana y la respiración de las raíces son las principales fuentes de producción de

CO₂, una vez liberado a la atmósfera por procesos de difusión, una porción del CO₂ que ahora se encuentra en la atmósfera es fijado a través de la fotosíntesis y se almacena en el suelo como materia orgánica, el cual es usado nuevamente por los microorganismos como sustrato, oxidando el C en el suelo a CO₂ (Figura.1-2). Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la principal fuente de emisiones netas de CO₂ en la atmósfera es la de los procesos erosivos y oxidativos asociados a los cultivos agrícolas y sus prácticas agrícolas que alteran el balance a largo plazo de C y N orgánico del suelo. (Muñoz et al., 2010, Brito et al., 2009. Fang y Moncrieff., 1999, Rochette y Hutchinson et al., 2005, Silver et al., 2005)

Figura 1-2: Ciclo del CO₂ en el suelo y sus transformaciones



Fuente: Elaboración propia

La producción de CO₂ en el suelo depende de la velocidad de descomposición la cual está determinada por la cantidad y calidad de los sustratos orgánicos, la dinámica de las

poblaciones de los diversos grupos descomponedores, y el entorno físico-químico del suelo como la humedad, la temperatura, el oxígeno, la acidez, el potencial redox entre otras variables (Coleman y Crossley., 1996, Smith *et al.*, 2003)

Como se mencionó anteriormente, la producción de CO₂ está mediada por la respiración y actividad de la biota en el suelo, pero se debe tener en cuenta que estos procesos varían según el ecosistema, los cuales se caracterizan por poseer una variabilidad temporal y espacial específica. Incluso, dentro de suelos de un mismo ecosistema se presenta una heterogeneidad espacial alta (Fang *et al.*, 1998), igualmente se presentan variaciones a través de pequeñas escalas de tiempo como fluctuaciones nictemerales o de cambios estacionales en ecosistemas templados (Xu y Qi, 2001, Han *et al.*, 2007)

1.2.2. Metano proveniente del suelo

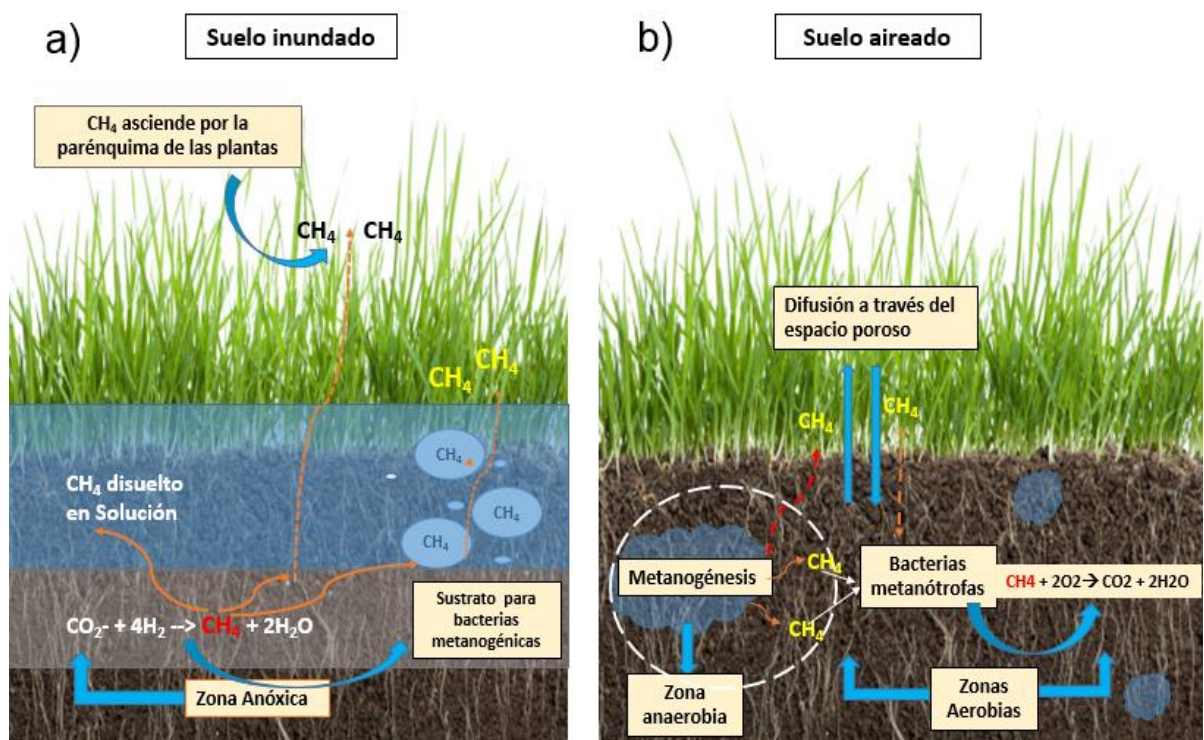
Después del CO₂, el Metano (CH₄) es el segundo gas de efecto invernadero más importante y conocido ya que se estima que contribuye al 18% del calentamiento global (Denmead *et al.*, 2008), además de jugar un papel clave en la química atmosférica al afectar significativamente los niveles de ozono, vapor de agua, radicales hidroxilo, y otros compuestos, con el agravante de su prolongado potencial de calentamiento global que lo hace más nocivo que el CO₂ (Wuebbles y Hayhoe, 2002, Butterbach-Bahl *et al.*, 2011). En el suelo, el metano se encuentra involucrado en dos procesos microbianos que dependiendo cual desempeñe un papel predominante, pueden hacer del suelo una fuente o sumidero de metano; el primero, es la metanogénesis la cual es un proceso anaeróbico responsable de la producción del CH₄ y el segundo la metanotrofia que es favorecida por condiciones aeróbicas en el suelo y es responsable de la oxidación del gas (Hutsch., 2001, Tate *et al.*, 2015)

Como se mencionó anteriormente, el metano es producido por metanogénesis en condiciones estrictamente anaerobias y potencial redox muy bajo (Ponnamperuma., 1972). La producción de metano comienza después de la reducción de todo el oxígeno molecular presente, donde los diferentes grupos de bacterias metanogénicas empiezan a producir el metano a partir de diferentes substratos: puede ser utilizando el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono o compuestos metilados como el metanol y las metilaminas. (Ponnamperuma., 1972, Hernández., 2010, Torres-Alvarado *et al.*, 2005).

En contraste, organismos metanótrofos oxidan el metano, este proceso bien puede ocurrir en presencia de oxígeno (oxidación aerobia) o en ausencia de oxígeno (oxidación anaerobia), sin embargo en condiciones anaerobias los grupos de bacterias predominantes son las metanogénicas anaerobias, por consiguiente es en condiciones aerobias donde la oxidación del metano toma mayor notoriedad (Hernández., 2010). La oxidación del metano por parte de los microorganismos se da usando el CO_2 como aceptor de electrones y liberando metanol como un producto intermedio, este proceso predomina cerca a las raíces donde la disponibilidad de CO_2 y O_2 hace posible las reacciones bioquímicas para estos grupos de microorganismos que usan el Carbono del CH_4 como su fuente de energía y generación de biomasa (Hernandez., 2010, Torres-Alvarado et al., 2005, Fazli et al. 2013)

En suelos aireados, las emisiones netas de CH_4 resultan de la interacción de los procesos de consumo y producción de metano llevados a cabo por las bacterias metanogénicas y las comunidades bacterianas metanotrofas (Butterbach-Bahl et al., 2011). La vía de intercambio con la atmosfera es similar que la del CO_2 , en la cual se facilita la difusión del gas entre los espacios porosos del suelo; sin embargo en suelos inundados, donde la producción de metano es alta, existen diferentes vías para la difusión del gas a la atmosfera (Figura 1-3a y b).

Figura 1-3: Ciclo del metano en: a) Suelos inundados., b) Suelos aireados



Fuente: Elaboración propia

En suelos inundados el metano es liberado a la atmosfera por tres vías: la primero, es en forma de solución, sin embargo puede ser oxidada en la columna de agua; segundo, puede ocurrir que la producción de gas en la superficie del suelo sea alta, por lo tanto se generan burbujas que ascienden por la columna de agua con la suficiente rapidez como para evitar oxidaciones significativas y una tercera vía a través de los espacios de aire con los que cuentan la parénquima de algunas plantas vasculares con adaptaciones a los ambientes acuáticos, por los cuales se da un intercambio de gases con la atmosfera hacia las raíces. (Smith *et al.*, 2013, Butterbach-Bahl *et al.*, 2011, Fazli *et al.* 2013)

1.2.3. Óxido nitroso proveniente del suelo

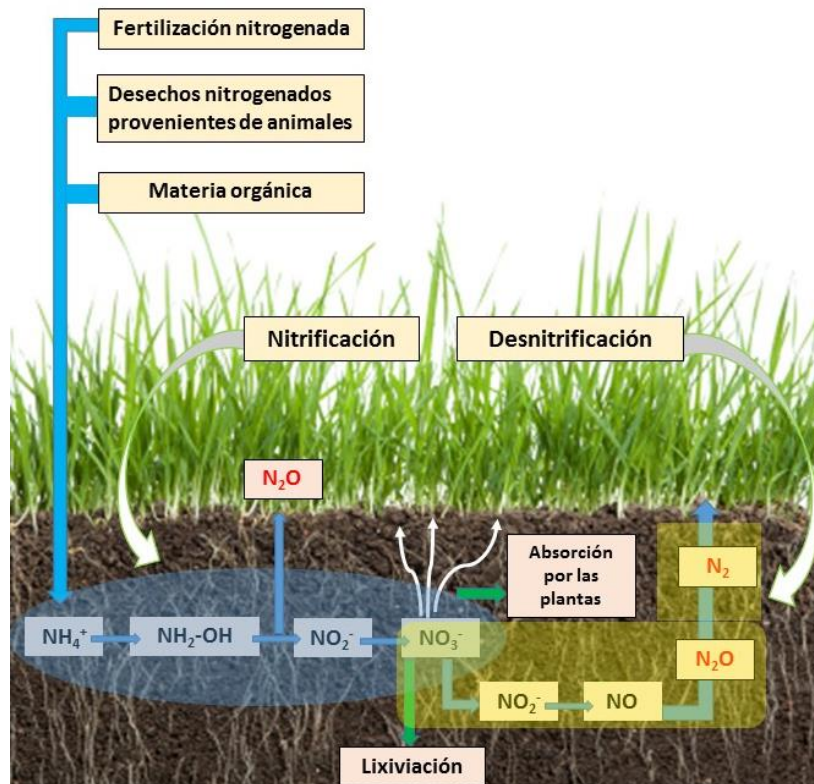
El óxido nitroso (N_2O), es el gas de efecto invernadero proveniente del suelo con el poder de calentamiento global más prolongado y aunque solamente represente alrededor del 0,03 por ciento del total de emisiones de GEI, es casi 300 veces más peligroso para la atmosfera, en comparación con el dióxido de carbono (CO_2). (Thomson *et al.*, 2012). Aunque la fuente natural más importante de N_2O es la Desnitrificación, la cual es un proceso importante en el ciclo del nitrógeno, son las actividades humanas las que modifican y aumentan las tasas de Desnitrificación en el suelo y en consecuencia, las emisiones de N_2O a la atmósfera, (Crutzen *et al.*, 2007; Denmead *et al.*, 2008), estas fuentes antropogénicas están asociadas a la producción de alimentos y la seguridad alimentaria de los países ya que actividades como el uso de fertilizantes sintéticos en áreas de cultivo y la excreción de estiércol de animales en suelos ganaderos, descargan importantes cantidades de nitrógeno al suelo (Thomson *et al.*, 2012, Syakila & Kroeze., 2011, IPCC, 2007).

El óxido nitroso se produce en el suelo principalmente por dos procesos microbiológicos muy importantes en el ciclo del nitrógeno: la nitrificación y la Desnitrificación (Figura 1-4). En el primer proceso Las fuentes de nitrógeno que llegan al suelo como urea, sulfatos o materia orgánica es asimilado por grupos de bacterias que transforman estos compuestos en nitrógeno amoniacal, posteriormente grupos de bacterias autótrofas (Nitrosomas) oxidan el amonio (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y luego un grupo diferente de bacterias (Nitrobacter) se encarga de oxidar el nitrito a nitratos (NO_3^-) (Smith *et al.*, 2003, Chapuis-Lardy *et al.*, 2006). El nitrato y el amonio en el suelo son asimilados por las plantas como

parte de sus requerimientos de nitrógeno, el nitrato que no es tomado por las plantas puede perderse por lixiviación o bien estar disponible para entrar en un proceso de Desnitrificación (Mora *et al.*, 2005)

Durante el proceso de Desnitrificación se realiza una reducción bioquímica por parte de los grupos de bacterias *Nitrosomas*, *pseudomonas* y *nitrobacter*, este proceso microbiológico se da en condiciones anaerobias donde las bacterias reducen los nitratos usando la molécula como aceptor de electrones y así el oxígeno de la molécula para su respiración, en el proceso de reducción se obtienen como productos el óxido nitroso y el nitrógeno molecular (N_2) (Smith *et al.*, 2003, Mora *et al.*, 2005). La cantidad de óxido nitroso que se pueda producir en el suelo depende entonces de la cantidad de nitrato disponible junto a las condiciones de humedad del suelo, ya que en condiciones anaerobias tanto para bacterias anaerobias estrictas como las facultativas, el nitrato es un buen sustrato alternativo para los procesos de respiración en ausencia de oxígeno.

Figura 1-4: Formación del Óxido nitroso en el suelo. Ciclo de Nitrificación-Desnitrificación.



Fuente: Elaboración propia

La alta heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal es una característica común de los procesos microbianos del suelo, es por esto que al igual que con el metano, la emisión de óxido nitroso exhibe una alta heterogeneidad espacial. Esta variabilidad es el resultado de un complejo conjunto de variables ambientales que influyen en las propiedades fisicoquímicas del suelo y a su vez en la diversidad de la comunidad microbiana, que controlan los procesos de nitrificación y Desnitrificación responsables de las emisiones de N₂O (Cosentino *et al.*, 2013)

1.3. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos

En los últimos 10 años se han aumentado los esfuerzos por mejorar y proponer alternativas que logren evaluar con mayor precisión las emisiones provenientes de los sistemas hacia la atmosfera (Denmead 2008). La precisión de las mediciones de GEI es crucial para actualizar y mejorar los actuales inventarios de gases de efecto invernadero que cada país necesita para desarrollar su plan de mitigación y reducción de emisiones. La mayoría de metodologías para la medición de GEI in situ se pueden dividir en las dos técnicas más usadas: técnicas basadas en cámaras, técnicas basadas en herramientas micro meteorológicas o Eddy Covarianza y como complemento modelación ambiental (Muñoz *et al.*, 2011, Saggar *et al.*, 2009, Jones *et al.*, 2011). Ambas técnicas presentan una serie de características de funcionamiento y desempeño que fueron resumidas por (Jones *et al.*, 2011) con el fin de comparar dichas técnicas (Tabla 1-2).

Debido a las facilidades técnicas, operacionales, su bajo costo, y su utilidad a la hora de evaluar diversos tratamientos y áreas remotas, las técnicas basadas en cámaras son las más usadas para las mediciones de gases de efecto invernadero entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera. (Denmead., 2008, Butterbach-Bahl *et al.*, 2011). Actualmente se han desarrollado varios tipos de cámaras, entre las cuales se destacan las cámaras dinámicas y la cámara estática cerrada, la primera integra un analizador de gases y un sofisticado sistema automatizado que minimiza los errores de muestreo derivados de la técnica, a pesar de reducir los errores de medición y de obtener más datos, sus costos de operación la hacen menos asequible en contraste, la cámara estática cerrada posee un

diseño de bajo costo más sencillo y más práctico para trabajar en campo pero con algunos sesgos asociados al diseño

Tabla 1-2: Comparación entre las técnicas de la cámara estática y las técnicas micrometeorológicas (Jones *et al.*, 2011)

	Técnicas	Cámaras estáticas	Micrometeorología
Limitaciones Técnicas	Costo de instalación	Medio	Muy Alto
	Nivel técnico requerido	Básico	Muy alto
	Carga laboral humana	Muy importante	Importante
	Limitaciones de uso	Puede ser usada en cualquier lugar.	Solo puede ser usada en grandes extensiones planas de tierra.
	Sesgo metodológico	-Las perturbaciones climáticas pueden afectar las concentraciones de gases dentro de la cámara -Explora una pequeña porción espacial y temporal del sistema.	-Se debe asegurar tener en cuenta las condiciones atmosféricas y la circulación del viento de forma precisa. -Considerar las diferentes fuentes de emisión.
desempeño	Representatividad	Mediciones puntuales en el tiempo y el espacio	Medidas integradas en tiempo y en espacio
	Uso	Comparación de diferentes practicas agrícolas y usos del suelo.	Estimación de flujos de gases en situaciones de ecosistemas representativos

1.4. Diseño de Cámara estática cerrada

La cámara estática cerrada ha sido durante los últimos 30 años la metodología más usada para medir los flujos de GEI sobre todo en sistemas agrícolas. Rochette., (2011) reporta que aproximadamente el 95% de los estudios publicados sobre medición de gases utilizaron la técnica de la cámara estática cerrada.

El principio de la técnica se basa en cubrir una área determinada del suelo con una cámara cerrada y hermética que permita el intercambio de gas entre el suelo que cubre la cámara y la atmosfera dentro de esta. La tasa de cambio de la concentración dentro de la cámara a través del tiempo se cuantifica para calcular una tasa de flujo, la cual puede ser extrapolada a un área fuera de la cámara (Pihlatie *et al.*, 2013).

cuatro o cinco muestras de aire sucesivas (a los 5 o 10 min intervalos, por ejemplo) se extrae de la parte superior de la cámara donde se concentra el gas, usando una jeringa sin embargo, en cámaras con sistemas más sofisticados la muestra se extrae con bombas de vacío o sistemas automatizados. Se espera que la concentración de gas aumente dentro de la cámara debido a la primera ley de Fick, la cual explica que el flujo de gas es dependiente del gradiente de concentración y la difusividad del suelo (Alves *et al.*, 2012, Davison *et al.* 2002, Rochette y Eriksen-Hamel, 2008)

El protocolo de toma de la muestra y el principio de la cámara es el mismo para cualquier sistema o tratamientos que se quieran evaluar, las modificaciones que se pueden observar en las cámaras están asociadas a las necesidades del investigador, por ejemplo si requiere evaluar el aporte de la planta a las emisiones (como en el caso de los cultivos de arroz) o si es solo el efecto de un tratamiento al suelo desnudo (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011). En este sentido es importante tener en cuenta ciertos aspectos claves en la elaboración de las cámaras, con los cuales se espera que el principio de la técnica se mantenga sin importar las diferencias entre los diseños y que estos no maximicen los errores asociados a la técnica.

1.4.1. Materiales

Lo más importante que se debe tener en cuenta a la hora de elegir el material con el cual se elaborarán las cámaras para un ensayo determinado es que el material seleccionado no reaccione con el aire, entre los materiales más comúnmente usados están el acero inoxidable, aluminio, PVC, Plexiglás, Polipropileno o Polietileno) La razón de este criterio de selección es que el material no debe reaccionar con ninguno de los gases, ni emitir sustancias que contaminen el suelo y afecten las condiciones naturales del suelo (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011, Parkin y Venterea., 2010).

Adicional a la naturaleza inerte de los materiales, es importante tener en cuenta que las cámaras estarán expuestas a las condiciones ambientales y al contacto con animales por ende es importante utilizar materiales resistentes al agua y a mordeduras de animales (en el caso de evaluaciones en sistemas ganaderos), además de que no sean deformados por el calor o vientos fuertes (Clough *et al.* 2012, Klein y Harvey., 2012). Por último pero no menos importante se recomienda un material reflectante inerte que ayude a mitigar el efecto de la radiación solar sobre el calentamiento de la cámara y así evitar grandes diferencias de temperatura dentro de la cámara y el ambiente exterior (Rochette & Hutchinson *et al.*, 2005).

1.4.2. Dimensiones

Las dimensiones acarrearán dos aspectos importantes: área y volumen de la cámara y su forma geométrica, en este sentido es importante tener en cuenta que en todas las dimensiones se debe encontrar un equilibrio según las necesidades del investigador. En el caso de la altura (que determina el volumen de la cámara) se debe tener en cuenta que las cámaras muy altas minimizan las perturbaciones por presión pero reducen la sensibilidad de la cámara para medir flujos pequeños.

Consideraciones similares se deben tener en cuenta con el área que abarca la cámara ya que si bien áreas muy grandes pueden obtener mayor representatividad del sistema evaluado también aumenta el perímetro susceptible a fugas de gas (Davison *et al.* 2002). Como se puede evidenciar, es necesario encontrar una relación adecuada entre las dimensiones de la cámara, en este sentido Rochette y Eriksen-Hamel (2008) proponen calcular una relación Área/Perímetro, el cual recomiendan debe ser ≥ 10 cm, con el fin de reducir errores por perturbación del suelo sin perder representatividad del sistema.

Por otra parte, respecto a la forma geométrica Butterbach-Bahl *et al.*, (2011), reconoce que si bien no se pueden hacer conclusiones respecto a cómo la forma geométrica influye en las mediciones, esta característica puede ser usada en beneficio de la investigación, ya que la diversidad de formas geométricas que se pueden usar puede mejorar el desempeño de la cámara para un objetivo específico en la investigación (Rochette & Hutchinson *et al.* 2005).

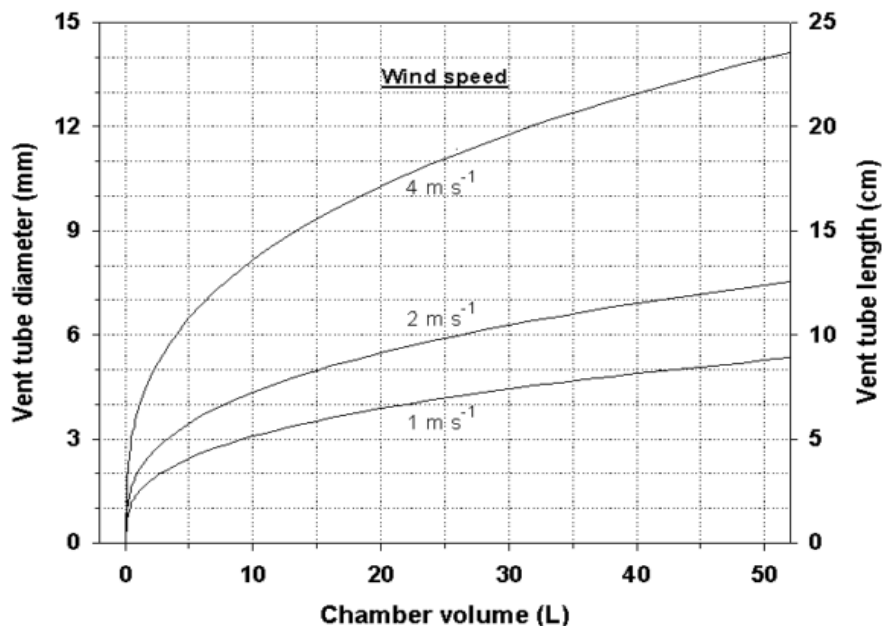
1.4.3. Ventilación

El uso de ventilación es un aspecto ampliamente recomendado para todos los diseños de cámaras, ya que esta puede reducir el efecto de las diferencias de presión que se pueden generar dentro de la cámara. Estas diferencias de presión son la consecuencia del sobrecalentamiento de la cámara y tiempos prolongados de muestreo que alteran la circulación de los gases dentro de la cámara (Davison *et al.*, 2012).

Sin embargo, El uso de un dispositivo de ventilación en la cámara, si bien puede reducir la sobre presurización, puede incurrir en una fuente adicional de error, factores como la velocidad del viento o las dimensiones del tubo o rejilla de ventilación puede propiciar un intercambio de gas con el exterior de la cámara, diluyendo a muestra que se encuentra adentro (Clough *et al.*, 2012)

Para poder corregir los posibles errores asociados al uso de ventilación en las cámaras (Hutchinson y Mosier 1981), Propusieron una relación entre el volumen de la cámara, el diámetro y longitud del tubo de ventilación y la velocidad del viento (Figura 1-5). La gráfica desarrollada por Hutchinson y Mosier 1981, recomienda tener en cuenta ciertas proporciones de los dispositivos de ventilación para evitar una despresurización o disolución de la muestra de gas.

Figura 1-5: Diámetro y longitud óptimos para un tubo de ventilación a diferentes condiciones de, velocidad del viento, descrito por Hutchinson y Mosier 1981 y extraído por Parkin y Venterea (2010)



1.4.4. Mezcla del Gas

Cuando se usan cámaras estáticas cerradas se espera que la difusión del gas hacia el espacio de la cámara sea de forma rápida y homogénea, de forma que la muestra de gas va a ser igual en toda la cámara, sin embargo cuando la cámara es muy alta o tiene vegetación en su interior el uso de ventiladores es recomendado, estas cámaras por lo general son aquellas que requieren evaluar el efecto de la vegetación. En este tipo de cámaras la concentración del gas se concentra en la parte de arriba y por la vegetación puede dificultar obtener una muestra homogénea, por esta razón se recomiendan usar pequeños ventiladores dentro de la cámara para recircular el aire dentro de esta y al extraer el gas poder obtener una muestra homogenizada (Livingston *et al.*, 2006, Parkin y Venterea, 2010, Butterbach-Bahl *et al.* 2011).

1.5. Condiciones que afectan las mediciones de gases de efecto invernadero realizadas con cámara estática cerrada en suelos

En el momento que se instala una cámara en el suelo, las condiciones del suelo han sido perturbadas en menor o mayor proporción, sin embargo existen algunos aspectos importantes que se deben tener en cuenta ya que son los que más pueden influir en las mediciones realizadas, entre estos aspectos claves podemos encontrar la alteración del suelo en el momento de la instalación de la cámara, la variabilidad espacial y temporal del sistema o área de estudio que se busca evaluar, condiciones asociadas al interior de la cámara como la humedad, temperatura y presión incluso la mezcla de gas dentro de la cámara (Rochette y Eriksen-Hamel., 2008, Butterbach-Bahl *et al.*, 2011)

1.5.1. Temperatura

El efecto de la temperatura sobre las mediciones se debe a la influencia que tiene esta variable en la actividad biológica del suelo reflejados en la respiración del suelo o biodegradación de la materia orgánica, en la cinética de disolución de los gases y el comportamiento de expansión /contracción del gas dependiendo si se da un aumento o

reducción drástica de la temperatura comparada con la del exterior de la cámara (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011, Rochette y Hutchinson 2005, Parkin y Venterea 2010).

Los errores asociados a un cambio de temperatura brusco dentro de la cámara se pueden evitar en cierta medida, lo importante es tener la temperatura dentro de la cámara lo más similar posible a la temperatura externa, para esto recomiendan el uso de material de aislamiento térmico para recubrir las cámaras, Si las condiciones climáticas son muy extremas emplear tiempo de muestreo lo más cortos posibles sin sacrificar la sensibilidad de detección y siempre tener monitoreados los cambios de temperatura con un termómetro ambiental dentro de la cámara. (Parkin y Venterea, 2010)

1.5.2. Diferencia de Presión

Otro aspecto que tiene un efecto importante en las mediciones es la diferencia de presión que se genera por el efecto que tiene los cambios de temperatura en la expansión o contracción del gas unido a la presión generada en el momento de poner la cámara en el suelo. Aunque los cambios no son significativamente altos en relación a la presión del exterior, bastan para alterar el gradiente de difusión del gas dentro de la cámara (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011)

La forma como la muestra se ve afectada por la presión se puede dar en dos vías: si la cámara se encuentra sobre-presurizada va a restringir el flujo de gas proveniente del suelo, en contraste si está sub-presurizada, en la cámara puede tener un efecto de “succionar” el gas del suelo de forma anormal entorpeciendo los procesos naturales de difusión del gas a través el espacio poroso del suelo (Davison *et al.*, 2012)

1.5.3. Perturbaciones del suelo

Durante la instalación de las bases de las cámaras está implícita la perturbación al suelo, sin embargo es una perturbación necesaria para asegurar que no se generen errores de medición por difusión lateral de los gases. Hutchinson y Livingston (2001) mostraron que 2,5 cm de profundidad de inserción es suficiente para limitar esta fuente de error en los flujos simulados de suelos de baja a la porosidad moderada (como suelos húmedos y/o textura fina), y que se requieren aproximadamente 9 cm para suelos muy porosos.

La perturbación en el suelo durante el proceso de instalación, consiste en la rotura de raíces dentro del suelo y la fuerza ejercida sobre la base puede generar una compactación del suelo y una alteración permanente si se dan precipitaciones muy fuertes que inundan los alrededores de la cámara. Con el fin de reducir el error asociado a esta perturbación del suelo algunos autores recomiendan la instalación de la base 24 horas antes de realizar los muestreos, esto con el fin de procurar un tiempo de estabilización de los procesos en el suelo que fueron perturbados durante la instalación (Davison *et al.*, 2002, Clough *et al.*, 2012, Rochette & Hutchinson *et al.*, 2005, Parkin y Venterea, 2010)

1.5.4. Variaciones Espacio-Temporales

Los diferentes procesos biológicos físicos y químicos en el suelo que están involucrados en la emisión de GEI se dan a diferentes escalas dentro del suelo y el efecto de las variables ambientales en ellos es difícil de dimensionar por la complejidad de sus interacciones, adicionalmente estos procesos se desarrollan en diferentes lapsos de tiempo dentro del suelo y mientras se llevan a cabo las condiciones meteorológicas que cambian a través del tiempo adicionan un factor de variabilidad ms al complejo proceso de las emisiones provenientes del suelo.

- **Variaciones Espaciales**

La variabilidad espacial: que se presenta en el suelo suele verse reflejada principalmente en los coeficientes de variación asociados a flujos de CH₄ y N₂O que comúnmente superan el 100% (Parkin y Ventera, 2010). Lo anterior es generado por la naturaleza espacial de las variables del suelo, mientras una presenta un patrón en gradiente, otras como la actividad biológica tienen una distribución por parches, es decir focalizada en pequeños “puntos calientes” donde se desarrollan reacciones de biodegradación, bio-oxidación o reducción de compuestos entre otros.

Los errores asociados a esta variabilidad espacial corresponden más al diseño del experimento, sin embargo el uso de cámaras más grandes puede reducir dicha variabilidad. Lo recomendable es interpretar a posteriori la variabilidad del área de estudio, por ende se aconseja un mínimo de dos cámaras por parcela en estudios a escala de parcela. En el campo, se recomienda que se identifiquen todas las zonas que considere significativamente diferentes entre sí, ya sea por el tipo de suelo, tipo de vegetación o manejo agronómico con el fin de proponer un diseño de experimento que contemple las

emisiones en cada una de estas áreas (Livingston y Hutchinson, 1995, Parkin y Ventera, 2010).

- **Variaciones temporales:**

El tiempo en que se realizan las mediciones igualmente influye en los flujos calculados a partir de estas mediciones (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011), Los cambios ambientales que se dan en un lapso de 24 horas influyen en las emisiones así que no es lo mismo tomar una muestra al medio día con un sol intenso que en la noche con bajas temperaturas.

Así como se presentan fluctuaciones a lo largo del día, a una escala más amplia también se debe tener en cuenta los cambios de estación en áreas templadas y los regímenes de lluvias en áreas tropicales, ya que las mediciones varían drásticamente ante diferentes eventos climáticos.

1.6. Técnica de muestro convencional

La toma de muestra manual de gas es el método más común cuando se usan cámaras estáticas cerradas., la toma de muestra consiste en usar jeringas para extraer el gas por medio de un septum en la tapa de la cámara y posteriormente almacenar la muestra en viales con vacío de material inerte. Las muestras se toman en diferentes intervalos de tiempo con el fin de obtener datos de concentraciones en un rango de tiempo que suele estar entre los 30-60 min (Clough *et al.*, 2012).

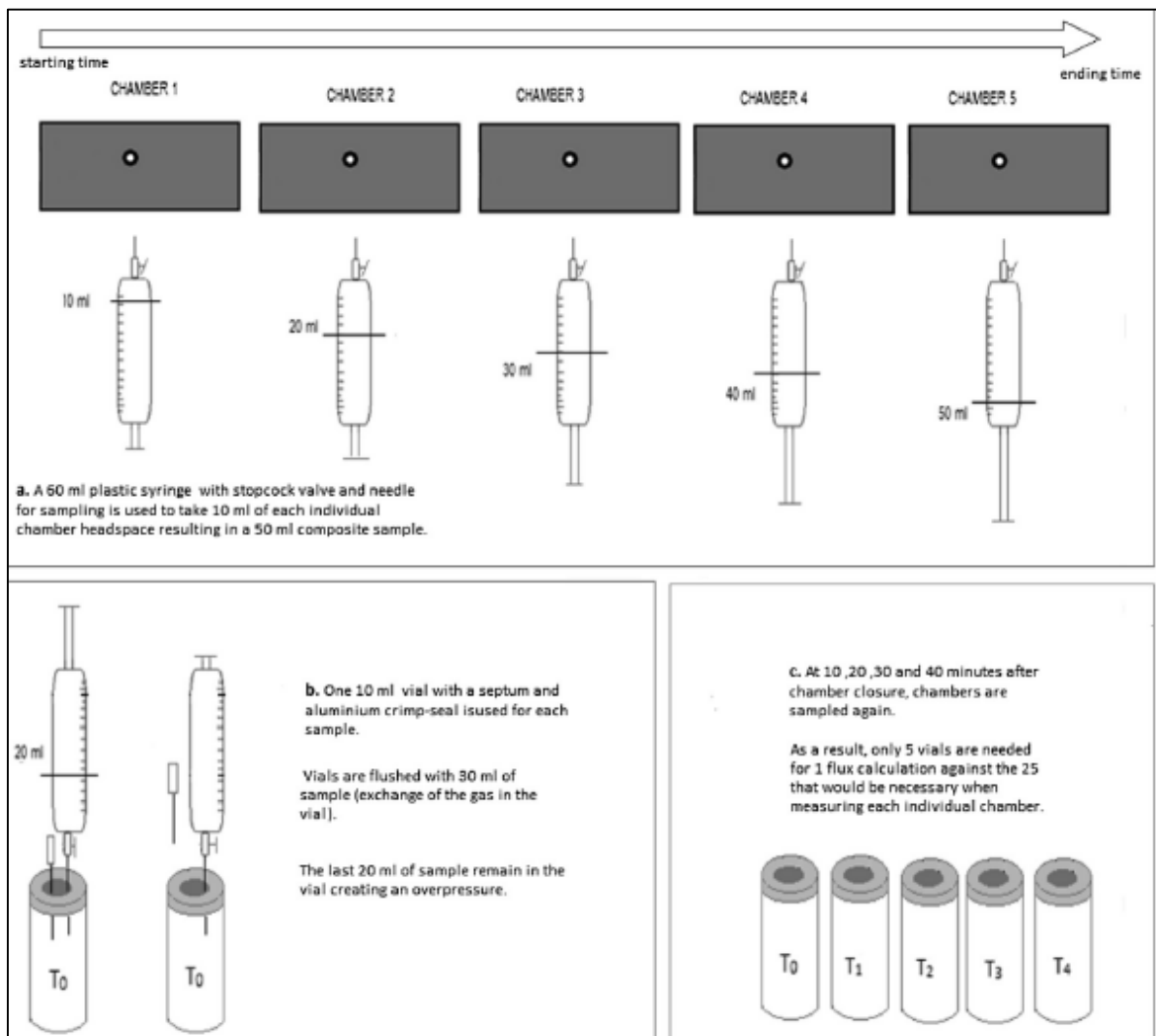
1.7. Técnica de muestreo “Gas Pooling”

La técnica de muestreo “Gas Pooling” se fundamenta en el principio de las muestras compuestas de suelo, donde se toma una muestra representativa de una parcela, formada a partir de pequeñas sub-muestras del sitio (Arias-Navarro *et al.*, 2013).

En este caso se busca hacer una muestra de gas compuesta para cada intervalo de tiempo, la cual será obtenida de cada una de las cámaras de una parcela., las cámaras que en el caso de la técnica convencional se consideran una repetición, aportarán la misma cantidad de muestra recolectada en una jeringa y almacenada en un vial con vacío (Figura 1-6). Al realizar muestras compuestas, el número de muestras se reduce significativamente,

teniendo beneficios económicos para los proyectos, debido a los altos costos de las pruebas analíticas para la cuantificación de gases

Figura 1-6: Concepto de la técnica de “Gas Pooling” Arias-Navarro *et al.*, (2013)



2. Materiales y métodos

2.1. Localización

La presente investigación se llevó a cabo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el cual se encuentra a 30°30'N y 76°21'O, en el municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca, a 30 km al este de Santiago de Cali. El CIAT, registra cuatro tipos de suelos representativos del Valle del Cauca, como: Typic Pellustert, Cumulic Haplustoll, Petrocalcic Natrustalf y Fluventic Haplustoll (Becerra *et al.*, 2005).

2.2. Diseño experimental

Para la comparación de cámaras estáticas cerradas y técnicas de muestreo, se realizó un experimento de bloques completos al azar con 4 bloques, donde se tomaron como tratamientos el tipo de cámaras estáticas cerradas y para la evaluación de la hora apropiada de muestreo se realizó un diseño de experimento completamente al azar con 4 repeticiones donde se utilizó un solo tipo de cámara, cada cámara se tomó como una repetición. Para ambos experimentos las variables respuestas fueron los flujos de Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido Nitroso (N₂O). Cada unidad experimental fue definida en sub-parcelas clasificadas como suelo desnudo las cuales se encontraban aleatorizadas en un campo experimental del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Las unidades experimentales constaban de una cámara de cada diseño, ubicadas de forma equidistante entre ellas en la sub-parcela.

2.3. Análisis estadístico de la información

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias para identificar diferencias significativas entre los diseños de cámara estática cerrada y los tiempos de muestreo. En el ensayo que tuvo una duración de 24 horas se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre los flujos calculados en las diferentes fechas de muestreo y un análisis de correlación de Pearson para determinar si existían relaciones significativas entre los flujos la temperatura del aire.

2.4. Cuantificación de GEI en laboratorio

Las muestras tomadas en campo fueron almacenadas en viales con vacío a los cuales se les había realizado previamente un proceso de liofilización. Los viales fueron llevados al laboratorio de Gases de Efecto Invernadero del CIAT para cuantificar las concentraciones de CO_2 , CH_4 y N_2O en ppm por medio de la técnica de cromatografía de gases, usando un cromatógrafo de gases GC-2014, SHIMADZU (Figura 2-1a) equipado con un detector de ionización de llama (FID), captura de electrones (ECD) y metanizador. Para estas determinaciones se utilizaron estándares certificados (Scotty® Analyzed Gases para CO_2 : 2000 ppm, CH_4 : 10 ppm y N_2O : 1 ppm, Analytical Accuracy +/- 5%, Figura 2-1b)

Figura 2-1: Cromatógrafo de gases GC-2014 (a), estándar certificado (b)



2.5. Diseño Y Construcción De Cámara Estática Cerrada

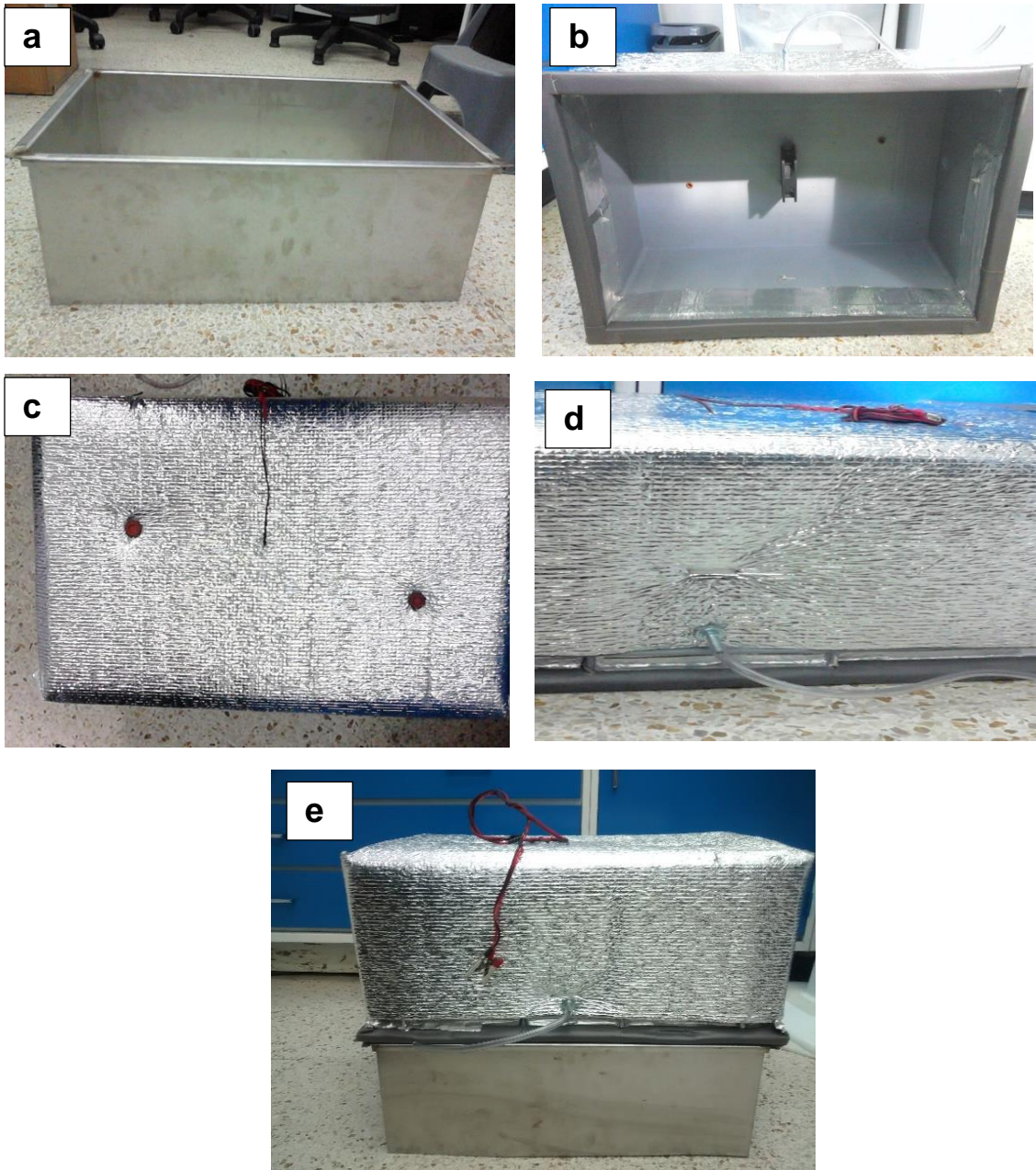
Se propuso un diseño de cámara estática diferente a los usados comúnmente en Colombia para el estudio de las emisiones de GEI provenientes del suelo. El diseño propuesto, se basó en criterios previamente seleccionados a partir de una revisión bibliográfica sobre el tema. De la revisión bibliográfica, se obtuvo un consenso el cual se resumió en una tabla (Tabla. 2-1) con las principales características a tener en cuenta en el diseño de una

CARACTERISTICAS	POCO RECOMENDADO	RECOMENDADO	DISEÑO PROPUESTO	REFERENCIAS
Tipo de cámara	Una sola pieza	Base + cámara	Base+ cámara	Butterbach-Bahl <i>et al.</i> , (2011) Parkin and Venterea (2010)
Altura de la cámara	<10cm	≥ 40 cm (depende de la vegetación)	24 cm	Butterbach-Bahl <i>et al.</i> (2011) Christiansen <i>et al.</i> , (2011) De Klein and Harvey (2012)
Profundidad de inserción de la base	<5 cm	≥12 cm (depende del tipo de suelo)	10cm	Parkin and Venterea (2010) De Klein and Harvey (2012)
Área	<175-200cm ²	≥175-200cm ²	2016cm ²	Butterbach-Bahl <i>et al.</i> (2011)
Área/perímetro	<2,5 cm	≥10 cm	10.95 cm	Rochette y Eriksen-Hamel (2008)
Ventilación	no	si	si	De Klein and Harvey (2012) Xu <i>et al.</i> , (2006) Hutchinson and Livigston (2001)
Aislante	no	si	Si	Butterbach-Bahl <i>et al.</i> (2011) Parkin and Venterea (2010)
Diámetro y longitud tubo de ventilación	no	10 -24 cm long. y 4.8-15 mm de diámetro	10 cm long. y 4.8 mm de diámetro	Hutchinson y Mosier (1981)
Mezcla dentro de la cámara	no	Si	Si	Christiansen <i>et al.</i> , (2011) De Klein y Harvey (2012)

cámara estática cerrada bajo dos criterios: “Recomendado” y “Poco Recomendado”, de esta forma se decidió por un diseño dentro de los parámetros recomendados (Fotografía. 2-1).

Tabla 2-1: Características generales de una cámara estática cerrada con valores poco recomendados, recomendados y valores del diseño propuesto.

Figura 2-2: imágenes del diseño propuesto: a) base, b) Interior de la parte superior de la cámara, ventilador, c) Parte exterior de la cámara, d) tubo de ventilación, e) Base y cámara.



2.6. Fase de Campo

2.6.1. Momento del día apropiado de muestreo

Para determinar un momento del día en el que se obtengan mediciones de GEI que sean representativas del promedio diario, se realizaron 4 muestreos en los días 29 al 30 de abril, 13 al 14 de mayo, 29 al 30 de mayo y 7 al 8 de Julio del 2014. Durante estas fechas se realizaron toma de muestras cada dos horas durante 24 horas usando cámaras de PVC de 10.5 cm de alto, diámetro de 22 cm y una área de 380.13 cm².

El ensayo se llevó a cabo en una parcela experimental del CIAT sembrada con maíz, la cual fue sembrada el 31 de marzo de 2014. El manejo agronómico de la parcela consistió en 2 fertilizaciones (31 de marzo y 26 de abril), un riego post-siembra el 4 de abril y dos controles para malezas el 1 de abril y para insectos el 27 de abril. Cada muestreo contó con cuatro cámaras las cuales fueron instaladas en forma diagonal atravesando la parcela procurando una distancia similar entre ellas (Figura. 2-2).

Figura 2.-3. Ubicación geográfica del área de muestreo



2.6.2. Comparación de los flujos de GEI con diferentes diseños de cámaras estáticas cerradas

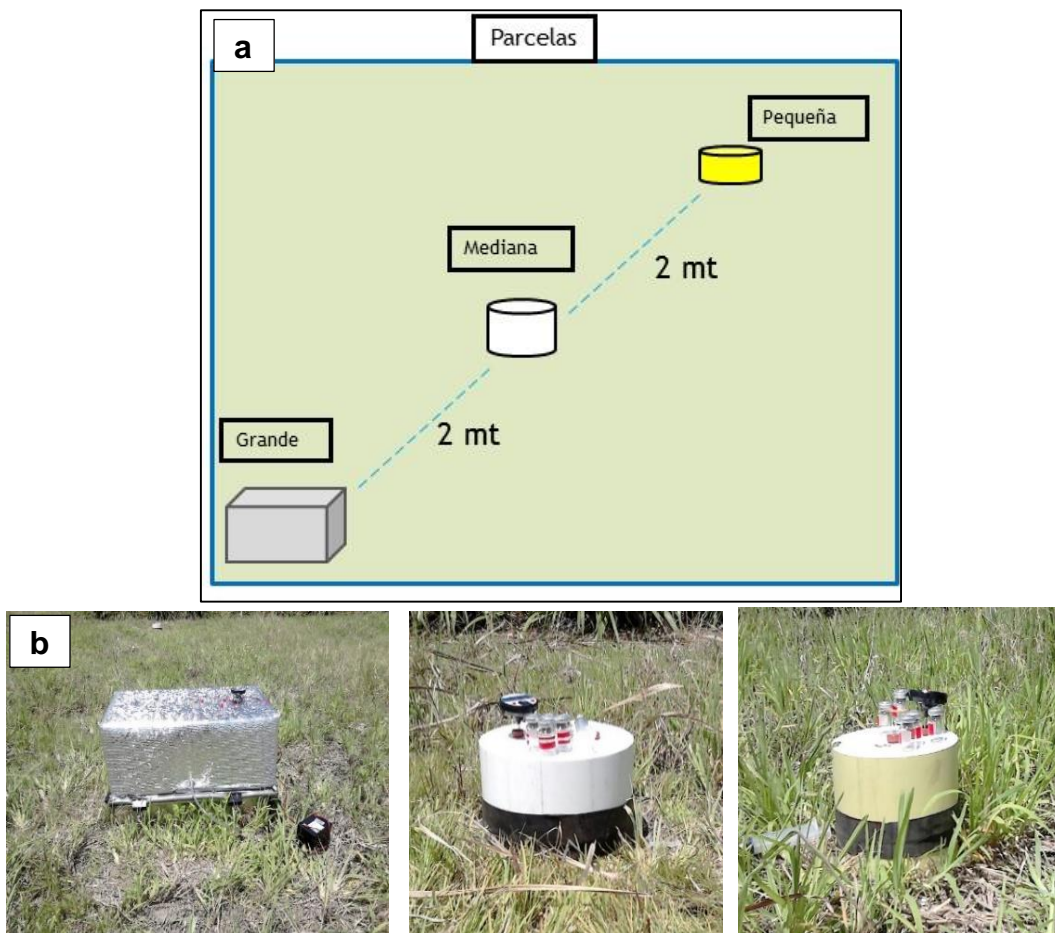
Se compararon las mediciones de GEI realizadas con la cámara estática cerrada propuesta y la cámara convencional, la cual fue estandarizada por Rondon (2000). La cámara estática cerrada convencional consta de dos partes (base y cámara) hechas con tubos de PVC, los cuales son sujetos con una banda de caucho vulcanizado a su alrededor con el fin de mantener la cámara inmóvil a la base y evitar fugas de gas durante el tiempo de muestreo. En total, se realizó la comparación usando dos tamaños diferentes de cámaras estáticas de PVC y el diseño propuesto en la presente tesis, las especificaciones de los tres diseños de cámaras se muestran en la Tabla 2-2.

CARACTERISTICAS	Cámara PVC pequeña	Cámara PVC grande	Cámara propuesta
Altura de la cámara	9.5 cm	10 cm	24 cm
Profundidad de inserción de la base	5 cm	5 cm	10cm
Área	226.98 cm ²	380.13 cm ²	2016 cm ²
Área/perímetro	4.25 cm	5.5. cm	10.95 cm
Tipo de Cámara	Base + Cámara	Base + cámara	Base + cámara
Ventilación	No	No	Si
Aislante	No	No	Si
Diámetro y longitud del tubo de ventilación	No	No	10 cm longitud y 4.8 mm de diámetro
Mezcla dentro de la cámara	No	No	Si

Tabla 2-2: Especificaciones generales de los tres diseños de cámaras comparados. Cámara pequeña y cámara grande de PVC y cámara propuesta.

Las comparaciones fueron llevadas a cabo durante 4 muestreos realizados los días 23, 24, 25 y 26 de Septiembre del 2014. Los 3 diseños de cámaras fueron instalados de forma equidistante en cada una de las 4 parcelas pertenecientes a un lote experimental dentro de las instalaciones del CIAT, Estas parcelas fueron identificadas como suelo desnudo en anteriores experimentos realizados en este lote. (Figura 2-3)

Figura 2-4.: Esquema de las parcelas y la distancia entre cámaras (a), y fotografías del diseño propuesto y las dos cámaras de PVC usadas comúnmente (b)



2.6.3. Comparación de Técnicas de Muestreo

Las muestras de gas tomadas durante la comparación de las cámaras se realizaron de forma convencional, es decir se tomó una muestra de 15ml de gas por cada cámara a los tiempos 0, 15, 30 y 45 minutos. Adicional a las muestras tomadas de forma convencional, se realizó un muestreo simultáneamente usando la técnica de “*Gas Pooling*”, reportada por Arias-Navarro *et al.*, (2013), en la cual se toma una muestra a partir de sub-muestras obtenidas de las diferentes repeticiones o cámaras que tiene un tratamiento

La comparación de las dos técnicas de muestreo se realizó para los mismos 4 muestreos en los cuales se hizo la comparación de las cámaras. Cada una de las muestras fue rotulada con la información de tiempo y temperatura de la cámara en el momento de la toma de la muestra y fueron llevadas al laboratorio en viales de vidrio al vacío a los cuales se les había realizado previamente un proceso de liofilización.

2.6.4. Tiempo adecuado del muestreo

El tamaño de las cámaras de PVC respecto al diseño propuesto es relativamente pequeño en el cual no existe un mecanismo de regulación de la presión; por lo cual se realizó un ensayo con los dos diseños de cámaras de PVC donde se tomaron muestras a los tiempos 0, 10, 20, 30 y 40 minutos. Estos tiempos de muestreo son comúnmente usados cuando se realizan muestreos con este tipo de cámaras, es por esto que se buscó comparar los resultados de las mediciones usando los diferentes tiempos.

Estos ensayos se realizaron durante de forma paralela a la comparación de cámaras y Técnicas de muestreo, las muestras de gas fueron igualmente llevadas al laboratorio para ser analizadas las concentraciones de CO₂, N₂O y CH₄ por cromatografía de gases.

2.7. Calculo de Flujos

Después de cuantificar la concentración de los GEI en partes por millón, procedemos a calcular el flujo de cada gas en función del área y tiempo. Para calcular el flujo de CH₄, CO₂ y N₂O se usó la siguiente ecuación, (Ver Ecuación (2-1)):

$$E = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{VM}{AV_m} \quad (2-1)$$

Donde:

E= Flujo de gas (CH₄, N₂O o CO₂) por unidad de área y tiempo.

$\frac{dx}{dt}$ = Rango de acumulación del gas (CH₄, N₂O o CO₂) en el aire dentro de la cámara expresado en partes por millón por minuto (ppm/min).

V= Volumen del gas expresado en Litros

A= Área de la cámara en m²

M= Masa de N por cada Mol N₂O o si es el caso de CH₄ y CO₂, Masa de C por cada mol.

V_m= Volumen molecular del gas.

El valor de V_m se calcula de la ecuación de gases ideales como se muestra a continuación, (Ver Ecuación (2-2)):

$$V_m = nRT/P \quad (2-2)$$

Donde:

V_m = Volumen molecular de un gas

n = Moles, (en este caso necesitamos calcular el volumen de una (1) mol del gas).

R= constante de la ley de los gases ideales (0.0820574587 L atm K⁻¹ mol⁻¹).

T= Temperatura dentro de la cámara

3. Resultados y discusión

3.1. Momento del día adecuado para realizar muestreos

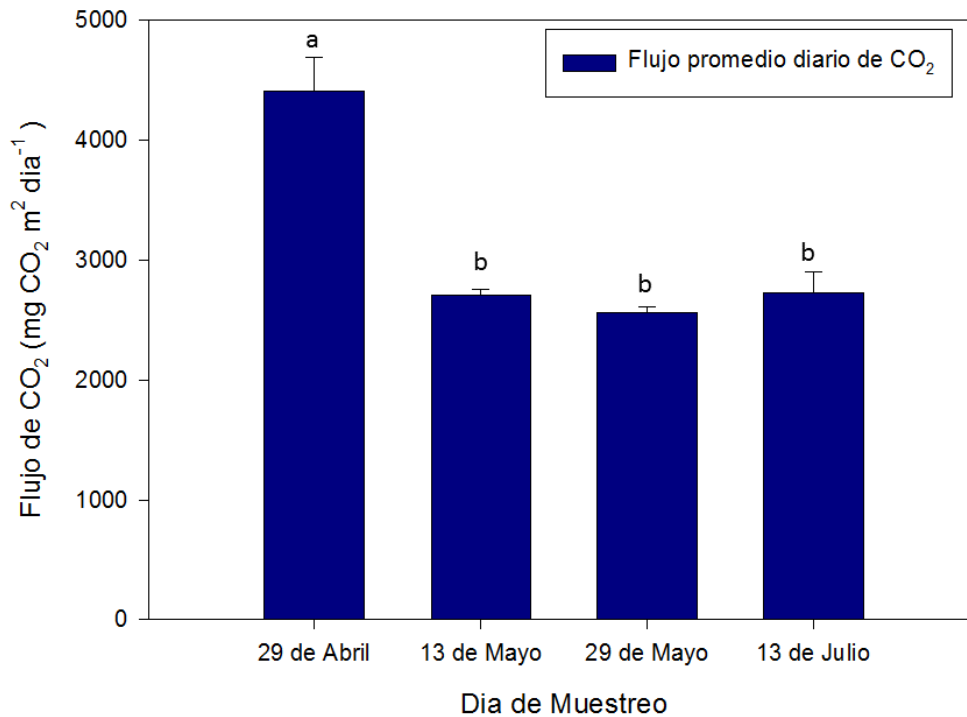
3.1.1. Variación temporal del dióxido de carbono CO₂

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$) en los flujos de CO₂ en las diferentes épocas de muestreo, es así como el flujo más alto se presentó 30 días después del establecimiento del cultivo y los menores, 45 días después de la siembra manteniéndose así hasta el final del ciclo (Grafica 3-1). Estas diferencias se deben a que los cambios fenológicos de las plantas afectan las emisiones de CO₂, generando diferencias en los flujos en diferentes etapas de crecimiento (Fernandez-Luqueño *et al.*, 2010., Posse *et al.*, 2010., Adviento *et al.*, 2007). Cada etapa fenológica de la planta tiene una tasa fotosintética característica según el desarrollo foliar y los requerimientos de la planta así como una demanda diferente de nutrientes en el suelo.

En el presente estudio se observaron mayores emisiones de CO₂ en el primer muestreo (30 días después de la siembra) y los más bajos los siguientes tres muestreos que coincidieron con la etapa de maduración, posterior a la etapa vegetativa de las plantas. Resultados similares fueron encontrados por Yevdokimov *et al.*, (2006), en un ensayo donde las emisiones más altas de CO₂ coincidieron con la terminación del crecimiento de las raíces y el proceso de macoyamiento. Igualmente Piconte *et al.*, (2013) registraron las emisiones más altas durante el estado vegetativo hasta prefloración, (224.9 y 227. mg CO₂ m². h⁻¹).

En este estudio el muestreo 1, se llevó a cabo en la cuarta semana del establecimiento del cultivo, tiempo promedio en que las plantas de maíz se encuentran en un periodo de crecimiento antes de su proceso de floración, justo en este periodo se presentaron las emisiones más altas ($4404 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), respecto a los demás muestreos (2705 , 2559 y $2729 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente).

Grafica 3-1: Flujos diarios de CO₂ en las diferentes épocas de muestreo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre las épocas de muestreo.



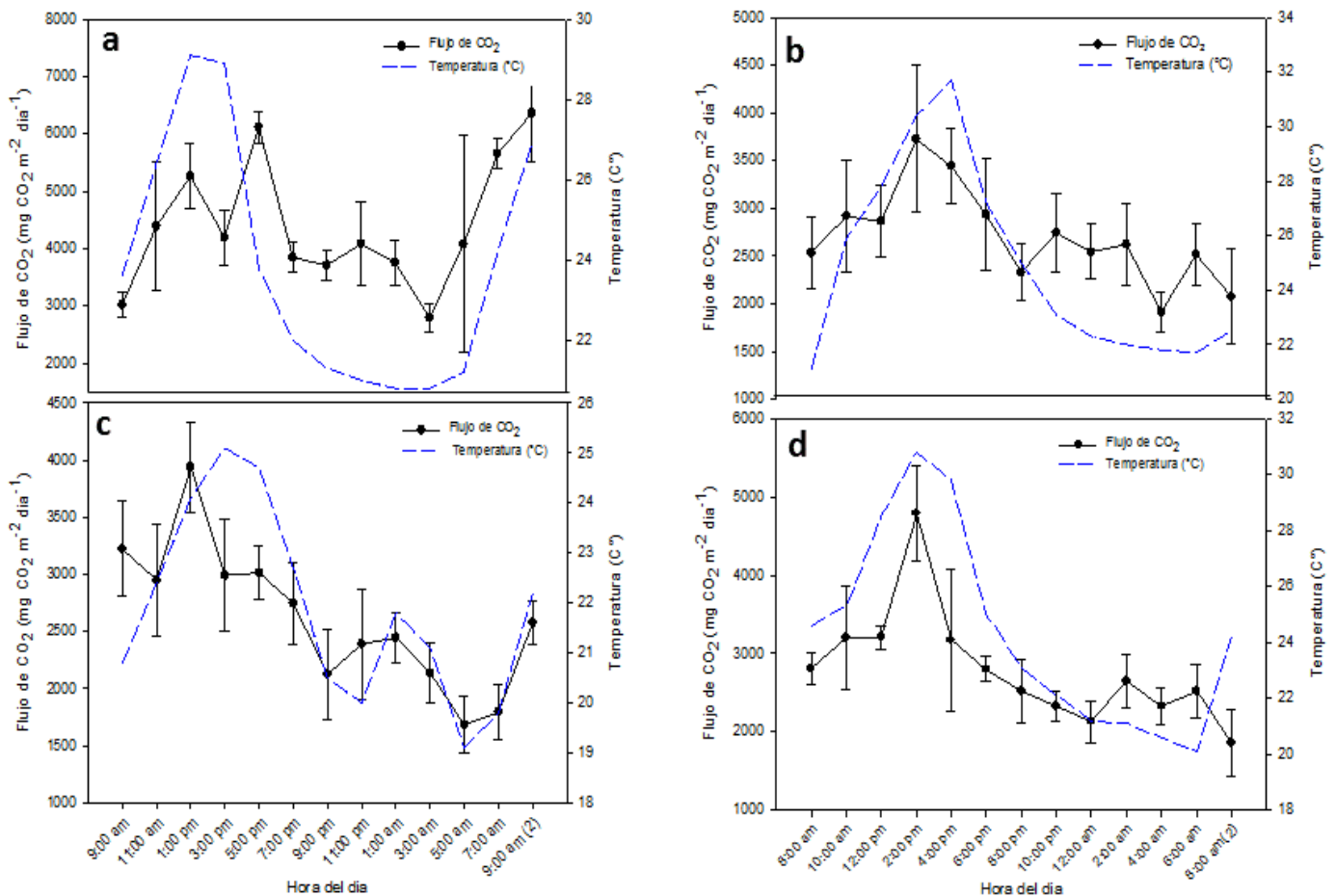
3.1.2. Variación diaria del CO₂ en el suelo

Los flujos de emisiones de CO₂ a lo largo del día en los cuatro muestreos presentaron sus valores más altos entre las horas del mediodía y el inicio de la tarde (11:00 am a 2:00 pm), estas horas, coinciden también con las temperaturas más altas como se muestra en la Gráfica (3-2). Así como se pudo observar un periodo de emisiones altas, también se observaron coincidencias en los flujos más bajos, los cuales fueron observados entre las

horas de la noche y la madrugada (7:00 pm a 4:00 am), el cual estuvo precedido por un descenso gradual de los flujos en la tarde (2:00pm a 7:00pm).

Los resultados anteriores concordaron con algunos estudios como el realizado por Liu *et al.*, (2011) donde identificaron picos altos al medio día y picos bajos en la madrugada antes de la salida del sol (4:00 am) en un cultivo de maíz. Xu y Qi *et al.*, (2001), también pudieron identificar durante las horas del día los picos más altos a las 2:00 pm y el más bajo a las 9:00 am.

Gráfica 3-2: Flujos de CO₂ y temperatura de aire durante 24 horas. a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



Los picos altos y bajos en las emisiones de CO₂ concordaron con los periodos de temperatura del aire más altos y más bajos respectivamente (Coeficiente de Correlación > 0.5), siendo esta una relación directamente proporcional, la cual está condicionada por la radiación solar diaria. La similitud entre los patrones diurnos de la respiración del suelo con la temperatura del aire, suelo y la humedad sugieren que la variación diurna en los flujos de CO₂ está controlado más que todo por temperatura del suelo y del aire cercano al suelo (Liu *et al.*, 2011). Por lo tanto, se podría decir que los picos en los flujos de CO₂ observados en los cultivos a lo largo del día son el resultado del impacto de las condiciones microclimáticas en el cultivo. El anterior patrón de relación con los cambios de temperatura se logró evidenciar en las cuatro épocas de muestreo de forma similar, lo que indica que a pesar de las variaciones en los flujos de CO₂ generados por el desarrollo fenológico de las plantas, la dinámica diaria del CO₂ se mantiene constante.

Como se mencionó, la temperatura del suelo desempeña un papel importante en la dinámica de las emisiones CO₂, ya que las condiciones de temperatura y humedad propician la activación microbiana; estos procesos microbiológicos del suelo responden generalmente de manera exponencial a la temperatura, duplicando aproximadamente su actividad por cada 10 grados de incremento en la temperatura del suelo, lo cual incrementa la actividad de los organismos tanto autótrofos como heterótrofos en el suelo (Chanda *et al.*, 2013). Así, las propiedades del suelo juegan un papel importante en las condiciones de humedad que mantiene el suelo, el contenido de arcillas y la porosidad pueden contener por más tiempo el agua en el suelo o por el contrario existir poca retención facilitando la escorrentía y vaporación.

Adicionalmente, la temperatura y la humedad actúan sinérgicamente para activar o reducir la capacidad fotosintética de las plantas y así su tasa de respiración. Lo anterior es explicado por Posse *et al.*, (2010) y Cavero *et al.*, (2012) los cuales concluyen que el decaimiento de los flujos de CO₂ en la tarde puede estar relacionado con la baja humedad que se registra (de forma inversa a la temperatura), lo cual produce un déficit de presión de vapor mayor que reduce la fotosíntesis, debido al cierre de los estomas para evitar la deshidratación de la planta.

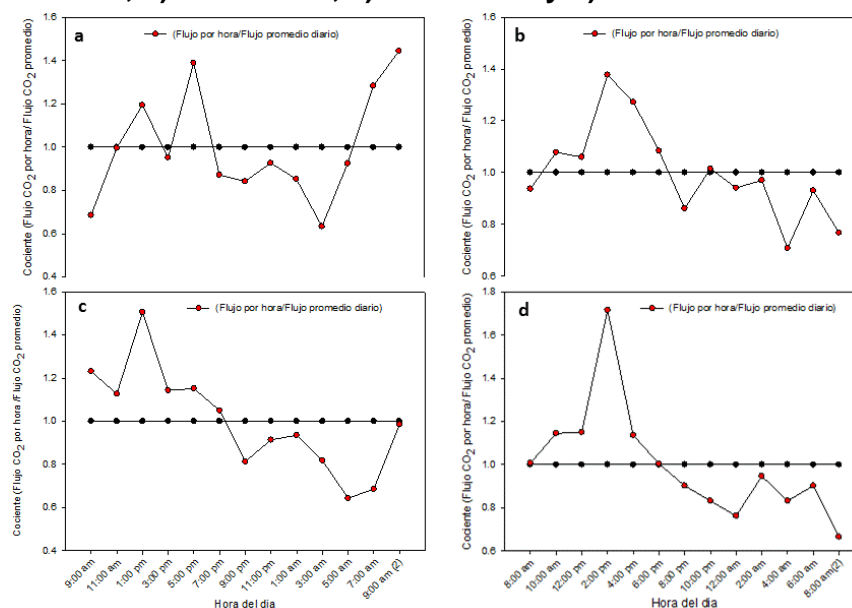
3.1.3. Momento del día adecuado para medir CO₂

Se observaron algunas diferencias y similitudes en los cuatro muestreos respecto al momento del día adecuado para la medición de CO₂ (Gráfica 3-3). Los cocientes entre el flujo de CO₂ promedio y los flujos en cada hora presentaron varios picos, específicamente un pico alto a las 2:00 pm en los muestreos 2, y 4 (Gráfica. 3-2b y 3-2d, respectivamente), en el muestreo 1 se registraron dos picos altos, uno a la 1:00 pm y el siguiente a las 5:00 pm (Gráfica. 3-2a) y en el muestreo 3 un pico alto a la 1:00 pm (Gráfica. 3-2c) estos picos representan flujos que son notablemente más altos que el promedio diario.

En contraste, se pueden observar picos menores a 1 los cuales indican flujos de CO₂ por debajo del promedio diario, estos picos se dieron finalizando la tarde y en la noche desde las 7:00 pm en los muestreos 1 y 3; en los muestreos 2 y 4 se presenta un descenso por debajo del promedio diario a partir de las 6:00 pm. De forma general podríamos relacionar los descensos de los flujos con el periodo donde la intensidad lumínica disminuye y los picos altos de emisiones más representativos en los muestreos se dieron en las horas de la tarde cercanas al medio día donde la radiación es mayor.

Las horas del día que representan un valor en los flujos de CO₂ más cercano al promedio diario se dieron principalmente en las horas de la mañana y la madrugada. Lo anterior se pudo evidenciar en los muestreos 2 y 4 donde a las 8:00 am y 2:00 am se registraron los valores de cociente más cercanos a uno. En los muestreos 1 y 3 también se identificaron horas en la mañana con un cociente cercano a uno, estas horas fueron 11:00 am y 5:00 am para el muestreo 1 y 9:00 am para el muestreo 3.

Gráfica. 3-3: Cociente entre el flujo promedio diario de CO₂ y los flujos de cada hora para: a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



De los anterior se puede inferir que es durante las horas de la mañana donde los flujos tienen a ser más representativos del promedio diario, las horas de la mañana identificadas en el presente estudio, pueden ser agrupadas para determinar un periodo de medición del CO₂ entre las 8:00 a 11:00 am, aunque se presentaron flujos representativos al promedio en horas de la madrugada, cabe resaltar que en la práctica, llevar a cabo muestreos en ausencia de luz solar, puede dificultar las labores de muestreo, es por esto que autores como Xu y Qi (2001) igualmente sugieren que las horas más apropiadas están entre las 9:00 am y las 11:00 am.

Las horas sugeridas en el presente trabajo y en investigaciones similares están basados en ensayos realizados en diferentes regiones con parámetros meteorológicos característicos, lo cual podría hacer que las sugerencias no se adapten a la diversidad de zonas climáticas, sin embargo Subke, Reichstein y Tenhunen (2003) encontraron un aumento de los flujos dos horas después de la salida del sol, lo cual podría funcionar como buen criterio de selección de la hora apropiada de muestreo, en especial para regiones con estaciones marcadas.

3.1.4. Variación temporal del Metano (CH₄)

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P=0.028$) en los flujos de CH₄ en para las diferentes épocas de muestreo (Grafica 3-4). Los flujos de metano presentaron su media más alta durante el primer muestreo ($0.186 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$), en contraste con el muestreo 3 el cual tuvo un flujo promedio diario negativo ($-0.014 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$). Valores similares a los registrados en el presente estudio fueron reportados por Bayer *et al.*, (2012) en cultivos de maíz (-0.66 a $2.325 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$) y Castaldi *et al.*,(2006), los cuales reportaron un consenso del promedio anual en ecosistemas secos y sabanas de países latinoamericanos ($0.12 \pm 0.86 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$), del cual cabe resaltar que la desviación estándar refleja la existencia de un amplio rango de valores negativos y positivos que pueden ocurrir en suelos drenados tal como se presentó a lo largo de los muestreos del presente estudio.

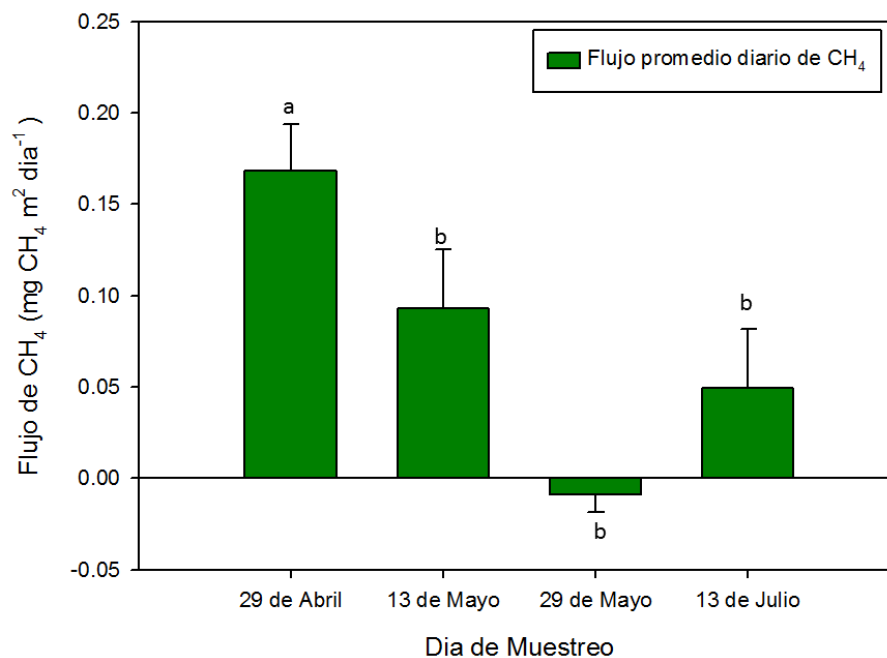
La alta variabilidad de los flujos entre los muestreos, incluso entre las cámaras refleja la compleja dinámica entre los procesos de metanogénesis y oxidación del metano, los cuales no son exclusivos de ecosistemas que se comporten como fuente o sumidero de metano, sino que actúan simultáneamente en el suelo. Esta variabilidad espacial y

temporal del metano está condicionada principalmente por la temperatura del suelo, humedad, el espacio poroso del suelo y la disponibilidad de oxígeno, propiciando microclimas en el suelo para la formación y a su vez oxidación del metano.

Es así, como diferentes autores exponen que, incluso en suelos aireados se pueden crear micro-nichos anóxicos en que las arqueas metanogénicas son capaces de expresar su actividad metabólica, en estas zonas se espera igualmente, que se encuentren cerca bacterias mesófilas que pueden, ya sea utilizar el carbono del metano como fuente de carbono o pueden oxidar el metano de la atmosfera, estos procesos se ven representados en los flujos negativos y positivos y la diferencia entre ellos indica el proceso predominante en el suelo para el momento de la medición (Le Mer y Roger., 2001, Zanatta 2010, Praeg, Wagner y Illmer 2014, Tate., 2015).

Durante los muestreos se presentaron precipitaciones en un rango de 0.4-11 mm/hora, el cual es clasificado como precipitaciones de intensidad leve a moderada. El contenido de agua proveniente de las precipitaciones, pudo mantenerse en el suelo por algunas propiedades de características del área de estudio como el contenido de arcillas expandibles de los Vertisoles presentes en el área, y posiblemente promovieron la disponibilidad de agua en el suelo, desplazando al aire en el espacio poroso del suelo y así generando zonas anaerobias

Grafica 3-4: Flujos diarios de CH₄ en las diferentes épocas de muestreo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

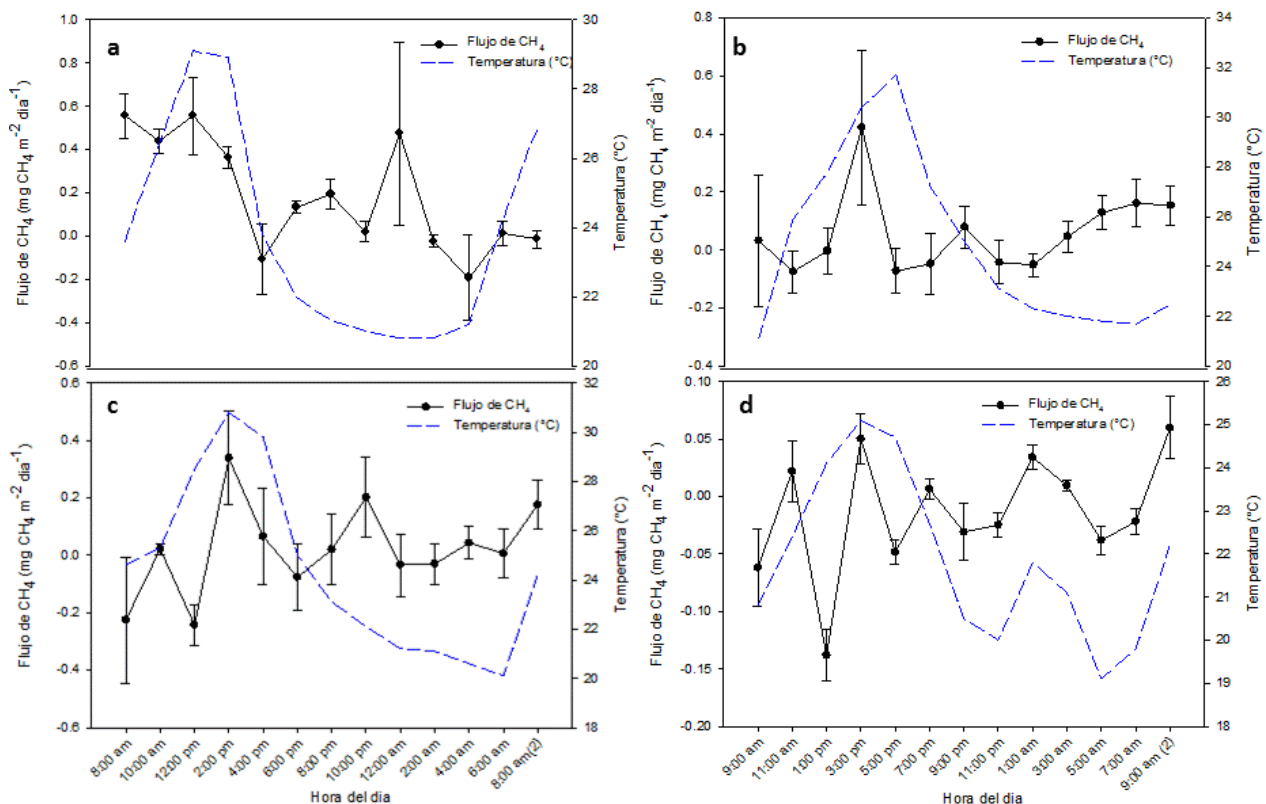


3.1.5. Variación diaria del CH₄ en el suelo

La variación de los flujos de metano a lo largo del día si bien no presentan una dinámica diaria tan marcada como el CO₂, se pueden identificar picos altos de emisiones (Gráfica 3-5), los cuales coinciden con las horas del día que presentan las temperaturas más altas (Coef. Correlación = 0.419). Para los cuatro muestreos, las emisiones más altas fueron al inicio de la tarde (2:00- 3:00 pm) y a pesar de que no se identifica un patrón marcado para los picos bajos, por lo general después del pico alto de la tarde se da un descenso hasta el final de la tarde, siendo las emisiones más bajas las de las horas de la noche y temprano en la mañana.

A pesar de que los flujos altos se presentaron a lo largo de los cuatro muestreos entre el medio día y el inicio de la tarde, también se presentaron algunos picos altos en la noche, estos flujos se presentaron para los muestreos 1, 3 y 4 (Gráfica 3-3a, 3-3c y 3-3d), los cuales podrían considerarse atípicos o inusuales basados en reportes realizados por algunos autores donde registran los picos más altos en el día y los más bajos en las horas de la noche. (Buendia *et al.*, 1998, Allen *et al.*, 2003., Whiting y Chanton 1996., Holzapfel-Pschorn y Seile 1986).

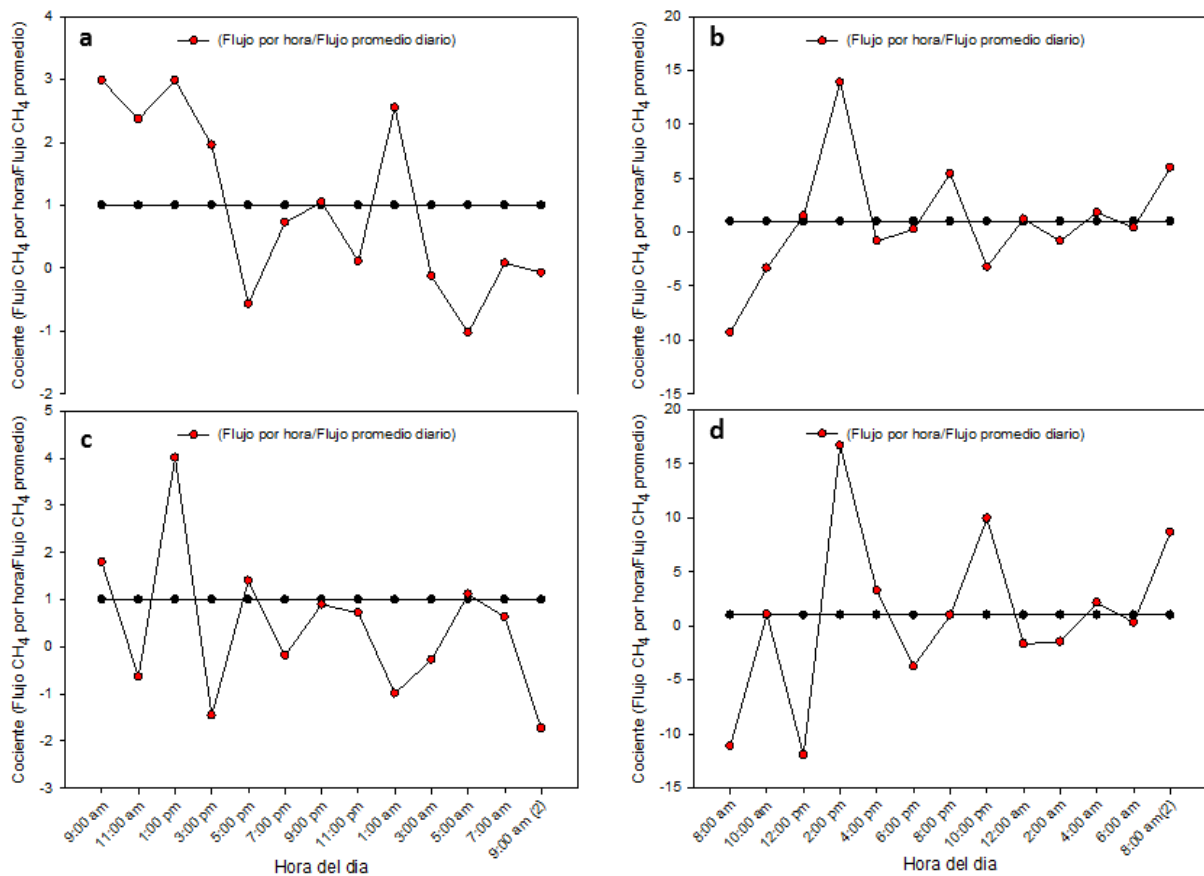
Gráfica 3-5: Flujos de CH₄ y temperatura de aire durante 24 horas. a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



3.1.6. Momento del día adecuado para medir CH₄

La compleja dinámica del Metano en el suelo que lleva a valores de variabilidad muy alta para los flujos vista como variable hace más complicado definir momentos del día que representen el promedio diario de los flujos, sin embargo se pudieron identificar para los 4 muestreos horas del día en las que coincidieron los flujos que más se alejan al promedio diario, así como una “ventana” de tiempo en la que los valores de los flujos obtenidos son más cercanos a la media diaria. (Gráfica 3-6)

Gráfica. 3-6: Cociente entre el flujo promedio diario de CH₄ y los flujos de cada hora para: a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



Como se puede observar en la (gráfica. 3-4), los flujos más altos respecto al promedio se dieron a las 1:00 y 3:00pm en los muestreos 1 y 3 respectivamente y en los muestreos 2 y 4 a las 2:00 pm. Las horas mencionadas anteriormente se pueden ver como una ventana de tiempo en el día (1:00 pm a 3:00 pm) donde la toma de muestras en este periodo puede llevar a sobreestimaciones de los flujos en ese sistema o tratamiento. En contraste, existen

horas del día en la que los flujos estuvieron más cercanos al promedio diario, si bien se presentaron a lo largo del día y la noche en los 4 muestreos sin presentar un patrón marcado, si se pueden determinar coincidencias que pueden ser útiles como criterio de selección de una hora óptima de muestreo.

Todas las horas que presentaron valores representativos al promedio estuvieron distribuidas entre la noche y la mañana, sin embargo y como se comentó anteriormente con el CO₂, las horas de la noche no son una opción viable ni práctica para realizar muestreos, así que podemos reducir el criterio a las horas del día con radiación solar con lo que se obtiene una ventana de tiempo entre las 7:00 am y 12:00 pm. La ventana de tiempo estimada en el presente trabajo coincide con propuestas similares de otros autores (Zheng *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2009, Dong *et al.*, 2001) que recomiendan la toma de la muestra entre las 9:00 am y 11:00 am con el fin de obtener flujos de metano cercanos al promedio.

Aunque el coeficiente de correlación no evidencia una respuesta directa fuerte de los flujos de metano con la temperatura, se hace notorio que la radiación solar y subsecuente aumento de la temperatura al coincidir los flujos más altos y que los flujos más cercanos al promedio se den antes de estos picos de temperatura, habla de una relación más intrincada, donde la temperatura este influyendo de forma más directa sobre otras variables que a su vez se relacionan con los procesos de metanogénesis y metanotrofia en el suelo como la humedad, tasas de descomposición de la materia orgánica, disponibilidad de CO₂ entre otras.

Una importante variable en la que la temperatura influye directamente y afecta la producción de CH₄ en el suelo, es la evapotranspiración. Esta variable está compuesta por dos fenómenos: La evaporación y la transpiración., las cuales ocurren simultáneamente. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. (FAO., 2006). De esta forma la radiación solar influye la disponibilidad de agua en el suelo en los primeros meses del establecimiento del cultivo (en este caso la evapotranspiración fue 3.45 mm/día en la primer época de muestreo).

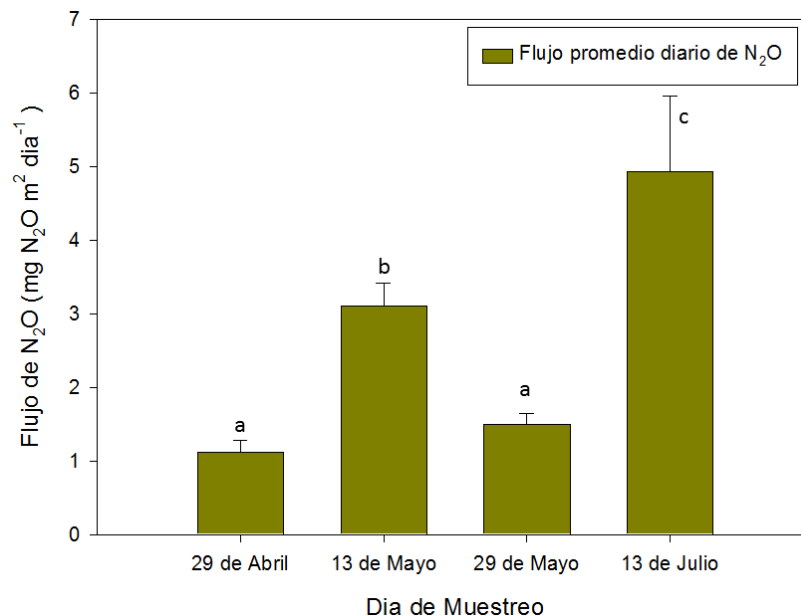
La evaporación del suelo después de la etapa vegetativa, disminuyó, igualmente influenciada por los procesos de senescencia en las plantas donde la transpiración

también disminuye. La dinámica de estos dos procesos no explica por si sola la emisión de metano en el suelo pero si puede ser un indicador de las pérdidas de agua tanto en diferentes épocas del cultivo como en la variación diaria de los flujo, lo cual si afecta directamente la producción de metano en el suelo.

3.1.7. Variación temporal del Óxido Nitroso (N₂O)

En los 4 muestreos los flujos de óxido nitroso presentaron diferencias significativas ($P=0.0075$), fluctuando entre un rango de 0.997 a 4.509 mg N₂O m² día⁻¹ (Grafica 3-7). Los rangos de los flujos de N₂O del presente trabajo, coinciden con valores publicados anteriormente para sistemas de cultivos (Castaldi *et al.*, 2006), entre los cuales podemos destacar rangos publicados en cultivos de Maíz y Soya reportados por Gomes *et al.*, (2009) y Cosentino *et al.*, (2012) respectivamente.

Grafica 3-7: Flujos diarios de N₂O en las diferentes épocas de muestreo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.



Este rango de valores se encuentra en una escala habitual para estos sistemas, ya que a los cultivos ingresan fuentes adicionales de nitrógeno en forma de fertilizantes que generan fluctuaciones a lo largo del ciclo del cultivo, en este caso se realizaron dos fertilizaciones nitrogenadas a lo largo del ciclo del cultivo (31 de Marzo y 26 de Abril), estas fertilizaciones

fueron realizadas durante el periodo fenológico donde comienza a generarse una mayor demanda y absorción de nutrientes de parte de las plantas en estadios V7-V8, aproximadamente 1 mes después de la nascencia donde el sistema radicular de la planta se encuentra más desarrollado (Oyarzun., 2010), por consiguiente, el flujo bajo de N₂O registrado durante la primer época puede ser un reflejo de dicha demanda y absorción. Otra etapa fenológica de la planta que influye en la disponibilidad del nitrógeno en el suelo es la floración, que en este caso fue empezando la 3ra época de muestreo, es este periodo donde la capacidad fotosintética y la demanda de nutrientes presenta su mayor valor, por lo que puede influenciar el bajo flujo de N₂O emitido para esta época, al igual que en la primer época de muestreo.

El hecho de que el flujo más bajo de N₂O se presente al inicio del ciclo y el mayor flujo al final, puede tener relación con lo mencionado anteriormente ya que al inicio del cultivo, las plantas tienen un requerimiento de nitrógeno alto debido a los procesos de desarrollo e incremento de la biomasa, en contraste con el final del ciclo donde los requerimientos son menores además de un aporte progresivo de biomasa al suelo. Lo anterior es expuesto por Ciampitti *et al.*, (2005) los cuales explican que los altos niveles de emisiones al finalizar el ciclo de cultivo parecen deberse a mayores niveles de carbono producto de la senescencia y aporte de materia seca al suelo.

3.1.8. Variación diaria del N₂O en el suelo

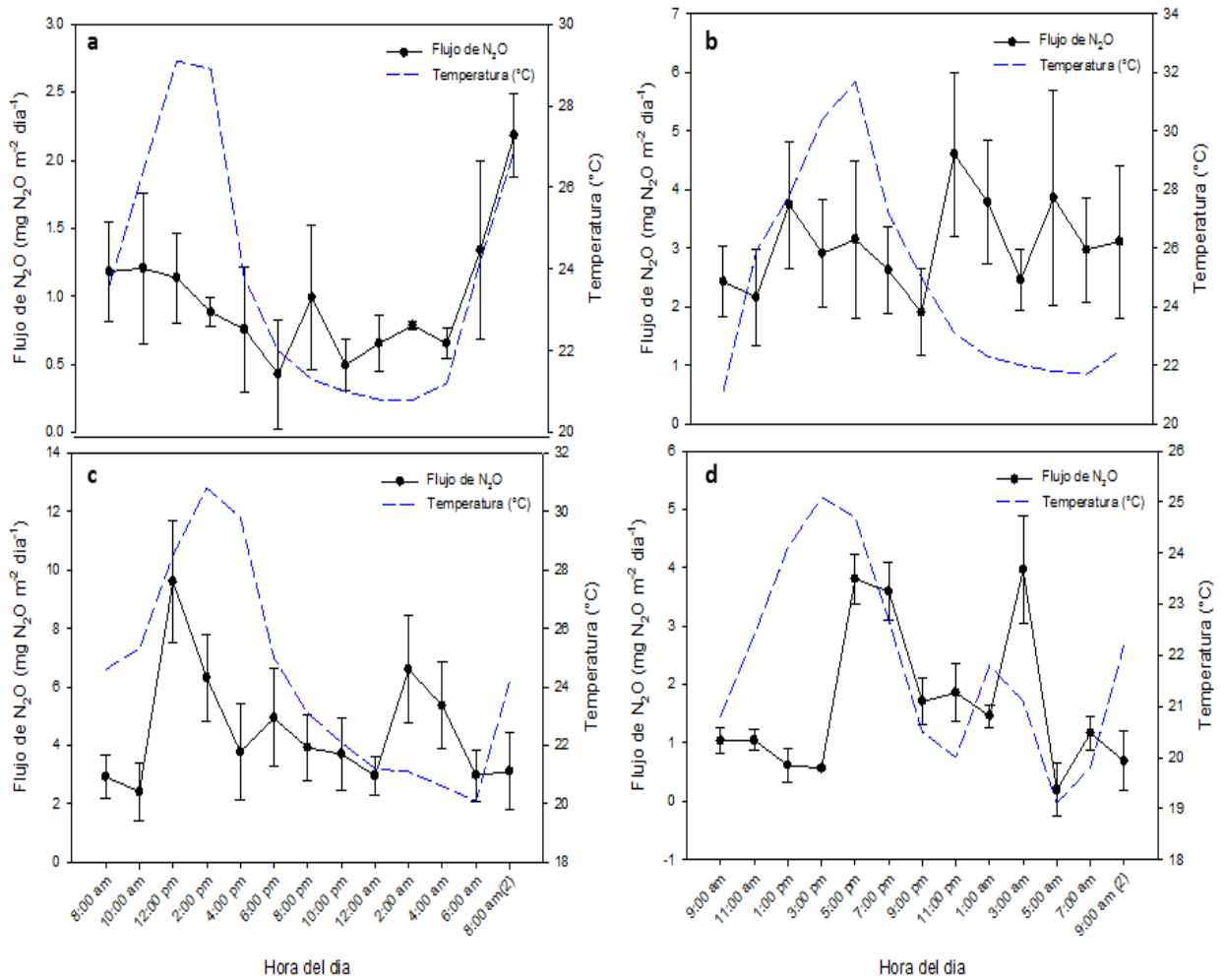
La variación diurna del óxido nitroso es sin duda la más compleja dentro de los gases de efecto invernadero. Como se puede evidenciar en la (gráfica. 3-8) no se refleja un patrón en los picos altos y bajos de las emisiones a lo largo de los muestreos, ya que los flujos más altos se presentaron tanto al medio día (muestreo 3) como en la mañana (muestreo 1) y en la noche (Muestreo 2 y 4). Las emisiones más bajas se observaron para la mayoría de los muestreos (excepto el muestreo 1 donde los flujos más altos se dieron en la mañana) en las horas de la mañana hasta el medio días y algunos flujos en la noche.

A pesar de la alta variabilidad de los flujos a lo largo del día, estos presentan una correlación positiva con la temperatura (Coef. Correlación > 0.5), esta relación positiva de los flujos con la temperatura ha sido descrita por algunos autores (Simek *et al.*, 2010, Akiyama *et al.*, 2000; Livesley *et al.*, 2008, Alves *et al.*, 2012) mientras que otros no lograron evidenciar esta relación (Chao *et al.*, 2000, Du *et al.*, 2006, Cosentino *et al.*, 2012). Las diferencias en los resultados pueden deberse a que los cambios en la temperatura del

suelo derivado de la radiación solar pueden variar dependiendo la región, de esta manera, mientras en algunas regiones el impacto de la radiación sobre el suelo y la actividad microbiana puede ser rápido en otras regiones la relación no puede verse inmediatamente.

Adicionalmente, el tipo de suelo, su origen y manejo pueden hacer que exista mayor heterogeneidad de sus propiedades y por ende la temperatura puede afectar de forma diferentes las propiedades de dichos suelos, por ejemplo: el tipo de arcillas y la porosidad pueden influenciar en el efecto de la temperatura en la evaporación y retención del agua.

Gráfica 3-8: Flujos de N₂O y temperatura de aire durante 24 horas. a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



Al igual que las emisiones de CH₄, el N₂O tiene una relación muy importante con el contenido de humedad del suelo, el cual podría explicar también la variabilidad del óxido nitroso ya que la disponibilidad de agua en el suelo depende no solo de las condiciones de temperatura sino de las propiedades físicas del suelo, de ahí, que el movimiento de agua en el suelo puede cambiar las zonas anaerobias y la tasa de degradación de la materia orgánica constantemente variando así la distribución espacial de la producción de N₂O en el suelo a partir de procesos de desnitrificación que como se ha mencionado es favorecido por las condiciones de anaerobiosis en el suelo.

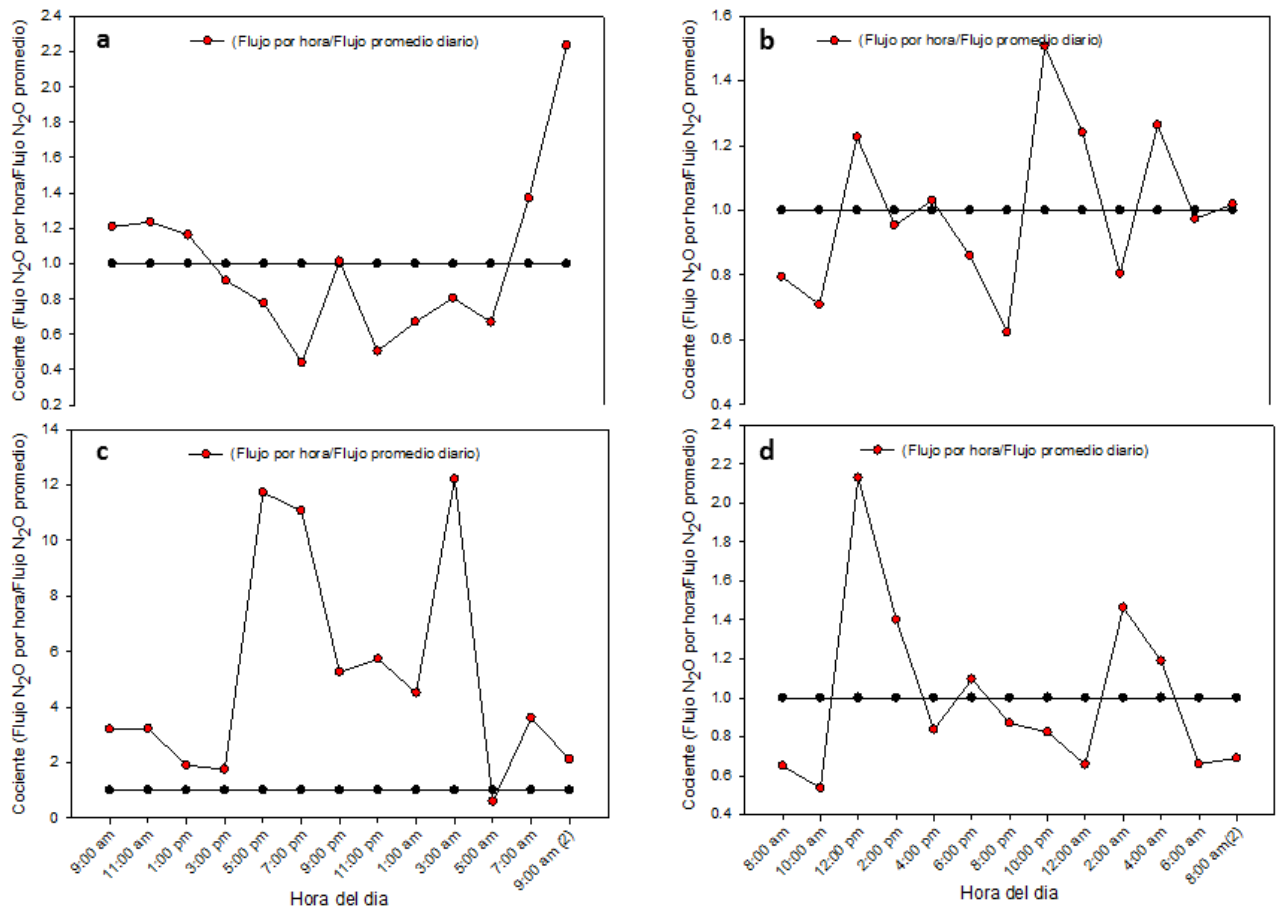
3.1.9. Momento del día adecuado para medir N₂O

Las horas del día donde los flujos de N₂O se alejaron del promedio diario y las que podrían representar una media diaria, se encuentran a lo largo de las 24 horas sin una ventana de tiempo definida para ningún de los eventos, sin embargo y para efectos prácticos se debe enfocar en las horas con radiación solar ya que como se mencionó anteriormente es improcedente realizar muestreos durante la noche.

Al reducir el criterio de selección a las 12 horas del día que cuentan con luz solar, podemos observar que para los muestreos 2 y 4 la hora que coincidió con un flujo mucho mayor al promedio del día fue el de las 12:00 pm (Gráfica 3-9). Un punto alto a las 9:00 am del muestreo 1 no coincide con los demás flujos que también fueron medidos para esa hora que en contraste se encuentran muy cercanos al flujo promedio, por lo tanto se puede considerar atípico. Flujos por debajo de promedio diario se dieron entre las 8:00 am a 10:00 am en los muestreos 2 y 4, pero de forma general, las horas más representativas del promedio diario de N₂O estuvieron entre las 6:00 y 8:00 am y después del medio día entre la 1:00 pm a 4:00 pm.

De las anteriores observaciones se puede deducir que los flujos de N₂O pueden ser medidos tanto en la tarde como en la mañana siempre y cuando se evite la toma de muestras al medio día cuando la temperatura suele estar en su punto más alto. Lo anterior ha sido mencionado por Thomson *et al.*, (1997), Ryden *et al.*, (1978) y Alves *et al.*, (2012) los cuales concluyeron que los flujos de N₂O pueden ser medidos en cualquier momento tanto del día como de la noche, siempre y cuando que el pico de la tarde sea evitado.

Gráfica. 3-9: Cociente entre el flujo promedio diario de N₂O y los flujos de cada hora para: a) Muestreo 1, b) Muestreo 2, c) Muestreo 3 y d) Muestreo 4



3.1.10. Momento del día óptimo para medir los GEI en el suelo

Hasta el momento se realizó una interpretación de la dinámica temporal diaria de cada gas con el fin de determinar los momentos de día que podrían servir para representar el flujo promedio de cada uno de los gases en el suelo, sin embargo, resultaría dispendioso tener una hora específica de muestreo por cada gas si en un ensayo determinado se pretenden evaluar los tres. Por consiguiente, al integrar los criterios para cada gas podemos determinar que coinciden en las horas de la mañana (8:00- 11:00 am) para la toma de la muestra y como factor ambiental determinante la temperatura tanto del suelo como del aire lo cual concuerda con algunos autores que han realizado investigaciones similares en Latinoamérica (Alves et al., 2012, Cosentino et al., 2012).

Es importante resaltar que las condiciones meteorológicas influyen en la dinámica diurna de los flujos, por consiguiente cada investigador deberá decidir si ajusta los periodos óptimos de muestreo según los eventos climáticos que acontezcan a lo largo de su ensayo, esto especialmente para experimentos realizados en regiones de clima templado. Para regiones tropicales un buen criterio puede ser seleccionar un tiempo que se encuentre en un periodo comprendido entre las primeras horas del día después de salir el sol (aproximadamente 2 horas después) y antes del mediodía, aunque no debe considerarse una “camisa de fuerza” ya que no todos los experimentos cuentan con las mismas capacidades logísticas, sin embargo en lo que si debe tener una rigurosidad es en que se respete el tiempo de muestreo a lo largo de la experimentación con el objetivo de reducir el error asociado a las variaciones diurnas de los gases

3.2. Comparación de los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O usando diferentes diseños de cámara estática cerrada

Durante 4 días consecutivos se realizaron muestreos usando 3 diferentes diseños de cámara estática cerrada. El desarrollo de los muestreos en campo usando los diferentes diseños no varía significativamente, sin embargo se presentan algunas observaciones de intereses para futuras modificaciones a los diseños acerca del desempeño y funcionamiento de las cámaras en campo. A continuación se presenta una tabla comparativa realizada a partir de la experiencia recolectadas durante el proceso de manipulación de cada uno de los diseños en campo (Tabla 3-1).

Entre otra observaciones cabe destacar que el modelo propuesto viene provisto de un ventilador que funciona alimentado de una batería seca de 12 voltios, este aspecto operacional en el diseño puede ser menos practico en campo, ya que es necesario llevar una batería por cámara o realizar un circuito en serie para alimentar los ventiladores de todas las cámaras a partir de una sola batería, sin embargo no siempre será posible debido a las distancias entre parcelas para algunos ensayos.

Tabla 3-1. Comparación de diferentes aspectos técnicos de los diseños de cámaras convencional y el diseño de cámara propuesto

	Diseño propuesto	Diseño Convencional Tamaño Mediano	Diseño Convencional Tamaño Pequeño
Perturbación del suelo durante la Instalación	-Perturbación leve -La lámina metálica facilita la inserción en el suelo. -Laminas muy delgadas pueden torcerse durante la inserción	-Alta, Depende del calibre del tubo de PVC -El calibre del tubo de PVC puede dificultar la inserción de la base en el suelo.	-Alta, aunque por su tamaño el perímetro es menor. -El calibre del tubo de PVC puede dificultar la inserción de la base en el suelo.
Toma de muestra	La toma de la muestra no presenta ninguna dificultad.	La toma de la muestra no presenta ninguna dificultad. La mezcla del gas se debe hacer con una jeringa antes de tomar la muestra	La toma de la muestra no presenta ninguna dificultad La mezcla del gas se debe hacer con una jeringa antes de tomar la muestra
Limitaciones de uso	Puede ser muy grande para algunos cultivos (ej.: Maíz)	Es menos representativa del área.	Representa un área muy pequeña de la parcela.
Ventajas en campo	Puede representar un área mayor de la parcela -fácilmente detectable en áreas de vegetación espesa	- El transporte y desplazamiento de las cámaras es más practico por su tamaño	-Fáciles de transportar -útil para áreas estrechas, como surcos entre cultivos o arboles de raíces gruesas
Resistencia de los materiales	El calor del suelo puede torcer la lámina si es muy delgada	Exposición excesiva al sol puede resquebrajar la tapa de fibra de vidrio. Las bandas de caucho se deterioran con el sol excesivo.	Exposición excesiva al sol puede resquebrajar la tapa de fibra de vidrio. Las bandas de caucho se deterioran con el sol excesivo.
Probabilidad Fuga de muestra	Depende de los ganchos usados para fijar la cámara a la base.	Depende del grosor de la banda de caucho y la elasticidad	Baja, si se usa una banda ancha que sujete la cámara a la base

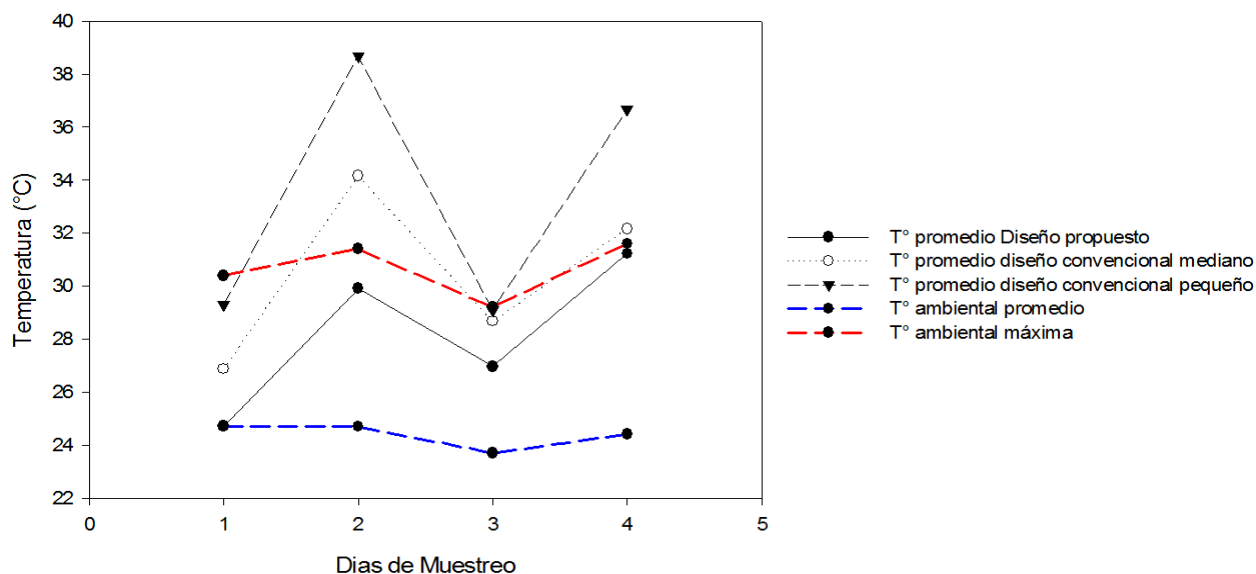
Aunque la adaptación de un ventilador en la cámara implica la manipulación de más elementos en campo (cables y baterías) es importante resaltar que el ventilador reduce el tiempo de muestreo al no ser necesaria la mezcla del gas con la jeringa antes de tomar la muestra, además de contribuir al enfriamiento del gas dentro de la cámara al hacerlo

recircular. En ensayos realizados por Christiansen *et al* (2011) se refleja la importancia de la mezcla del gas en la cámara, ya que los autores reportaron una sub-estimación el 36% de la muestra cuando se tomaba de una cámara sin sistema de mezcla de gas respecto a cámaras que si poseían un sistema para mezclar el gas. A pesar de las recomendaciones de algunos autores sobre el uso de un ventiladores dentro de las cámaras, otros autores lo asocian con errores de medición derivados de las diferencias de presión que puede generar en la cámara (Hutchinson *et al.*, 2000).

3.2.1. Comparación de la temperatura interna de la cámara en los diferentes diseños

El monitoreo de la temperatura interna de la cámara durante los muestreos permitió evidenciar la influencia que tuvo el uso de aislante térmico en el diseño propuesto respecto a las otras dos cámaras. Para el diseño propuesto se usó un aislante térmico a base de espuma de polietileno con recubrimiento metálico reflectivo, al cual se le puede atribuir que la temperatura dentro de las cámaras se mantuvo entre la temperatura ambiente promedio y la temperatura máxima registrada para cada día de muestreo (Gráfica 3-10). La tasa de velocidad a la que aumente la temperatura dentro de la cámara puede influir negativamente en la medición de los gases y en su posterior calculo, ya que se usa para calcular el volumen molecular.

Gráfica 3-10. Promedio de la temperatura (°C) interna de la cámara, temperatura ambiental y temperatura máxima de cada día de muestreo.



La temperatura dentro de las cámaras convencionales, fue alta respecto a la del diseño propuesto, siendo la de la cámara convencional pequeña la más alta registrada a lo largo de los 4 muestreos, la cual siempre fue superior a la temperatura máxima de cada día. Estos cambios de temperatura son predecibles para cualquier tipo de cámara que se use, sin embargo es importante mantener las condiciones de temperatura lo más parecidas al exterior ya que un aumento de temperatura cambia el volumen del gas lo que conlleva a un aumento de la presión dentro de la cámara y esto a su vez afecta la difusividad del gas hacia la atmosfera.

Se logró identificar un patrón en las diferencias de temperaturas entre cámaras, donde en promedio, la temperatura de la cámara convencional pequeña es 15% más alta que la del diseño propuesto para este ensayo, la temperatura de la cámara convencional mediana guardó una diferencia simétrica con los otros dos diseños, estando aproximadamente 7% por encima de diseño propuesto y 7% por debajo del diseño convencional pequeño. Estas diferencias nos pueden dar una idea de la magnitud en que se pueden ver diferenciados las condiciones en que se toman las muestras cuando se usan diferentes diseños de cámara, esto debido a que el uso de aislante mejora las condiciones micro-climáticas dentro de la cámara y por el contrario en cámaras que sufren aumentos drástico de temperatura en su interior probablemente aceleren procesos metabólicos como la respiración (Liu *et al.*, 2009).

Las diferencias de temperatura expuestas anteriormente, traen a colación el tema de la hora apropiada de muestreo y el efecto de la temperatura del suelo y del aire cerca al suelo en las emisiones. Se podría plantear entonces que el uso de cámaras con algún tipo de aislante térmico podría permitir ampliar las ventanas de tiempo en la que se realicen las mediciones ya que lograría “amortiguar” el efecto de la temperatura por lo menos dentro de la cámara, mientras que con cámaras sin aislante térmico se hace más estricto el criterio de seleccionar momentos del día con temperaturas lo suficientemente bajas como para no aumentar drásticamente la temperatura dentro de la cámara.

Algunos autores incluso plantean una corrección de temperatura cuando la tasa de cambio de esta se encuentre por encima de 5°C por hora (Parkin y Venterea., 2010, Butterbach-Bahl *et al.*, 2011), con el fin de para evitar errores de medición asociados a una alteración atípica de la actividad microbiana y de la expansión/contracción de los gases dentro de la cámara. La tasa de aumento de la temperatura se calculó para cada cámara en los 4

muestreos constatando que en la cámara convencional pequeña la temperatura dentro de la cámara aumenta a una razón de 0.12°C por min, es decir 7.2°C por hora, mientras que la temperatura de la cámara con aislante térmico aumentó a una tasa de 0.064°C por min, equivalente a 3.84°C por hora.

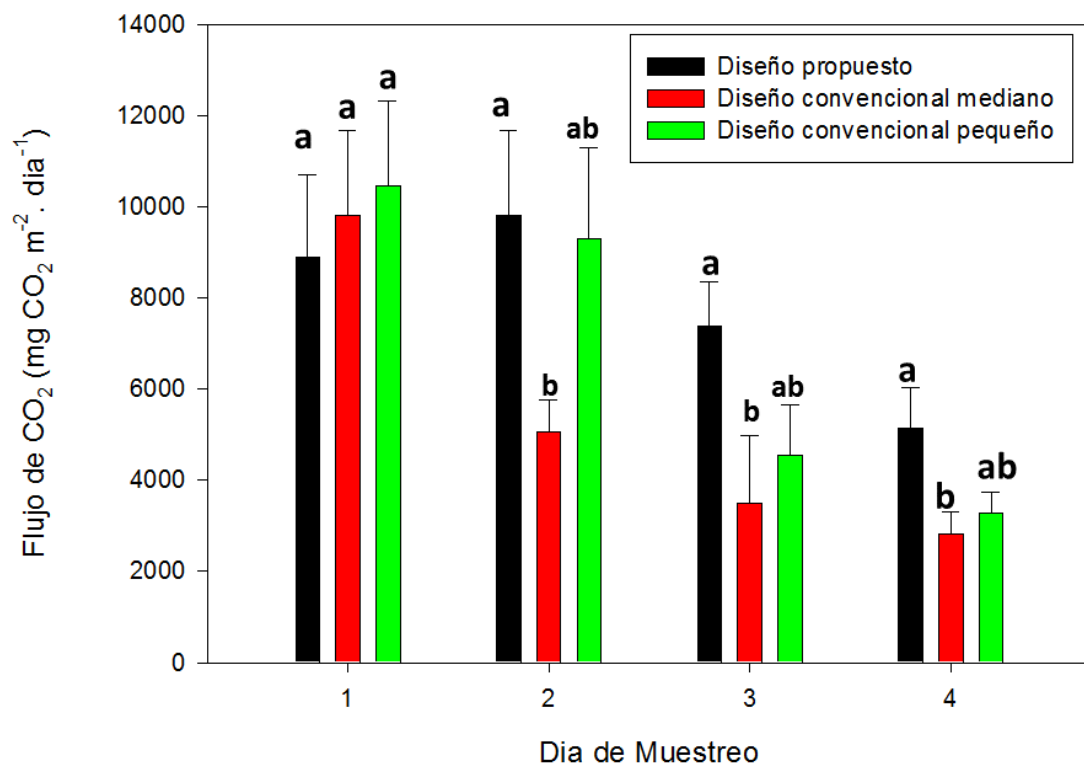
Aunque las temperaturas más contrastantes se presentaron entre el diseño propuesto y el convencional pequeño, lo cual se esperaba debido a las diferencias entre los diseños, las diferencias de temperatura entre los diseños convencionales puede ilustrar mejor el rol que desempeñan aspectos como el color de la cámara (la cámara mediana fue blanca y la pequeña amarilla) que en este caso se presume influyó al igual que el tamaño. Esta información es importante desde el punto de vista de los costos de fabricación de las cámaras ya que se puede observar que los errores asociados a los cambios drásticos de temperatura pueden ser evitados con materiales de aislamiento térmico (si se cuenta con los recursos) o bien seleccionando las dimensiones, color y materiales de la cámara apropiados.

3.2.2. Flujos de CO_2 usando diferentes diseños de cámara estática cerrada

Los flujos de CO_2 calculados usando los datos de concentración en partes por millón (ppm) obtenidos de diferentes diseños presentaron diferencias significativas ($p=0.0497$) para las épocas de muestreo 2, 3 y 4 (Gráfica 3-11). EL diseño de mayor tamaño (diseño propuesto), presentó los flujo de CO_2 más altos, respecto a las demás cámaras a excepción de la época primer época de muestreo

Se puede notar una tendencia a lo largo de los muestreos donde el flujo de CO_2 medido con la cámara más grande es mayor a los otros dos. Respecto a las diferencias en los flujos de CO_2 medidos con diferentes cámaras existe un consenso acerca del papel que juega la altura de la cámara en estas diferencias. La explicación está basada en la primera ley de Fick, la cual explica que el flujo de un gas es dependiente del gradiente de concentración y la difusividad del aire en el suelo, por consiguiente en el momento que la cámara se instala durante el tiempo de muestreo, la concentración de la atmosfera que queda dentro de la cámara empieza a cambiar y así el gradiente de concentración natural (Conen y Smith, 2000; Healy *et al.*, 1996,). Se presume entonces que en cámaras más grandes el gradiente de difusión se altera más lentamente lo que según Davinson *et al.*, (2002) resulta en una menor sub-estimación el flujo.

Gráfica 3-11: Comparación de flujos de CO₂ medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes



La alteración del gradiente natural y la difusividad pudieron influenciar en las diferencias observadas en este trabajo ya que la diferencia de tamaños entre los diseños es muy grande y ambos diseños convencionales fueron menores. Se puede pensar entonces que el volumen efectivo de la cámara de los dos diseños convencionales es muy pequeño para medir la dinámica de un gas que se emite a la atmósfera a una tasa mucho mayor que otros gases por lo que en un momento durante el tiempo de muestreo empieza a generarse una presión sobre el gradiente de concentración hacia la atmósfera produciendo un error en la linealidad de las concentraciones frente al tiempo (En la práctica se puede observar como la concentración en el último intervalo de tiempo no varía respecto al anterior o es inferior).

Las diferencias en los flujos entre el diseño propuesto y los diseños convencionales tienen una razón de ser la cual ha explicada ampliamente por científicos, sin embargo bajo la lógica de que a menor tamaño de cámara los flujos de CO₂ tienen a ser sub- estimados, los resultados del presente trabajo no reflejan este hecho basados en las comparaciones

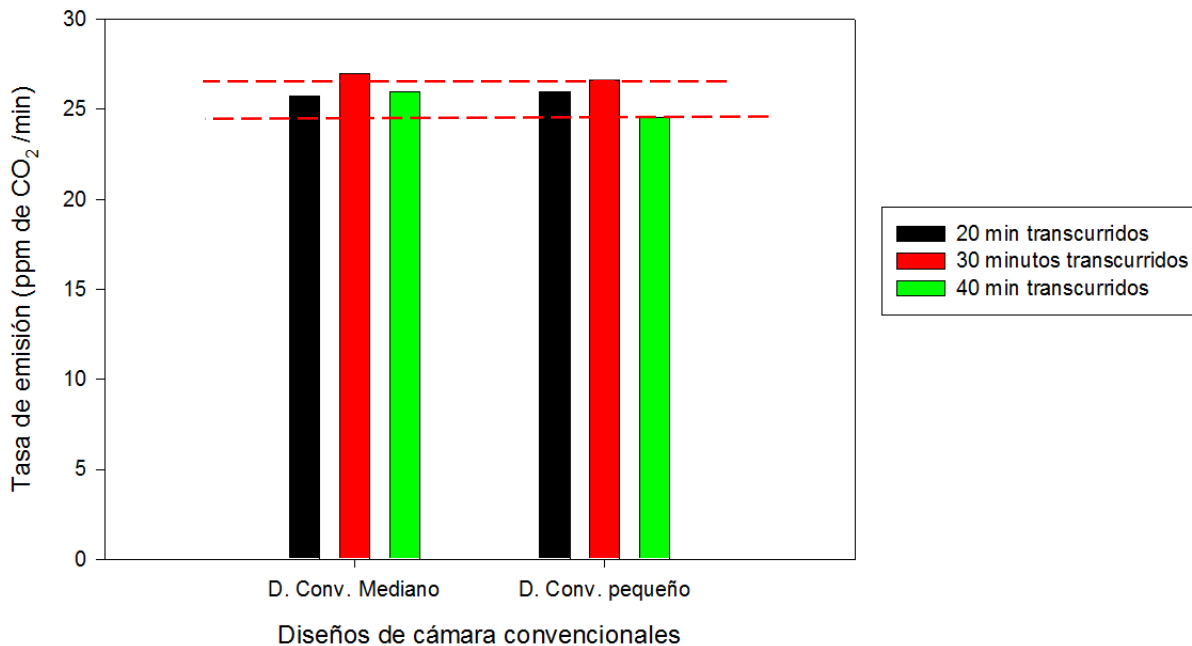
realizadas para los dos diseños convencionales donde la cámara más pequeña siempre presentó un flujo mayor de CO₂ en comparación al diseño de tamaño mediano.

Para poder determinar si en realidad existió una alteración en la tasa de emisión a través del tiempo, se realizó un análisis de varianza de las tasa de emisión (partes por millón de CO₂ / tiempo (min)) a diferentes intervalos de tiempo (20 min, 30 min y 40 min) para las dos cámaras convencionales. El análisis de varianza determinó que existen diferencias significativas entre las cámaras ($P < 0.01$), sin embargo no existieron diferencias significativas entre los diferentes intervalos de tiempo evaluados ($P > 0.3$).

Lo anterior quiere decir, que si bien existen diferencias entre las cámaras, a partir de los 20 minutos de muestreo la tasa de emisión para ambas cámaras no varía significativamente.

A pesar de que no existieron diferencias estadísticas entre las tasas de emisión a diferentes intervalos de tiempo, en la visualización de los datos se puede observar una leve tendencia en ambas cámaras a reducir la tasa de emisión para el ultimo intervalo de tiempo (40 min), lo cual podría recomendar que el empleo de las cámaras convencionales en campo no excedan los 40 min (Gráfica 3-12).

Gráfica 3-12: Tasa de emisión de CO₂ a diferentes intervalos de tiempo transcurridos durante el muestreo para los diseños de cámara convencionales (la línea punteada roja indica el margen de diferencia entre los tiempos)



Al observar las tasas de emisión de ambas cámaras, se podría esperar que en la cámara pequeña se generen flujos menores, sin embargo los resultados mostraron lo contrario. Este flujo mayor en la cámara pequeña a pesar de tener tasas de emisión un poco más bajas, demuestra el sesgo que puede generar los cambios bruscos de temperatura. Para entender mejor el margen de error, se debe recordar que al realizar los cálculos del volumen molecular, para la cámara pequeña se utilizaron valores de temperatura en promedio 7% mayores que en la cámara mediana lo que pudo ocasionar las diferencias.

A pesar de la tendencia de las cámaras convencionales a sub-estimar las emisiones de CO₂ Davinson *et al.*, 2002 y Heinemeyer y McNamara., (2011), No desaprueban su uso en campo, ya que la variabilidad asociada a las fluctuaciones espaciales y temporales en las emisiones es incluso mayor a los errores derivados de la sub estimación. Por esta razón, las estimaciones de CO₂ realizadas con la cámaras convencionales siguen siendo confiables siempre y cuando se eviten largos periodos de medición a horas del día con alta radiación.

3.2.3. Flujos de CH₄ y N₂O usando diferentes diseños de cámara estática cerrada

Las diferencias entre los flujos de CH₄ y N₂O se deben analizar de forma diferente a las de CO₂ debido a que se consideran gases traza, es decir su emisión es muy pequeña en comparación a la del CO₂. Por consiguiente, los errores asociados al uso de la técnica de la cámara estática son muy similares entre el metano y el óxido nitroso los cuales guardan similitud en los coeficientes de variación de sus emisiones (hasta del 100%) como reflejo de la alta variabilidad espacial que expresan en el suelo. Asociado a esa alta variabilidad, se encuentra un aspecto que no se había tenido que tener en cuenta cuando se hablaba de CO₂: los flujos negativos.

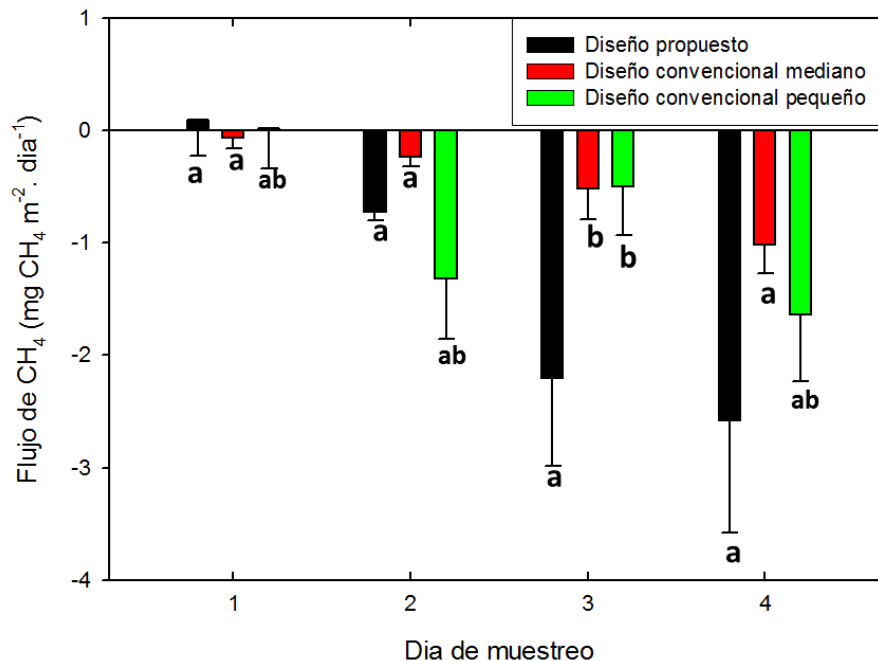
Como se mencionó anteriormente en la sección de la variación diaria del metano y el óxido nitroso en el suelo, los procesos microbiológicos de nitrificación-desnitrificación y metanogénesis-oxidación del metano, ocurren simultáneamente a lo largo del espacio poroso del suelo con o sin presencia de agua, por lo cual se convierte en una fuente de variación que solo puede ser minimizada en ensayos de laboratorio (incubaciones de suelo) ya que la escala de variabilidad en el suelo que podemos distinguir y medir es mucho mayor a la escala donde acontecen estos procesos bioquímicos.

- **Emisiones de Metano**

En los 4 días de muestreo el metano presentó flujos negativos y a pesar de que las desviaciones estándar fueron altas, los rangos de variación se mantuvieron negativos como se puede observar en la gráfica (3-13). Los análisis de ANOVA para cada muestreo arrojaron diferencias significativas ($P=0.05$), las cuales agruparon los flujos medidos con las cámaras convencionales separados del flujo medido con el diseño de cámara propuesto, el cual fue notoriamente más bajo. Igualmente, se puede observar un patrón a lo largo de los muestreos, donde los flujos calculados a partir de las mediciones con la cámara más grande, fueron los más bajos en contraste con los flujos medidos con los diseños convencionales que tuvieron un margen de diferencia mucho menor entre ellos, siendo los flujos de la cámara pequeña los más altos.

Los flujos de CH_4 medidos con cada una de las cámaras estuvieron dentro de los rangos normales para un suelo drenado (Smith., 2000), el cual es habitual se comporte como sumidero de metano como sucedió en este caso. Los rangos en que variaron las emisiones de metano concuerdan con los rangos reportados por Castaldi y Fierro., (2005) para suelos drenados del mediterráneo los cuales a su vez coinciden con trabajos comparados por los autores.

Gráfica 3-13. Comparación de flujos de CH_4 medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes

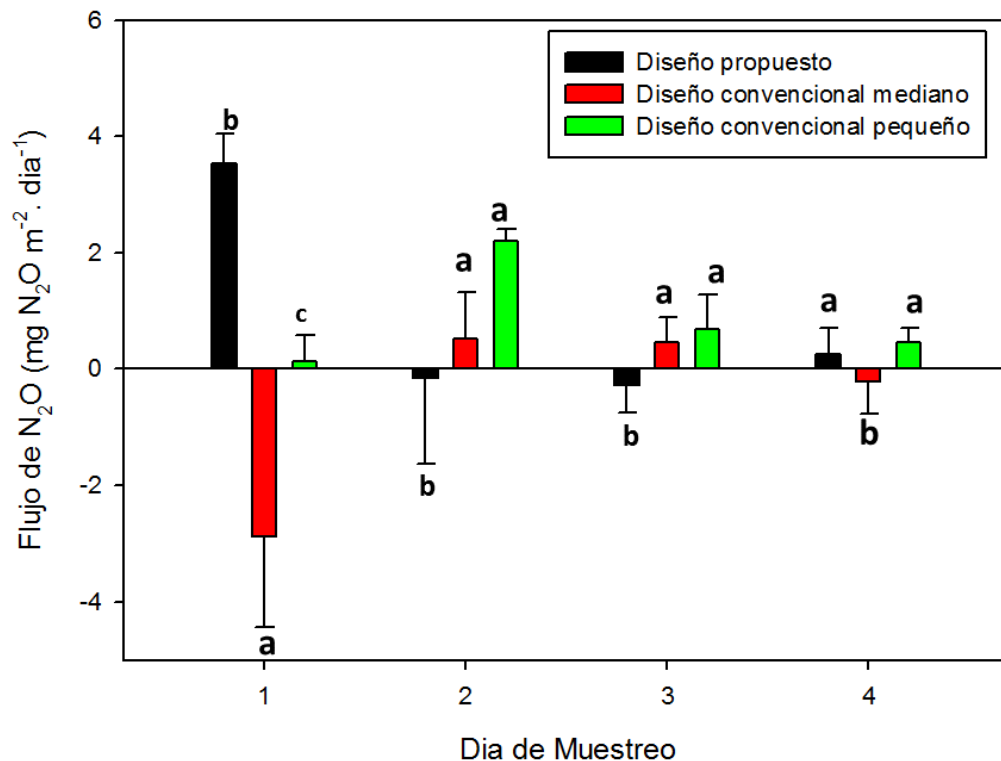


- **Emisiones de óxido nitroso**

Las emisiones de óxido nitroso presentaron un patrón más complejo de interpretar, debido a que se observaron flujos tanto positivos como negativos, demostrando una vez más, la compleja dinámica que tienen los procesos implicado en el ciclo del nitrógeno en el suelo, los cuales son muy sensibles a las condiciones ambientales que los rodean. Los flujos medidos con el diseño convencional pequeño fueron los únicos que permanecieron positivos a lo largo de los muestreos (Gráfica 3-11).

Los flujos medidos solo fueron estadísticamente diferentes para todos los muestreos ($P < 0.05$), donde en la mayoría de los casos ubicaron en un solo grupo los flujos medidos de las cámaras convencionales., cabe resaltar que estos flujos difieren entre sí, sin embargo el test al tomar en cuenta el alto valor de la desviación estándar del flujo negativo medido en la cámara convencional mediana los tomó como un mismo grupo

Gráfica 3-14. Comparación de flujos de N_2O medidos con 3 diseños de cámara estática diferentes



Los rangos observados en los flujos presentan grandes variaciones entre sí, sin embargo el diseño que obtuvo un rango acorde a la literatura para sistemas similares fue el diseño convencional pequeño, el cual estuvo entre el rango de mediciones reportado por Castaldi *et al.*, (2004) el cual recopila la información de mediciones realizadas en ecosistemas de suelos drenados disturbados y sin disturbar alrededor del planeta. Los valores atípicos se presentaron durante el muestreo del día 1, donde el flujo de la cámara más grande estuvo por encima del rango normal para un suelo desnudo que no ha fue fertilizado.

- **Fuentes de error en la medición de CH₄ y N₂O en suelos asociados al diseño de la cámara estática cerrada**

De forma general, se puede identificar que el diseño convencional pequeño presentó los flujos más altos para ambos gases en contraste con el diseño propuesto. Esta situación, contraria a la presentada con el CO₂ puede dar una idea de la relación existente entre el tamaño de la cámara y la sobre-estimación o sub-estimación de los flujos. Algunos autores (Livingston y Hutchinson 1995, Davison *et al.*, 2002) han realizado apreciaciones similares al ponderar los diferentes aspectos del diseño de las cámaras y concluir que las características más importantes a tener en cuenta para reducir los errores de sobre o sub-estimación de los flujos es la relación del área con el volumen de la cámara.

El la tasa de emisión de los gases traza como el metano y el óxido nitroso no da para generar una presión sobre el suelo ni acumularse en la tapa de cámara grande, por consiguiente puede ser innecesario un ventilador en la cámara y por el contrario generar errores en la medición al afectar la sensibilidad de la cámara para cuantificar las concentraciones de estos gases. Sin embargo Parkin y Venterea *et al* (2010), recomiendan el uso de cámaras grandes para medir gases como metano y óxido nitroso con el fin de tener mayor representatividad del suelo al cubrir una mayor área de la parcela, de esta forma, los autores consideran que podrían “promediarse” la emisiones provenientes de más micro-sitios o puntos calientes de emisión que con cámaras más pequeñas.

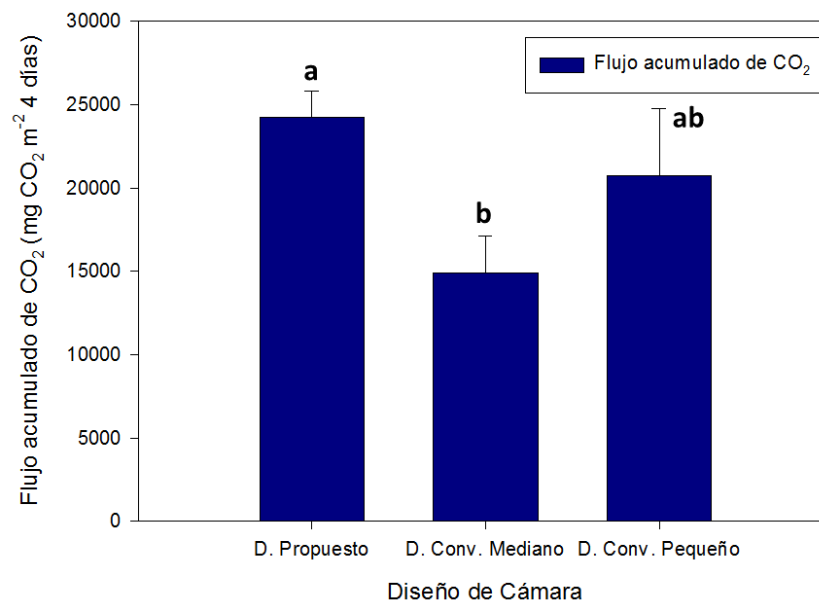
Una forma de llegar a un consenso respecto al tamaño de las cámaras podemos establecer un criterio que tenga en cuenta un tamaño de cámara que permita cuantificar el cambio de concentración sin alterar el gradiente natural y la difusividad de los gases, y a la vez lo suficientemente grande para reducir las perturbaciones de su entorno, como la alteración del suelo, efectos de temperatura o humedad interna de la cámara entre otros.

3.2.4. Comparación de flujos acumulados de los GEI

En la práctica, los flujos acumulados son un cálculo importante para determinar en un periodo de tiempo (que suele ser meses o años), el rol de los sistemas naturales o manejados, determinar si actúan como fuente o sumidero de GEI o evaluar el impacto de las prácticas en los ciclos de los cultivos. Aunque 4 días consecutivos de muestreo no dan una visión amplia de las diferencias entre diseños para un ensayo a largo plazo, es una forma de resumir este tipo de variable.

Los flujos acumulados para el CO₂ y el CH₄, presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$), en los flujos acumulados de CO₂ se observa una clara distinción entre el flujo acumulado de la cámara grande respecto a las dos convencionales, por lo que podemos decir que a largo plazo estas diferencias se pueden extrapolar y generar una diferenciación mayor (gráfica 3-12).

Gráfica 3-12. Flujos acumulados para CO₂ usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes

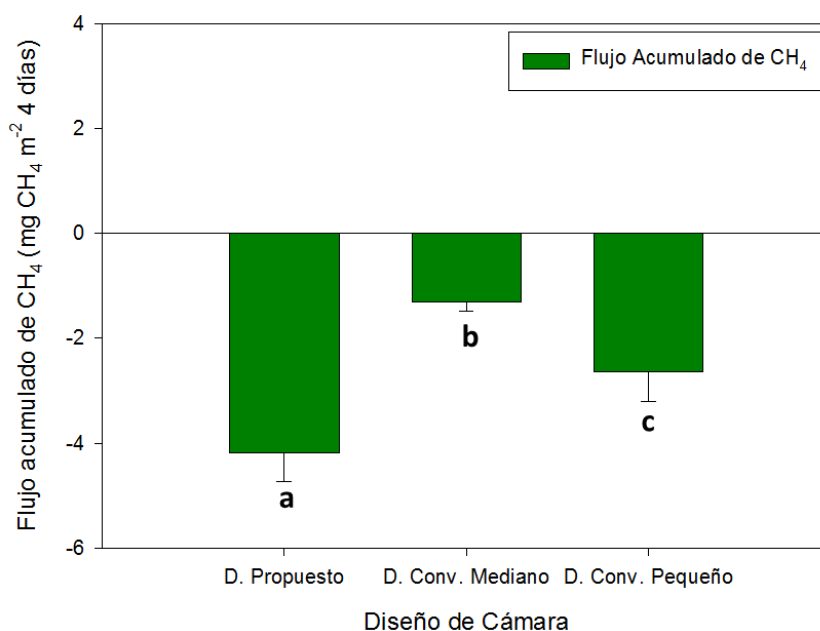


En el caso del metano, las diferencias fueron estadísticamente mayores, agrupando los flujos acumulados de cada diseño por separado (Gráfica 3-13). Basados en los resultados, el sistema evaluado puede ser considerado un sumidero de metano, pero dependiendo del

diseño que se use para evaluar la parcela podremos inferir diferentes magnitudes de este potencial de captura de carbono.

Lo mencionado anteriormente denota la importancia de evaluar a priori aspectos metodológicos como son los diseños de cámaras antes de realizar las evaluaciones, ya que algunas condiciones pueden afectar las condiciones naturales al punto de generar medidas poco realistas. La anterior no busca desaprobado el uso de uno o cierto diseño, sino revelar la incidencia que pueden tener a largo plazo, los pequeños errores de medición asociados a las cámaras.

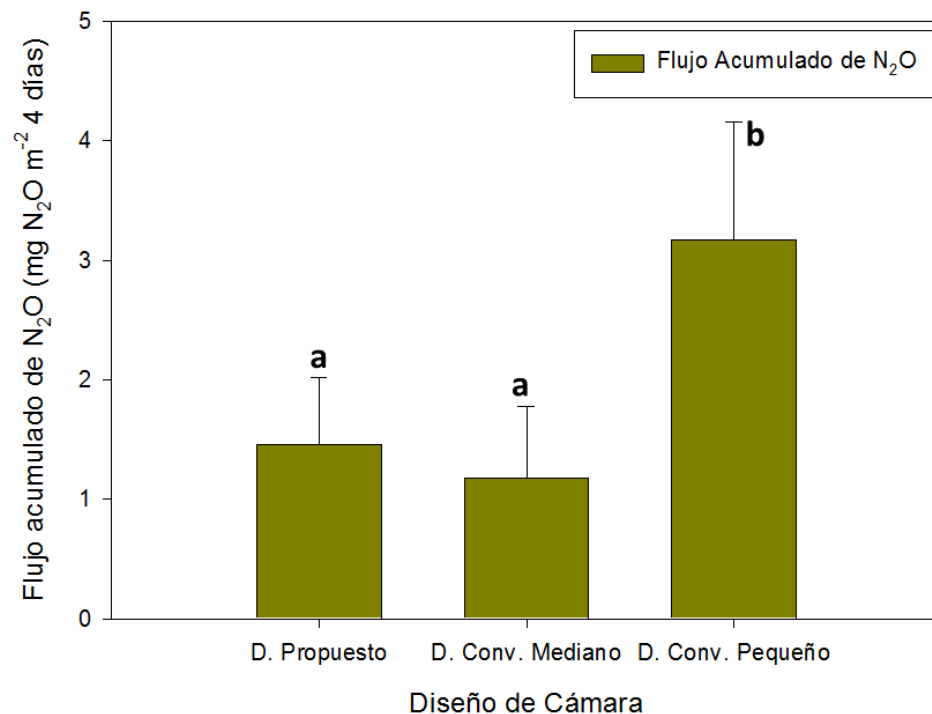
Gráfica 3-13. Flujos acumulados para CH₄ usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes



De los flujos acumulados el óxido nítrico, también presentó diferencias significativas ($P=0.05$) manteniéndose las diferencias igualmente para el flujo acumulado (Gráfica.3-14). Las barras de error reflejan la variabilidad del óxido nítrico en el suelo, por esta razón algunos investigadores realizan transformaciones logarítmicas a los datos con el fin de reducir los errores que derivan de promediar valores positivos y negativos. En algunos casos, las transformaciones logran reducir la variabilidad sin perder las relaciones entre los tratamientos sin embargo es necesario comprender el origen de esta variabilidad, si es

producto de la heterogeneidad intrínseca del suelo o debido a errores de muestreo, antes de realizar algún tipo de transformación a los datos.

Gráfica 3-14. Flujos acumulados para N₂O usando 3 diseños de cámara estática cerrada diferentes



Debido a los bajos aportes que hace el óxido nitroso es fácil detectar cuando un diseño está sobre-estimando las mediciones, los cuales suelen ser menores a la variabilidad asociada a la heterogeneidad espacial del suelo, sin embargo, el criterio de selección de un diseño para la medición de óxido nitroso toma mayor relevancia cuando el sistema a evaluar tiene como característica fuentes de nitrógenos externas como fertilizaciones o desechos nitrogenados de animales (urea), ya que en estos sistemas las emisiones al ser más altas pueden ser magnificadas si se sobre-estiman o pueden pasar desapercibidas o no considerarse una fuente importante de óxido nitroso si son sub-estimadas.

De forma global se pudieron comprobar las diferencias entre las cámaras, donde el diseño propuesto presentó la mayor variación, los diseños convencionales no fueron tan diferentes a excepción del CO₂ el cual pudo estar afectado por la temperatura dentro de la cámara,

sin embargo los datos obtenidos con ambas cámaras pueden estar ser comparadas y copiladas sin que conlleve a una variabilidad mayor a la generada en campo.

3.3. Comparación las emisiones de GEI obtenidas con la técnica de Gas Pooling y las de la técnica convencional

Simultáneamente a la toma de la muestra convencional se realizaron toma de muestra usando la técnica de *Gas Pooling* la cual es explicada en detalle por Arias-Navarro *et al.*, (2013). Este ensayo se realizó con las cámaras convencionales medianas ya que son las que se usan con más frecuencia en Colombia y en los ensayos de comparación de cámaras fue la que obtuvo los flujos medios.

Los resultados obtenidos a partir de la comparación de los flujos con ambas metodologías, mostró una similitud entre las mediciones de ambas metodologías para los flujos de CO₂ y CH₄ pero no para N₂O, los coeficientes de correlación de Pearson presentados en la (Tabla. 3-5)

Tabla 3-5. Coeficientes de correlación de Pearson y diferencia expresada en porcentaje para los flujos de GEI medidos con las técnicas convencional y “Gas Pooling”

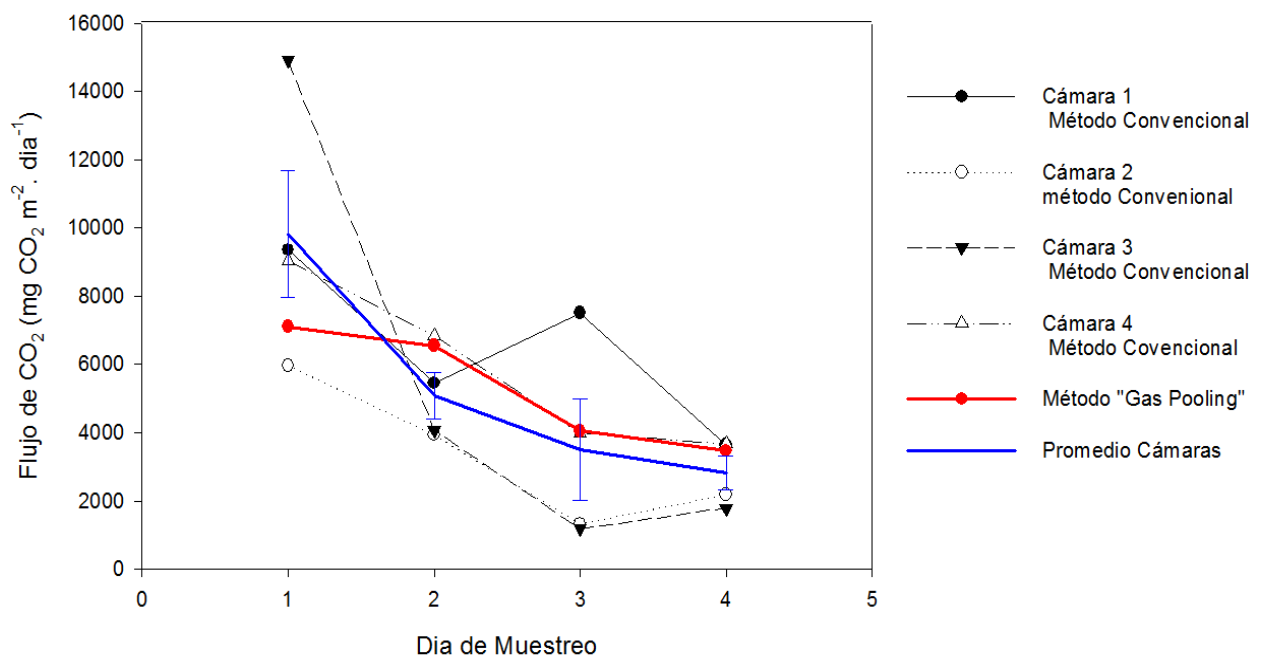
Gases	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Coef. Correlación	0.86	0.96	-0.35
Promedio de diferencia entre los flujos (%)	20	3.3	38

3.3.1. Flujos de CO₂ a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling

La diferencia en los flujos de CO₂ entre las técnicas estuvo en un rango entre 13-27%, como se puede observar en la (Grafica 3-14), los flujos calculados a partir de las muestras tomadas con la técnica de *Gas Pooling* estuvieron cercanas al promedio. En ningún muestreo los flujos calculados a partir de las muestras de *Gas Pooling* se comportaron como puntos atípicos. El muestreo que presentó la diferenciación más grande fue el día 1 el cual coincide con un flujo de una cámara individual muy alto sobre el promedio de las otras tres cámaras. Aunque los flujos presentaron una diferencia entre el 13 -27%, resulta alto comparado con el único reporte que se tiene hasta la fecha de flujos calculados a partir de la técnica de *Gas Pooling*. Arias-Navarro *et al* (2013) reportaron un rango de variación en tres sistemas diferentes entre 1.6- 8.7%

A pesar de que el rango de diferencia entre los flujos obtenidos con cada una de las técnicas fue superior al reportado anteriormente, este rango fue menor al coeficiente de variación (CV%) de las cámaras individuales el cual fue de estuvo entre 23-32% a excepción del muestreo 3 que tuvo un CV del 67% -

Grafica 3-14. Flujos de CO₂ de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de *Gas Pooling*

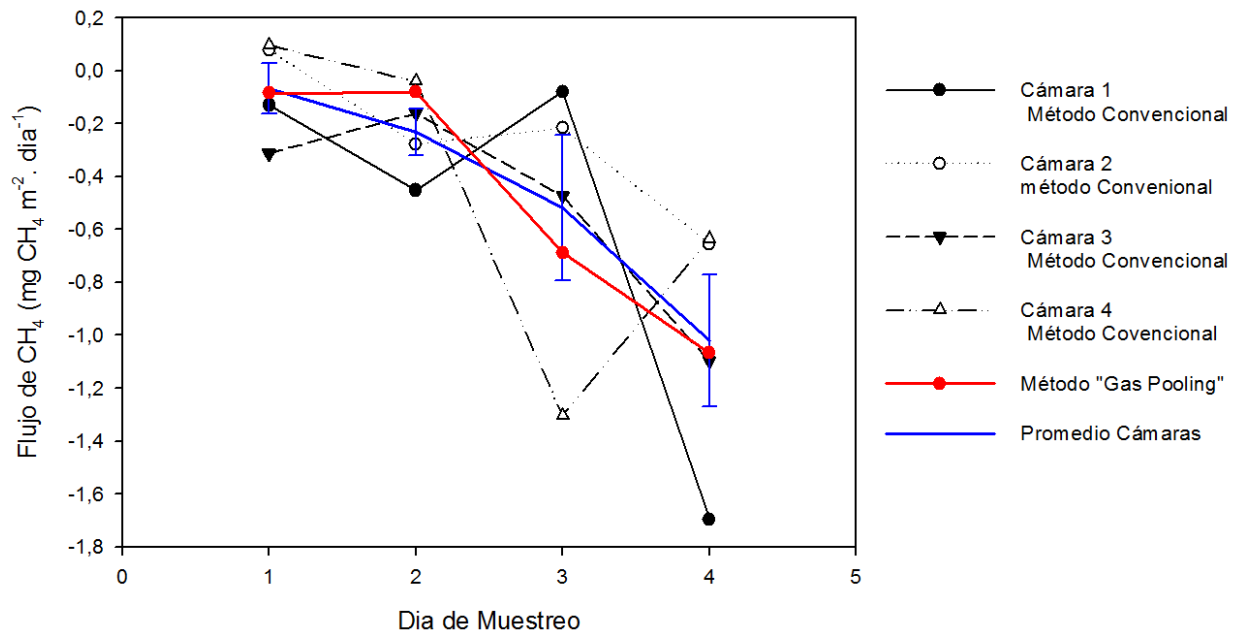


3.3.2. Flujos de CH₄ a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling

Al igual que con los flujos de CO₂, los flujos de CH₄ tuvieron gran similitud entre técnicas, en los muestreos los flujos tuvieron un rango de variación entre el 1-6%, esta variación es baja comparada con los rangos de variaciones que pueden existir entre repeticiones usando la técnica convencional. Los muestreos 3 y 4 presentaron valores extremos que aumentaron la desviación estándar del promedio, sin embargo los flujos calculados con las muestras de *Gas Pooling* estuvieron dentro de los valores de las desviaciones estándar.

No se han reportado estudios de mediciones realizadas con la técnica de *Gas Pooling* para metano, sin embargo los rangos encontrados en este estudio, estuvieron por debajo de los reportados para óxido nitroso reportados por Arias-Navarro *et al.*, (2013). Cabe resaltar que las variaciones presentadas para metano fueron las más bajas de los tres gases a pesar de que los coeficientes de variación (%CV) fueron superiores al 42% en todos los días de muestreo.

Grafica 3-15. Flujos de CH₄ de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de *Gas Pooling*

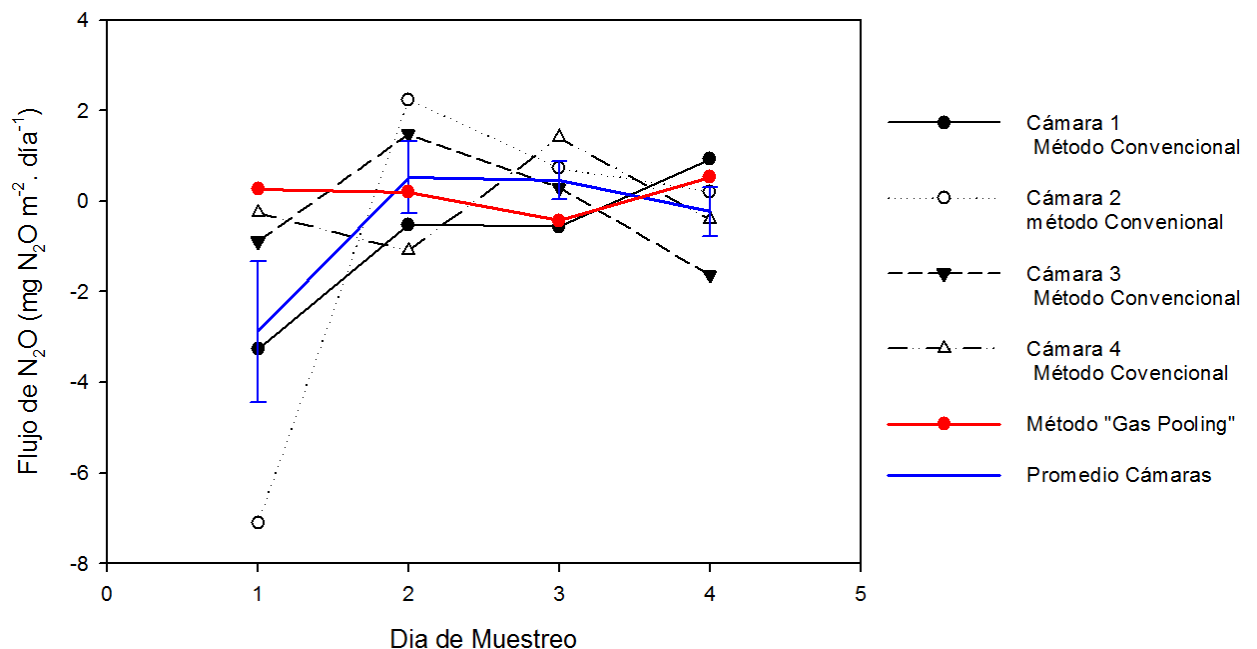


3.3.3. Flujos de N₂O a partir de muestras tomadas con la técnica convencional y la técnica de Gas Pooling

Los flujos de N₂O obtenidos tuvieron una gran variabilidad ya que en el primer muestreo estuvo en un 96% es decir que la diferencia entre las mediciones podía ser casi del doble del flujo. Como se puede observar en la gráfica (3-16), en el muestreo del día 1, el flujo tomado con la técnica de *Gas Pooling* estuvo por encima del promedio, manteniéndose con flujos cercanos a los de las cámaras 3 y 4, sin embargo, el sesgo generado por la cámara 2, separa el flujo del *Gas Pooling* del promedio y por esta razón se genera una diferencia tan grande entre ambas mediciones.

Los rangos obtenidos en este ensayo difieren de los reportados por Arias Navarro *et al.*, (2013), sin embargo las diferencias entre los flujos de las cámaras individuales para un variable como el óxido nitroso está por encima del 60%, el doble de la diferencia entre los flujos medidos con ambas técnicas

Grafica 3-16. Flujos de N₂O de las cámaras individuales y la muestra tomada con la técnica de *Gas Pooling*



3.3.4. Análisis a partir de los resultados obtenidos usando la técnica convencional y Gas Pooling

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas usando las muestras de ambas técnicas dejan ver el enorme potencial que posee la técnica de *Gas Pooling* para ser usada en campo, aunque no se lo resultados fueron muy variables en contraste con el primer reporte hecho sobre el uso de la técnica, las diferencias entre los flujos siempre fueron menores a los coeficientes de variación entre los muestreos, esto quiere que decir que el flujo calculado con la técnica de *Gas Pooling* es poco sensible al sesgo.

Es evidente que la técnica de *Gas Pooling* cumple con el concepto de una muestra compuesta, ya que los flujos medidos con la técnica solo se ven alejados del promedio en caso de valores extremos en alguna cámara, al igual que sucede con las muestras de suelo, cuando no es homogenizada. La técnica logra demostrar que a pesar de las variaciones y del manejo estadístico que se realiza al promediar diferentes flujos y obtener en muchos casos desviaciones estándar altas, estos valores si representan la realidad de lo que sucede en campo a pesar de las incertidumbres estadísticas.

A pesar de que las variaciones en estadística se traducen en incertidumbre de los datos, en el estudio de los flujos de GEI, esta variación es informativa, ya que pueden dar indicios de errores de medición de alguna de las cámaras, algo que con la Técnica de *Gas Pooling* n es posible analizar, por consiguiente la técnica tiene implícita una pérdida de información para el investigador, pero supone un ahorro en costos de análisis multiplicado por el número de cámaras que representen una parcela.

4. Conclusiones

Conocer los procesos que gobiernan las emisiones de GEI en el suelo, puede ayudar a decidir respecto a cuestiones metodológicas importantes como el tiempo óptimo de muestreo. La importancia de este aspecto, es que debido a las variaciones diarias de los flujos, se puede incurrir en sobre-estimaciones o sub-estimaciones si los muestreos coinciden con picos altos o bajos de emisión respetivamente.

Los diseños de cámara estática cerrada usados actualmente en Colombia generan mediciones dentro de los rangos reportados por la literatura alrededor del mundo, sin embargo, modificaciones en el tamaño y uso de aislamiento térmico pueden mejorar las condiciones ambientales dentro de la cámara en el momento de la toma de la muestra. Las comparaciones de los diseños permitieron establecer una serie de criterios básicos que pueden ayudar a reducir los errores asociados al uso de la técnica de la cámara estática cerrada, estos criterios pueden ser usados para que cada investigación genere su propios diseños de cámara estática cerrada a partir las especificaciones de los ensayos.

El uso de la técnica de *Gas Pooling* puede representar un ahorro en costos de análisis de muestras lo cual es un aspecto importante dado el alto costo de los análisis realizados por cromatografía de gases. Aunque las muestras tomadas con la técnica de *Gas Pooling* se comportan de forma similar y guardan la misma tendencia que las tomadas con las técnicas convencionales, cuando la parcela tiene una alta heterogeneidad espacial puede no ser sensible a esta variabilidad.

5. Recomendaciones

Debido a las importantes relaciones que existen entre los flujos de GEI en los suelos y algunas variables físicas, químicas y biológicas se considera recomendable realizar un muestreo conjunto de variables como %Humedad, contenido de N orgánico, temperatura del suelo, densidad aparente entre otras variables que puedan ayudar a comprender la variabilidad de los resultados especialmente para los flujos de CH₄ y N₂O

Para futuras comparaciones, se podrían evaluar otro tipo de materiales para construir las cámaras, tipos de aislantes térmicos y dimensiones, con el fin de copilar más información que amplíe los criterios de selección y las opciones existentes para nuestra región.

Se recomienda seguir evaluando el uso de la técnica de *Gas Pooling*, hasta obtener la información necesaria para generar factores de corrección o modificaciones en la técnica que logren potenciar su utilidad y confiabilidad.

Bibliografía

- Adviento-Borbe, M. a, Haddix, M. L., Binder, D. L., Walters, D. T., & Dobermann, a. (2007). Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biology*, 13(9), 1972–1988. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01421.x>
- Akiyama, H., Tsuruta, H., Watanabe, T., (2000). N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere e Global Change Science* 2, 313-320.
- Allen, L. H., Albrecht, S. L., Colón-Guasp, W., Covell, S. a, Baker, J. T., Pan, D., & Boote, K. J. (2003). Methane emissions of rice increased by elevated carbon dioxide and temperature. *Journal of Environmental Quality*, 32(6), 1978–1991. <http://doi.org/10.2134/jeq2003.1978>
- Alves, B. J. R., Smith, K. a., Flores, R. a., Cardoso, A. S., Oliveira, W. R. D., Jantalia, C. P. Boddey, R. M. (2012). Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 46(July), 129–135. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.022>
- Arias-Navarro, C., Díaz-Pinés, E., Kiese, R., Rosenstock, T. S., Rufino, M. C., Stern, D.,... Butterbach-Bahl, K. (2013). Gas pooling: A sampling technique to overcome spatial heterogeneity of soil carbon dioxide and nitrous oxide fluxes. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 20–23. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.011>
- Bayer, C., Gomes, J., Vieira, F. C. B., Zanatta, J. A., de Cássia Piccolo, M., & Dieckow, J. (2012). Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 124, 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.006>

- Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal. International Society for Microbial Ecology*, 2, 805–814. <http://doi.org/10.1038/ismej.2008.58>
- Becerra, C., Madero, E., Herrera, O., & Amezquita, E. (2005). Caracterización espacial de la compactación en terrenos agrícolas de CIAT, Colombia. *Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG*, 33–37.
- Blagodatsky, S., & Smith, P. (2012). Soil physics meets soil biology: Towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 47, 78–92. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.12.015>
- Brito, L. D. F., Pereira, G. T., & Menezes, Z. (2009). Soil CO₂ Emission Of Sugarcane Fields As Affected By Topography. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 66(February), 77–83.
- Butterbach-Bahl, K., Kiese, R., & Liu, C. (2011). Measurements of biosphere-atmosphere exchange of CH₄ in terrestrial ecosystems. *Methods in enzymology*. 1st ed., Vol. 495, pp. 271–87.
- Buendia, L.V., Neue, H.U., Wassmann, R., Lantin, R.S., Javellana, A.M., Arah, J., Wang, Z., Wanfang, L., Marka-rim, A.K., Corton, T.M., Charoenslip, N. (1998). An efficient sampling strategy for estimating methane emission from rice field. *Chemosphere* 36, 395–407.
- Castaldi, S., & Fierro, A. (2005). Soil-atmosphere methane exchange in undisturbed and burned Mediterranean shrubland of southern Italy. *Ecosystems*, 8(2), 182–190. <http://doi.org/10.1007/s10021-004-0093-z>
- Castaldi, S., Ermice, A., & Strumia, S. (2006). Fluxes of N₂O and CH₄ from soils of savannas and seasonally-dry ecosystems. *Journal of Biogeography*, 33(3), 401–415. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01447.x>
- Cavero, J., Barros, R., Sellam, F., Topçu, S., Isidoro, D., Hartani, T., Lounis, A., Ibrikçi, H., Çetin, M., Williams, J.R., Aragüés, R., (2012). APEX simulation of best irrigation and N management strategies for off-site N pollution control in three Mediterranean irrigated watersheds, *Agricultural Water Management* 103: 88-99.

- Chanda, A., Akhand, A., Manna, S., Dutta, S., Das, I., Hazra, S.,... Dadhwal, V. K. (2014). Measuring daytime CO₂ fluxes from the inter-tidal mangrove soils of Indian Sundarbans. *Environmental Earth Sciences*, 72(2), 417–427. <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2962-2>
- Chao, C.C., Young, C.C., Wang, Y.P., Chao, W.L. (2000). Daily and seasonal nitrous oxide fluxes in soils from hardwood forest and different agroecosystems of Taiwan. *Chemosphere*
- Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A et al (2007) Soils, a sink for N₂O? A review. *Glob Change Biol* 13:1–17. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x
- Chiaradia, J.J., Chiba, M.K., de Andrade, C.A., do Carmo, J.B., de Oliveira, C., Lavorenti, A., 2009. CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an ultisol treated with sewage sludge and cultivated with castor bean. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 1863–1870
- Christiansen, J. R., Korhonen, J. F. J., Juszczak, R., Giebels, M., & Pihlatie, M. (2011). Assessing the effects of chamber placement, manual sampling and headspace mixing on CH₄ fluxes in a laboratory experiment. *Plant and Soil*, 343(1-2), 171–185.
- Ciampitti, I. a., Ciarlo, E. a., & Conti, M. E. (2005). Emisiones de óxido nitroso en un cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]: Efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia Del Suelo*, 23(2), 123–131.
- Clough, T.J. , P. Rochette, S.M. Thomas, M. Pihlatie, J.R. Christiansen, & R.E. Thorman. (2012) Chapter 2: Chamber Design. *Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. Global Reserch Alliance on Agricultural Greenhouse Gases.*
- Coleman, D.C., and D.A. Crossley. (1996). Decomposition and nutrient cycling. p. 109–140. In *Fundamentals of soil ecology*. Associated Press, New York.
- Conen, F.; Smith, K. a. (2000). An explanation of linear increases in gas concentration under closed chambers used to measure gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 51(March), 111–117. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00292.x>

- Cosentino, V. R., Fernandez, P. L., Figueiro Aureggi, S. A., & Taboada, M. A. (2012). N₂O emissions from a cultivated mollisol: optimal time of day for sampling and the role of soil temperature. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 36, 1814–1819. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600015>
- Cosentino, V. R. N., Figueiro Aureggi, S. a., & Taboada, M. a. (2013). Hierarchy of factors driving N₂O emissions in non-tilled soils under different crops. *European Journal of Soil Science*, 64(5), 550–557. <http://doi.org/10.1111/ejss.12080>
- Crutzen, P.J., Mosier, A.R., Smith, K.A., Winiwarter, W., (2007), 'N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels', *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion* 7, 11191–11205
- Davidson, E.a, K Savage, L.V Verchot, and Rosa Navarro. (2002). Minimizing Artifacts and Biases in Chamber-Based Measurements of Soil Respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113(1-4): 21–37.
- Denmead, O. T. (2008). Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant and Soil*, 309, 5–24. <http://doi.org/10.1007/s11104-008-9599-z>
- Díaz-Rojas, M., Aguilar-Chávez, Á., Cárdenas-Aquino, M. D. R., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Hernández-Valdez, E., Luna-Guido, M., Dendooven, L. (2014). Effects of wastewater sludge, urea and charcoal on greenhouse gas emissions in pots planted with wheat. *Applied Soil Ecology*, 73, 19–25. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.001>
- Dong, Y., Scharffee, D., Qi, Y., Peng, G., (2001). Nitrous oxide emission from cultivated soils in the North China Plain. *Tellus* 53B, 1–9
- Du, R., Lu, D., Wang, G., (2006). Diurnal, seasonal, and inter-annual variations of N₂O fluxes from native semi-arid grassland soils of inner Mongolia. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 3474e3482. Denmead, O. T. (2008). Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant and Soil*, 309(1-2), 5–24.

- Fazli, P., Man, H. C., Md Shah, U. K., & Idris, A. (2013). Characteristics of methanogens and methanotrophs in rice fields: A review. *Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology*, 21(1), 3–17.
- Fang, C.; Moncrieff J.B.; Gholz, H.L.; Clark, K.L. (1998) Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant Soil*, v.205, p.135-146,
- Fang, C., Moncrieff, J.B., (1999). A model for soil CO₂ production and transport 1: model development. *Agricultural and Forest Meteorology* 95, 225-236.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego Y Drenaje. No. 56.
- Fernandez-Luqueño, F., Reyes-Varela, V., Martinez-Suarez, C., Salomon-Hernandez, G., Yanez-Meneses, J., Ceballos-Ramirez, J.M., Dendooven, L., (2010). Effect of different nitrogen sources on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Bioresource Technology* 101, 396–403
- Gomes, J., Bayer, C., Costa, F.S., Piccolo, M.C., Zanatta, J.A., Vieira, F.C.B., Six, J. (2009). Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil and Tillage Research* 106, 36–44.
- Heavy RW, Striegl RG, Russell T.F, Hutchinson G.L, Livingston GP (1996) Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. *Soil Sci Soc Am J* 60:740–747
- Han G, Zhou G, Xu Z, Yang Y, Liu J, Shi K (2007): Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 418–425.
- Heinemeyer, A., & McNamara, N. P. (2011). Comparing the closed static versus the closed dynamic chamber flux methodology: Implications for soil respiration studies. *Plant and Soil*, 346(1-2), 145–151.
- Hernández, M. E. (2010). Wetland Soils as Carbon Sinks and Sources of Methane. *Terra Latinoamericana*, vol. 28(núm. 2), 139–147.

- Holzappel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. (1986). Effect of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. *Plant and Soil*, 92: 223 -233
- Hsu, Y., Singh, S. K., Chiang, M., Wu, Y., & Chang, I. (2009). Strategies to lower greenhouse gas level by rice agriculture. *Journal of Biotechnology*, 8(2), 126–132.
- Hutchinson, G.L., Livingston, G.P., 2001. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *Eur. J. Soil Sci.* 52, 675–682.
- Hutsch, B.W. (2001) Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production - invited paper. *Eur. J. Soil Sci.*, 14:237-260,
- IPCC, 2007. Climate change (2007): Mitigation. In: Metz, B., et al. (Eds.), Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Jones, S. K., Famulari, D., Di Marco, C. F., Nemitz, E., Skiba, U. M., Rees, R. M., & Sutton, M. a. (2011). Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), 2179–2194. <http://doi.org/10.5194/amt-4-2179-2011>
- Klein, C. a. M., & Harvey, M. (2012). *Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines*. *Global Reserch Alliance on Agricultural Greenhouse Gases*.
- Le Mer J, Roger P (2001) Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *Eur J Soil Biol* 37:25–50
- Livesley, SJ, Kiese, R, Graham, J, Weston, CJ, Butterbach-Bahl, K, & Arndt, SK, (2008) 'Trace gas flux and the influence of short-term soil water and temperature dynamics in Australian sheep grazed pastures of differing productivity', *Plant Soil*, vol. 309, pp. 89-103.
- Levy, P. E., Gray, a., Leeson, S. R., Gaiawyn, J., Kelly, M. P. C., Cooper, M. D. a, Sheppard, L. J. (2011). Quantification of uncertainty in trace gas fluxes measured by the static

- chamber method. *European Journal of Soil Science*, 62(December), 811–821.
<http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01403.x>
- Liu, D.Y., Ding, W.X., Jia, Z.J. and Cai, Z.C. (2011). Relation between methanogenic archaea and methane production potential in selected natural wetland ecosystems across China. *Biogeosciences* 8: 329–338
- Livingston GP, Hutchinson GL, Spartalian K (2006) Trace gas emission in chambers: a non-steady state diffusion model. *Soil Sci Soc Am J* 70:1459–1469
- Livingston GP y Hutchinson Anthony (1995) Chamber measurement of soil-atmosphere gas exchange: linear vs. diffusion-based flux models. *Soil Sci Soc Am J* 59: 1308–1310
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña, (2014): Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA pp. 1499-1566.
- Metay, A.; Oliver, R.; Scopel, E.; Douzet, J.M.; Moreira, J.A.A.; Maraux, F.; Feigl, B.J. & Feller, C (2007). N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiania (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, 141:78-88.
- Mora Ravelo, S. G., Sandoval Villa, M., Gavi Reyes, F., & Sánchez García, P. (2005). Emisión de N₂O con fertilización nitrogenada en fertirriego y fertilización convencional. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 21, 23–29.
- Muñoz. C, Surinder Sagggar, Peter Berben, Donna Giltrap, and N. J. (2011). Influence Of Waiting Time After Insertion Of Base Chamber, *71*(December), 610–614.

- Muñoz, C., L. Paulino, C. Monreal, and E. Zagal. (2010). Greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions from soils: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70:485-497
- Norman, J.M., C.J. Kucharik, S.T. Gower, D.D. Baldocchi, P.M. Crill, M.B. Rayment, K. Savage, and R. G. S. (1997). A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *J. Geophys. Res.* 102, 28,771–28,777
- Oyarzun, A. Montserrat. (2010). Respuesta Productiva De Un Cultivo De Maíz (“*Zea Mays*” *L. Var. Dracma*) A Distintas Dosis De Nitrogeno Con Dos Tipos De Riego (Aspersión E Inundación) Y Efecto Sobre La Lixiviación De Nitratos.(Tesis de Grado).Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Septiembre 2010.
- Parkin, T.B. and Venterea, R.T. (2010). Sampling Protocols. Chapter 3. Chamber- Based Trace Gas Flux Measurements. IN Sampling Protocols. R.F. Follett, editor. p. 3-1 to 3-39.
- Picone Liliana I., Cecilia Videla, Cimélio Bayer, Roberto Rizzalli, F. O. G. (2013). Carbono en maíz bajo sistemas de producción con distinta intensificación. *Simposio FERTILIDAD 2013, POSTER*
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F. J., Nordbo, A., Rasilo, T., Pumpanen, J. (2013). Comparison of static chambers to measure CH₄ emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172, 124–136. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.008>
- Ponnamperuma, F.N. (1972). The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, 24, 29–96.
- Posse, G., Richter, K., Corin, J. M., Lewczuk, N. a, Achkar, a, & Rebella, C. (2010). Carbon Dioxide Fluxes on a Soybean Field in Argentina: Influence of Crop Growth Stages. *Open Agriculture Journal*, 4, 58–63. <http://doi.org/10.2174/1874331501004010058>

- Praeg, N.; Wagner, A.O.; Illmer, P. (2014): Effects of fertilisation, temperature and water content on microbial properties and methane production and methane oxidation in subalpine soils. In: *European Journal of Soil Biology* 65, S. 96 - 106
- Tate, Kevin R. (2015). Soil methane oxidation and land-use change – from process to mitigation. *Soil Biology and Biochemistry*, Volumen 80, January 2015, Pages 260-272
- Thomson, a. J., Giannopoulos, G., Pretty, J., Baggs, E. M., & Richardson, D. J. (2012). Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1593), 1157–1168. <http://doi.org/10.1098/rstb.2011.0415>
- Thomson, P.E., Parker, J.P., Arah, J.R.M., Clayton, H., Smith, K.A., (1997). An automated soil monolith/flux chamber system for the study of trace gas fluxes. *Soil Science Society of America Journal* 61, 1323 -1330.
- Torres-Alvarado, R., F. Ramírez V., F. J. Fernández y I. Barriga S. (2005). Methanogenesis and methane oxidation in wetlands. Implications in the global carbon cycle. *Hydrobiología* 15: 327-349
- Rochette, P., (2011). Towards a standard non-steady-state chamber methodology for measuring soil N₂O emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166e167, 141-146.
- Rochette, P., Eriksen-Hamel, N.S., (2008). Chamber measurements of soil nitrous oxide flux: are absolute values reliable? *Soil Science Society of America Journal* 72
- Rochette, P., & Hutchinson, G. L. (2005). Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. *Micrometeorology in Agricultural Systems*, 247–286.
- Rondón M. (2000). Land use and balances of greenhouse gases in Colombian tropical savannas [Tesis de doctorado]. Ithaca, NY: Cornell University.
- Ryden, J.C., Lund, L.J., Focht, D.D., (1978). Direct infield measurement of nitrous oxide flux from soil. *Soil Science Society of America Journal* 42, 731e738.

- Saggar, S., J. Luo, D.L. Giltrap, and M. Maddena. (2009). Nitrous oxide emissions from temperate grasslands: processes, measurements, modeling and mitigation. p. 1-66. In Sheldon, A.I., and E.P. Barnhart (eds.) Nitrous oxide emissions research progress. Environmental Science, Engineering and Technology Series. Nova Science Publishers, New York, USA
- Silver, W. L., Thompson, a. W., McGroddy, M. E., Varner, R. K., Dias, J. D., Silva, H., Keller, M. (2005). Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. *Global Change Biology*, 11(2), 290–306. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00903.x>
- Syakila, A., & Kroeze, C. (2011). The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(1), 17–26. <http://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>
- Shaver, G. R., Canadell, J., Chapin III, F. S., Gurevitch, J., Harte, J., Henry, G., Rustad, L. (2000). Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. *BioScience*, 50(10), 871–882. Retrieved from http://www.nslc.wustl.edu/courses/archives/Bio4213/05/global_warming.pdf
- Šimek, M. P. Brůček, J. Hynšt. (2010). Diurnal fluxes of CO₂ and N₂O from cattle-impacted soil and implications for emission estimates. *PLANT SOIL ENVIRON.*, 56, (10): 451–457
- Singh, B.P., Hatton, B.J., Singh, B., Cowie, A.L., Kathuria, A. (2010). Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality* 37, 1432–1438.
- Smith, P., K.W.T. Goulding, K.A. Smith, D.S.Powlson, J.U.Smith, P. Falloon & K. Coleman. (2000). Including trace gas fluxes in estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land
- Smith, K.A., Ball, T., Conen, F., Dobbie, K.E., Massheder, J., Rey, A. (2003) Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* 54, 779-791.

- Subke, J.-A., Reichstein, M., Tenhunen, J.D. (2003). Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biol. Biochem.* 35, 1467–1483.
- Whiting, GJ JP Chanton, (1996). Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanisms *Aquatic Botany* vol .54 No 2, 237-253.
- Wuebbles, D. J., and Hayhoe, K. (2002). Atmospheric methane and global change. *Earth Sci. Rev.* 57, 177–210.
- Xu, M., & Qi, Y. (2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7(February 2000), 667–677.
- Xu, L., Furtaw, M. D., Madsen, R. A., Garcia, R. L., Anderson, D. J., & Mcdermitt, D. K. (2006). On Maintaining Pressure Equilibrium Between a Soil CO₂ Flux Chamber and the Ambient Air. *Biosciences, Li-cor*, 20.
- Yao, Z, Zheng, X, Xie, B, Liu, C, Mei, B, Dong, H, Butterbach-Bahl, K, & Zhu, J .(2009), 'Comparison of manual and automated chambers for field measurements of N₂O, CH₄, CO₂ fluxes from cultivated land', *Atmospheric Environment*, vol. 43, pp. 1888-1896
- Yevdokimov I, Ruser R, Buegger F, Marx M, Munch JC (2006) Microbial immobilisation of ¹³C rhizodeposits in rhizosphere and root-free soil under continuous ¹³C labelling of oats. *Soil Biol Biochem* 38:1202–1211. doi:10.1016/j.soilbio.2005.10.004
- Zanatta, J.A., Bayer, C., Vieira, F.C.B., Gomes, J., Tomazi, M... (2010). Nitrous oxide and methane in a South Brazilian Gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 34, 1653–1665.
- Zheng, H, Mei, B, Wang, Y, Xie, B, Wang, Y, Dong, H, Xu, H, Chen, G, Cai, Z, Yue, H, Gu, J, Su, F, Zou, J & Zhu, J, (2008) 'Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology', *Plant and Soil*, vol. 311 pp. 211 – 234