

	GESTION DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS	Código	FO-SB-12/v0
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN	Página	1/87

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTORES

NOMBRES: ABNER YAIR APELLIDOS: VEGA PEÑARANDA

FACULTAD: CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AMBIENTAL

DIRECTOR:

NOMBRES: FRÉDÉRIC APELLIDOS: THALASSO SIRET

NOMBRES: OSCAR APELLIDOS: GERARDO NIETO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ESTANDARIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE CÁMARA DINÁMICA PARA LA MEDICION DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CH₄; CO₂) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

RESUMEN

En este trabajo se puso a prueba la combinación de la técnica de Cámara Dinámica (DC) con el uso de la plataforma tecnológica de espectroscopia laser de cavidad integrada (OA-ICOS); trabajo desarrollado en las instalaciones de los laboratorios de biotecnología del CINVESTAV-CDMX a escala e laboratorio y posteriormente en lagos mexicanos, resultando ser un método práctico, con mediciones prolongadas y alta sensibilidad; permitiendo detectar y medir fluxes de CH₄ y CO₂ en dichos ecosistemas.

PALABRAS CLAVE: Gases de efecto invernadero, Cámara dinámica, Espectroscopia láser, Ecosistemas acuáticos, Lagos.

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 87 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 22 CD ROOM: 1

ESTANDARIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE CÁMARA DINÁMICA
PARA LA MEDICION DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CH₄;
CO₂) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

ABNER YAIR VEGA PEÑARANDA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2016

ESTANDARIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE CÁMARA DINÁMICA
PARA LA MEDICIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CH₄;
CO₂) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

ABNER YAIR VEGA PEÑARANDA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director

PhD FRÉDÉRIC THALASSO SIRET
Doctor en Biotecnología
Investigador Titular 3C

Codirector

M. en C. OSCAR GERARDO NIETO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2016



ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO

FECHA: 15 DE NOVIEMBRE DE 2016

HORA: 14:00

LUGAR: LABORATORIO EMPRESARIAL

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AMBIENTAL

TITULO: "ESTANDARIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE CÁMARA DINÁMICA PARA LA MEDICIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CH₄; CO₂) EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS."

MODALIDAD: INVESTIGACIÓN

JURADOS: JOHN H. SUÁREZ GÉLVEZ
NÉSTOR A. URBINA SUAREZ
JUDITH YAMILE ORTEGA CONTRERAS

DIRECTOR: FREDÉRIC THALASSO SIRET

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN
ABNER YAIR VEGA PEÑARANDA	1650068	5.0

OBSERVACIONES:
LAUREADA

FIRMA DE LOS JURADOS:

JOHN H. SUÁREZ GÉLVEZ.

NÉSTOR A. URBINA SUAREZ

JUDITH. YAMILE ORTEGA C.

Vo.Bo. Coordinador Comité Curricular

NÉSTOR ANDRÉS URBINA SUAREZ

**FORMATO CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA,
LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TEXTO COMPLETO**

Cúcuta, 22 de Noviembre de 2016

Señores

BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS

Ciudad

Cordial saludo:

ABNER YAIR VEGA PEÑARANDA, identificado con la C.C. N° 1094575939, autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Estandarización y desarrollo de la técnica de cámara dinámica para la medición de emisiones de gases de efecto invernadero (CH₄; CO₂) en ecosistemas acuáticos” presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental; autorizo a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander “Eduardo Cote Lamus”, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permia la consulta, la reproducción parcial o total, a los usuarios interesados en el contenido de éste trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, entre otros; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior de conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 1982 y el Artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, que establece que “**los derechos morales del trabajo de grado son propiedad de los autores**”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Para constancia se firma el presente documento en la ciudad de Cúcuta, a los 22 días del mes de Noviembre de 2016.

NOMBRE DEL AUTOR	N° DE CÉDULA	FIRMA
ABNER YAIR VEGA PEÑARANDA	1094575939	

Créditos Institucionales

Este trabajo fue desarrollado en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), en el Departamento de Biotecnología, bajo la dirección del Doctor Frédéric Thalasso y la codirección del M. en C. Oscar Gerardo Nieto.

Durante la realización de este trabajo, el alumno recibió apoyo financiero por parte de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Agradecimientos

A Dios ofrezco mi carrera y doy gracias por la sabiduría y la oportunidad de poder desarrollar satisfactoriamente este trabajo “*la gloria y la honra sea para él*”

Este trabajo y esfuerzo por lograr formarme un profesional es especialmente dedicado a mi hermana *Quemberly Rosio Vega Peñaranda*, que por cosas de la vida desafortunadamente ya no está, pero con seguridad sé que donde quiera que esté, está muy contenta de saber que su hermano alcanzó lo que hace unos años atrás se propuso. Gracias por haberme alegrado la vida durante muchos años. Te recordaré siempre con ese último abrazo y tus mejillas empapadas en lágrimas diciéndome Adiós!

A mis padres, hermanos, sobrinos por ser el eje impulsor de todas mis emociones y metas, gracias por ser y por existir, gracias porque en ustedes encuentro lo que se llama la palabra Amor, porque siempre que me refiero a ustedes lo hago con orgullo y con todo el sentimiento del alma.

A el Doctor Frederic y familia por su grandiosa amabilidad y hacerme sentir como en casa, Doc. Gracias por estar siempre presto ante cualquier inquietud y sobre todo gracias por el conocimiento brindado, es usted una excelente investigador. (*merci!*)

A mi amigo Oscar (*sensei*), gracias por compartir toda esta experiencia y tus conocimientos, eres un buen chavo con una visión muy diferente y particular de las cosas.

A Karla (maaami) y Armando (vaina) por haber sido como mis hermanos en ese país, por buscar hacerme sentir todo el tiempo a gusto y por los conocimientos brindados que por cierto mis respetos. Aprovecho la oportunidad para decirles lo grandes seres humanos que son.

A Sarita, Gabo, Richard, Vicky, Juan, Mary, Daniel batos y baticas gracias por haberme hecho sentir todo ese tiempo como si estuviera con los míos, gracias por la generosidad y por haber hecho de ese viaje una gran aventura.

Hago mención especial y agradezco a mi segunda familia por haber hecho de este proceso algo posible ya que sin su ayuda mis posibilidades de estudiar se hubieran reducido; siempre doy gracias a Dios por una segunda mama Ligia Gómez, a Diana, Melisa, Susel, Juan y Anguie, por haber sido todo este tiempo mi apoyo y con las cuales compartí grandes momentos.

A todos mis profesores en especial a la Profe Yamile Ortega, quien desde inicios de mi formación profesional estuvo asesorándome y ofreciendo su papel de maestra porque independientemente de lo académico siempre estuvo ahí para escuchar mis problemas y aconsejarme cuando más lo necesitaba, por sus regaños, por haberme tenido en cuenta en el desarrollo de varios proyectos de investigación y sobre todo por haberme aportado todas las herramientas y conocimientos para la formación integral de mi carrera.

Al profesor Nestor Urbina por el apoyo, conocimiento brindado y haber hecho posible a través de su gestión el desarrollo de este trabajo en el CINVESTAV.

A Carlos Oviedo, quien durante todo este tiempo ha sido ese consejero, psicólogo y mi amigo.
A Darkys, Sindy, Elkin, Didier... los mencionaría a todos ya que cuento con la fortuna de tener un círculo de amigos bastante amplio y personas a las que estimo mucho; sin embargo, agradezco a todos los que hicieron parte de este recorrido y por enseñarme de cada uno algo.

Contenido

Resumen	
Introducción	1
1. Descripción del Problema	3
1.1 Título	3
1.2 Planteamiento del Problema	3
1.3 Formulación del Problema	3
1.4 Justificación	3
1.5 Objetivos	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Delimitación	4
1.6.1 Espacial.	4
1.6.2 Temporal.	4
1.6.3 Conceptual.	4
2. Marco Referencial	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Marco Teórico	8
2.3 Marco Legal	16
2.4 Marco Contextual	17
3. Metodología	22
3.1 Tipo de investigación	22
3.2 Población y Muestra	22
3.3 Fases o Etapas	23

3.3.1	Revisión bibliográfica.	23
3.3.2	Etapa Experimental (<i>Estandarización del método</i>).	23
3.3.3	Campañas de Campo.	33
3.3.4	Procesamiento Análisis y Elaboración de reportes.	35
4.	Resultados y Análisis.	36
4.1	Etapa experimental	36
4.1.1	Adecuación del prototipo DC-ICOS.	36
4.1.2	Precisión analizador OA-ICOS.	40
4.1.3	Medición de flujos de entrada y salida de la DC.	41
4.1.4	Modelización de tiempo de respuesta.	42
4.1.5	Calculo de fluxes instantáneos	45
4.2	Campañas de campo	47
	Conclusiones	59
	Recomendaciones	61
	Bibliografía	62

Lista de Figuras

Figura 1. Espectroscopia de cavidad ringdown (CDRS)	14
Figura 2. Lago Guadalupe	19
Figura 3. Lago Presa del Llano (PL)	20
Figura 4. Bosquejo general de pruebas volumetricas para la determinación de flujos	27
Figura 5. Simulación ecosistema acuático para la medición de flujos difusivos.	29
Figura 6. Simulación de fluxes ebullitivos de metano de un ecosistema acuático	30
Figura 7. Sistema de entradas y salidas en cámara.	31
Figura 8. Instalación del sistema DC-ICOS en campo	34
Figura 9. Dimensiones Cámara Dinámica	37
Figura 10. Diseño Cámara Dinámica	39
Figura 11. Sistema equipo detector de gases OA-ICOS	40
Figura 12. Respuesta tipo pico de tiempo de residencia	43
Figura 13. Respuesta tipo pico UGGA al poner cámara en tina	44
Figura 14. Prueba de Fluxes instantáneos en laboratorio	46
Figura 15. Rectas flux difusivo de CH ₄ eliminando picos de respuesta.	47
Figura 16. Puntos de medición "Lago Guadalupe"	49
Figura 17. Puntos de medición "Lago Presa del Llano"	49
Figura 18. Fluxes CH ₄ (arriba); CO ₂ (abajo)	50
Figura 19. Rectas de fluxes de CH ₄ asociadas a difusividad (arriba);	55
Figura 20. Relación CH ₄ & CO ₂ . Rectas representan difusividad en ambos gases y burbujeo representados mediante picos.	56
Figura 21. Fluxes CO ₂ Lago Presa del Llano.	56
Figura 22. Concentraciones de CH ₄ a partir del uso de la técnica SC	57

Listado de Tablas

Tabla 1. Potencial de Calentamiento Global de principales GEI, para un horizonte temporal de 20 y 100 años	10
Tabla 2. Parámetros morfométricos de los reservorios. (LG) indica Lago de Guadalupe y PL indicando parámetros del Lago Presa del Llano	21
Tabla 3. Principales características y especificidades del diseño de la DC	38
Tabla 4. Resultados del flujo de absorción por la bomba de vacío del UGGA	41
Tabla 5. Puntos de medición en ecosistemas objeto de estudios	48
Tabla 6. Fluxes calculados mediante método DC-ICOS	52

Resumen

En la actualidad es necesario tener un mejor entendimiento acerca de las emisiones de metano y dióxido de carbono, teniendo en cuenta que la concentración de estos gases en la atmosfera se ha incrementado de forma alarmante durante las últimas décadas. El entendimiento de esa problemática implica la identificación y cuantificación de sus emisiones; atendiendo a estas exigencias, se han reportado inventarios de gases de efecto invernadero a nivel global e importantes avances se han realizado, a través del desarrollo de diversas técnicas que permiten la detección y cuantificación de dichos gases. No obstante, en su mayoría, las técnicas actuales son obsoletas o presentan ciertas limitaciones como exactitud, sensibilidad, portabilidad, precisión, velocidad y rango dinámico. Actualmente, una novedosa plataforma tecnológica basada en espectroscopia laser de cavidad integrada OA-ICOS se ha desarrollado en el grupo del Dr. Thalasso del Cinvestav, aplicado junto con diferentes métodos, obedeciendo a la necesidad de mediciones por tiempo prolongado y con sensibilidad de hasta partes por mil millones, superando dichas limitaciones. Reconociendo la importancia que tienen los lagos como fuente de GEI y combinando OA-ICOS con la técnica de cámara dinámica como una alternativa para la medición de las emisiones de gases en estos ecosistemas; en este trabajo se pone a prueba dicha combinación a escala de laboratorio y posteriormente en campo (*Lago Guadalupe ; Presa del Llano*), resultando ser una técnica practica y sencilla, permitiendo evidenciar la dinámica de las emisiones de CH₄ y CO₂ durante cortos periodos de tiempo (15 a 60 min) con registros en las mediciones de hasta $1,17 \cdot 10^3 \pm 11.2 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$ para el CH₄; $8,05 \cdot 10^1 \pm 0.86 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$ para el CO₂ y con registros mínimos de $2 \cdot 10^{-6} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$; $1 \cdot 10^{-4} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$ de CH₄; CO₂ respectivamente, con 0.98 de nivel de confianza. Con la aplicación de esta técnica se podrá determinar y evaluar las variaciones

espaciales y temporales de las emisiones de gases de efecto invernadero a las que están sujetos estos ecosistemas.

Abstract

Nowadays, the emission of greenhouse gas (GHG) to the atmosphere is a growing concern. Among other sources, GHG emission from aquatic ecosystems are quantitatively important. For instance, it is estimated that aquatic ecosystems emit about 16% of the total emission of methane (CH_4), which is the second most important GHG. The quantification of CH_4 (and CO_2) emissions and the understanding of the biogeochemical mechanism involved are therefore of major importance. The quantification of CH_4 is now commonly done, but most of the technique currently used are obsolete or present certain limitations such as accuracy, sensitivity, portability, precision and dynamic range. Relatively recently, the Dr. Thalasso's group has developed a technological platform, based on a new generation of laser spectrometers; i.e. Off-Axis Integrated Cavity Output Spectrometry (OA-ICOS), which allow for the simultaneous measurement of CH_4 and CO_2 , with a high sensitivity (in the ppb range) and precision. Simultaneously, Dr. Thalasso's group has created a new concept of a dynamic chamber, for the instantaneous measurement of CH_4 and CO_2 fluxes to the atmosphere. This concept is based on the continuous measurement of CH_4 and CO_2 concentration by OA-ICOS, in a chamber floating on the surface of an aquatic ecosystem, while the chamber is continuously flushed by a well determined flow of CH_4 - and CO_2 -free nitrogen. By solving the mass balance of the system, the flux of CH_4 and CO_2 entering the chamber can be determined instantaneously. In this project, we developed the concept by testing a first design of dynamic chamber, in the laboratory, under model conditions, and then under actual conditions in two lakes (*Guadalupe Lake; Llano lake*). The results obtained confirmed the validity of the concept and allowed to determine the instantaneous emission of CH_4 and CO_2 for short periods of time (15 to 60 min) with records measurements of up to $1,17 \cdot 10^3 \pm 11.2 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$ for CH_4 and $8,05 \cdot 10^1 \pm$

0.86 g m⁻²h⁻¹ for CO₂ and with minimal records of $2 \cdot 10^{-6} \pm 0.019$ g m⁻²h⁻¹; $1 \cdot 10^{-4} \pm 0.019$ g m⁻²h⁻¹ for CH₄ and CO₂ respectively. We concluded that with the application of this technique during long measurement periods and at different points throughout the ecosystem, it is possible to determine the spatial and temporal variations of greenhouse gases from lake ecosystems.

Introducción

Durante las últimas décadas, se ha presentado un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estos gases tienen diferente contribución al cambio climático en función de su concentración y su potencial de calentamiento global (Ledezma & Caballero, 2013). Para el año de 1997, mediante el desarrollo del protocolo de Kyoto se establecen como importantes GEI el dióxido de Carbono (CO_2), metano (CH_4); óxido nítrico (NO_2); hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). Los GEI se producen de manera natural pero el aumento de su concentración en la atmósfera durante los últimos veinte años se debe a actividades humanas (Solomon *et al.*, 2007). En lo referente a las fuentes naturales, una de las principales son los ecosistemas acuáticos. Los lagos ocupan más 3 % de la superficie continental (Downing *et al.* 2006) y son responsables de aproximadamente el 16% de las emisiones de CH_4 global (Bastviken, *et al.*, 2011).

Actualmente, para la cuantificación y detección de emisiones de CH_4 ; CO_2 en ecosistemas acuáticos, se han desarrollado diferentes técnicas, como la de cámara estáticas (SC, por sus siglas en inglés), la cual se basa en el monitoreo de la concentración del gas de interés en una cámara flotando sobre el cuerpo de agua, mediante tecnologías como, (i) cromatografía laser (Jahangir *et al.*, 2012), (ii) espectroscopia de masas (Schlüter, M. & Gentz, T. 2008).

Rolston en 1986, discute tres métodos básicos para la medición de fluxes en suelo, dentro de las cuales menciona en colocar una cámara sobre la superficie del suelo y continuamente dejar fluir un gas a través de una entrada de la cámara y por otro extremo tomar muestras de la mezcla y posteriormente medir el gas de interés, por lo que recibe el nombre de cámara dinámica (DC,

por sus siglas en inglés), método que será acondicionado y puesto a prueba en este trabajo. Este concepto permitiría determinar mediciones de GEI *in situ*, durante largos periodos de tiempo; adoptando las características y especificidades dadas por (Rolston 1986; Aneja *et al.*, 2000; Rochette & Eriksen. 2008; Gonzales Valencia 2013).

Las emisiones de GEI en lagos mexicanos, han sido poco estudiadas; no obstante, durante los últimos años, se han reportado algunos avances significativos en la estandarización de técnicas y tecnologías, que permiten la detección y cuantificación de los mismos, pero estas técnicas limitan el número de mediciones lo que resulta estadísticamente poco significativo, o solo permiten la detección de gases disueltos en agua desconociendo la ebullición de los mismos. El objeto de este estudio es estandarizar la técnica de cámara dinámica; utilizando la tecnología OA- ICOS, que permita realizar estimaciones de GEI emitidos por un ecosistema acuático (*lagos*). Este método se le denominó DC-ICOS, por sus siglas en inglés “Dynamic Chamber – Integrity Cavity Output Spectroscopy”

1. Descripción del Problema

1.1 Título

ESTANDARIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE CÁMARA DINÁMICA PARA LA MEDICION DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CH₄; CO₂) EN ECOSISTEMAS ACUATICOS.

1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, la comunidad científica cuenta con diferentes técnicas que permiten la detección y cuantificación de GEI en ecosistemas acuáticos; técnicas que dependen del posterior análisis en laboratorio, lo que implica baja adquisición de datos, y poca valides estadística, debido a la variación espacial.

1.3 Formulación del Problema

¿Permitirá la técnica de Cámara Dinámica con el uso de la tecnología OA-ICOS, estimar las emisiones de GEI (CH₄; CO₂), en un ecosistema acuático?

1.4 Justificación

Reconociendo la importancia que tienen los lagos en cuanto a emisiones de GEI, es necesario establecer una técnica que permita medir la emisión de dichos gases, para así realizar estimaciones de mayor precisión.

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo general. Estandarizar la técnica de Cámara Dinámica (DC), con el uso de la tecnología de espectroscopia laser de cavidad integrada (OA-ICOS) que permita detectar y medir las emisiones de GEI (CH₄; CO₂) a las que está sujetas un ecosistema de lago.

1.5.2 Objetivos Específicos Ajustar y probar a escala de laboratorio el método DC-ICOS, mediante ensayos que busquen su estandarización y posteriormente ser aplicado en campo.

Implementar *in situ* la técnica de DC, en dos lagos con características contrastantes: Lago de Guadalupe (LG) (hipereutrófico) y Presa del Llano (PL) (mesotrófico), usando la tecnología OA-ICOS.

Detectar y estimar fluxes ebullitivos y difusivos de CH₄; CO₂, mediante el desarrollo de la técnica (DC) basada en el uso de la tecnología OA-ICOS.

1.6 Delimitación

1.6.1 Espacial. Debido a su cercanía y sus características contrastantes, el estudio se realizó en dos ecosistemas de lagos LG (hipereutrófico); PL (mesotrófico) (Sepulveda Jauregui. *et al.*, 2013) ubicados en los municipios de Cuautitlán Izcalli y Villa del Carbón, respectivamente. Ambos situados en la periferia del Estado de México.

1.6.2 Temporal. Este trabajo se desarrolló en el periodo comprendido desde 1 de Septiembre de 2015 hasta finales de Enero de 2016. (Tiempo de residencia en México).

1.6.3 Conceptual. Durante el desarrollo de este trabajo, se tratan conceptos relacionados con estudios limnológicos y de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos de

agua dulce (lagos). En lo que respecta a las particularidades de este trabajo se referenciaran principalmente conceptos como Técnica de Cámara Dinámica; emisiones de Metano; Dióxido de Carbono; Fluxes difusivos y ebulitivos; Metanogénesis; Metanotrofía; Tecnología OA-ICOS.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Rochette & Eriksen (2008). El objetivo de este estudio fue determinar criterios de evaluación de calidad de suelo por medio de mediciones mediante el uso de una cámara non-flow through non-steady-state (NFT-NSS). Se proponen mínimos criterios para el diseño de una cámara NFT-NSS y se desarrolla una metodología que permita la medición de fluxes. Se identificaron 16 características metodológicas de la cámara y el desarrollo de cuatro factores en busca buenas mediciones de fluxes de N₂O haciendo uso de dicha cámara. Se copilaron un conjunto de datos de 356 estudios y se evaluó la calidad de cada estudio contra el conjunto de características y factores para determinar la confianza del reporte de fluxes de N₂O. La confianza de los fluxes reportados en el 60% de los estudios evaluados se estima de muy baja a baja debido a metodologías inadecuadas y reportes incompletos. La confianza de mediciones de fluxes ha mejorado con el pasar del tiempo; sin embargo, Hubo también niveles de confianza de bajo a muy bajos sobre el 50% de estudios recientes (2005-2007). Este estudio ha mostrado que la calidad en las mediciones de fluxes en suelos de N₂O en la literatura es pobre. Mientras que los datos obtenidos de fluxes pueden ser válidos para hacer comparaciones entre diferentes situaciones (e.j. en planta de tratamientos). Dentro de este estudio, se obtienen estimaciones de fluxes actuales.

Baer, et al. (2002). Presentan las especificidades de un nuevo instrumento que emplea una cavidad óptica ultrasensible, utilizando un láser infrarrojo de diodo, parecido a las técnicas de espectroscopia de absorción; este instrumento emplea una trayectoria fuera del eje del haz de laser de varios kilómetros. En este estudio, se presentan medidas cuantitativas basadas en la técnica

ICOS a temperatura ambiente. El instrumento se utiliza para las mediciones de CO, CH₄, NH₃ y C₂H₂ y las relaciones de mezcla para demostrar el potencial para una serie de aplicaciones, incluyendo detección atmosférica y el seguimiento de procesos industriales. Como resultado, una absorción detectable mínima de aproximadamente $1,4 \times 10^{-5}$ a través de una trayectoria óptica efectiva de 4.2 kilómetro se obtuvo en un ancho de banda de detección de 1,1-Hz para producir una sensibilidad de detección de aproximadamente $3,1 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$.

Viney P., et al. (2006). Desarrollan un sistema de cámara dinámica, con el propósito de medir emisiones de Nitrógeno, Azufre y compuestos de carbono. En este trabajo se presentan las especificidades con las que cuenta el sistema de cámara dinámica. Los óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x), se han medido en suelos agrícolas, suelos a los que se les ha proporcionado fertilizantes ricos en nitrógeno. Asimismo, esta técnica fue aplicada en lagunas de oxidación anaeróbicas porcinas a través de la interfaz gas-liquido con el fin de hacer mediciones de nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y la reducción de las emisiones de compuestos orgánicos de azufre.

Lambert M., & Frechette J. (2005). Aplican diferentes métodos para la medición de fluxes de GEI. Los métodos usados son: método de capa límite delgada, uso de cámara flotante con mediciones *in situ* o *ex situ* acoplado a un instrumento automático (NDIR o FTIR). Todos estos métodos tienen sus pros y sus contras. Durante años se han hecho pruebas con el fin de comparar los diferentes métodos. Se encontró que no hay diferencia significativa entre las mediciones *in situ* o *ex situ*. Para el CO₂, el número de resultados es similar por el NDIR y el método desarrollado en laboratorio. Por parte de fluxes de CH₄, el número de resultados es tres veces más bajo con la cámara flotante *in situ* y análisis de laboratorio que con otros métodos. La precisión de las

mediciones por duplicado de fluxes es similar en todos los métodos con cámaras flotantes. En general, el método de capa límite delgada tiene mediciones de fluxes más bajas que el método de cámara flotante con análisis en laboratorio y no hay buena correlación entre los dos métodos. Los flujos medidos con instrumentos automatizados (especialmente para los flujos $> 5000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) tienden a ser más altos en comparación con el método de análisis de laboratorio, pero la correlación entre los dos métodos es muy buena ($R_2 = 0.92$ para el CO_2). El método con menos restricciones logísticas es el de la cámara flotante que está acoplado a un instrumento automatizado. Este método permite el muestreo de aproximadamente 5 veces más sitios en la misma cantidad de tiempo que el método con el análisis de laboratorio. Por ello, la cámara flotante acoplado a un instrumento automatizado se ha mantenido como el método de elección por Hydro-Quebec.

2.2 Marco Teórico

Calentamiento Global y Gases de efecto invernadero (GEI). Con base a reportes realizados en el 2013 por el Panel Intergubernamental de expertos del Cambio Climático; (IPCC, por sus siglas en inglés); en los últimos cien años el mundo se ha calentado aproximadamente $0,75 \text{ }^\circ\text{C}$. Durante los últimos 25 años el proceso se ha acelerado, y ahora se cifra en $0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ por década. Lo que está asociado a un calentamiento global, refiriéndose al inusualmente rápido aumento de la temperatura media de la superficie de la Tierra (Riebeek, 2010); dichos cambios de temperatura están directamente relacionadas al incremento de las concentraciones en la atmósfera de diferentes gases de efecto invernadero (GEI), entiéndase por efecto invernadero a un mecanismo por medio del cual la atmósfera de la Tierra se calienta, y es un proceso que ha existido desde que la Tierra tiene atmósfera (hace unos 4,000 millones de años) (Caballero et al. 2007). No obstante, durante

ya varias décadas estudios han reportado alteración de este mecanismo debido a la permanente emisión de GEI de origen natural y antrópico. Para el año de 1997, mediante el desarrollo del protocolo de Kyoto se establecen como importantes GEI el dióxido de Carbono (CO_2), metano (CH_4); óxido nítrico (NO_2); hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6); los cuales tienen diferente contribución al cambio climático en función de su concentración en la atmosfera y su potencial de calentamiento global (Ledezma & Caballero, 2013).

Los gases de efecto invernadero de larga vida (GEILV), por ejemplo, el CO_2 , el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), son químicamente estables y persisten en la atmósfera durante escalas de tiempo desde décadas hasta siglos o más, de modo que sus emisiones ejercen su influencia en el clima a largo plazo. Las concentraciones actuales de CO_2 y CH_4 atmosféricas sobrepasan los valores preindustriales hallados en los registros de testigos de hielo polar de composición atmosférica de hace 650.000 años; Debido a su larga vida, estos gases se mezclan bien en la atmósfera, mucho más rápido de lo que se eliminan. (Solomon et al, 2007). Cada uno de los GEI afecta a la atmósfera en distinto grado y permanece allí durante un periodo de tiempo diferente. La medida en la que un GEI determinado contribuye al calentamiento global se define como su Potencial de Calentamiento Global (PCG); para hacer comparables los efectos de los diferentes gases, el PCG expresa el potencial de calentamiento de un determinado gas en comparación con el que posee el mismo volumen de CO_2 durante el mismo periodo de tiempo, por lo que el PCG del CO_2 es siempre 1. En la tabla siguiente, se puede consultar el Potencial de Calentamiento Global de los principales gases de efecto invernadero, calculado para un horizonte temporal de 20 y 100 años.

Tabla 1. Potencial de Calentamiento Global de principales GEI, para un horizonte temporal de 20 y 100 años

GEI	PCG		Vida media en años
	20 años	100 años	
CH ₄	86	34	12.4
HFC ^{-134^a}	3790	1550	13.4
CFC ⁻¹²	7020	5350	45
N ₂ O	268	298	121
CF ₄	7350	5400	50000

Fuente: IPCC, 2013

Dióxido de Carbono (CO₂); Metano (CH₄) en lagos. Las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera han aumentado de ~280 ppm después de la revolución industrial a 384 ppm en 2008. (Battin et al. 2009). Existe evidencia que a través de la quema de combustibles fósiles y otras actividades, los humanos han alterado el ciclo global del carbono produciendo condiciones que nunca se habían evidenciado durante los últimos millones de años en la historia de la tierra. (Schlesinger, W. H. 1997). Estudios recientes a nivel mundial han demostrado que existe una sobresaturación de CO₂ en cuerpos de agua dulce y en contraste con sumideros de CO₂ terrestre, estos ecosistemas acuáticos suelen actuar como fuentes de CO₂ a la atmósfera. Esta sobresaturación ha sido relacionada con el transporte de carbono orgánico terrestre a ambientes acuáticos. (Bellido et al., 2009; Algesten et al., 2004; Cole et al., 1994); actuando como una importante fuente de CO₂. A pesar de que se ha mostrado que los lagos funcionan como sumideros importantes de carbono (Dean and Gorham, 1998; Einsele et al., 2001; Mulholland and Elwood, 1982; Stallard, 1998); muchos reportes sobre el intercambio de carbón gaseoso a través de la interface agua-aire demuestran que los lagos están sobresaturados de CO₂ y CH₄ causando una liberación de los mismos a la atmósfera (Cole et al. 1994; Rantakari and Kortelainen, 2005; Yang H. et al., 2008).

El CO₂ en lagos es originado por la respiración a lo largo de la columna de agua y sedimentos; entradas de carbono inorgánico terrestre disuelto proveniente de cuencas circundantes y foto-oxidación de carbono orgánico disuelto (Sepúlveda A. et al., 2015). Globalmente, lagos (con áreas de $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$) podrían contribuir CO₂ a la atmosfera cerca de $0.14 \cdot 10^{15} \text{ g}$ de carbón por año (Cole et al. 1994). Por otro lado, los sedimentos lacustres, son focos importantes de CH₄, representando el 16.6 % de las emisiones naturales de metano, apreciación que indica la importancia de incluir las emisiones de estos ecosistemas dentro de los reportes globales de metano (Bastviken & Cole. 2004). Bartlett et al., (1988) evidencia que el mayor parte del metano emitido por un ecosistema de lagos está asociada a la producción de metano en condiciones anóxicas (sedimentos); la estimación de las emisiones en ecosistemas de lagos suele ser un poco tediosa, ya que se consideran cuatro principales vías de emisión dentro de estos ecosistemas; como fluxes ebullitivos, fluxes difusivos, almacenamiento de flux y fluxes por la vegetación acuática.

Estos ecosistemas están sujetos a aportes alóctonos y autóctonos de materia orgánica (MO); esta MO que se deposita en los sedimentos está sujeta a complejos ciclos en los que compuestos de alto peso molecular se metabolizan en otros de menor peso molecular. Al final de esa cadena degradativa, y si las condiciones son estrictamente anaerobias, arqueas metanogénicas producen CH₄ y CO₂. Estos gases migran a través de la columna de agua hasta llegar a la zona óxica, donde el CH₄ es parcialmente oxidado por bacterias metanotróficas (Madigan, et al., 2003). También existen organismos capaces de oxidar al CH₄ en condiciones anaerobias, en presencia de otros aceptores de electrones como, nitratos, nitritos o sulfatos (Thauer, et al., 2008).

Existen dos procesos básicos para la síntesis biológica del metano: fermentación y respiración. En la fermentación, el acetato disponible para los metanógenos es catabolizado anaeróbicamente, sirviendo al mismo tiempo como donador y como aceptor de electrones. El Adenosín Trifosfato (ATP) se produce por fosforilación a nivel de sustrato. En la respiración este proceso se lleva a cabo de manera sintrófica con bacterias fermentativas, usando como sustratos hidrógeno (H_2) y CO_2 . El H_2 es el donador de electrones, mientras que el CO_2 es el aceptor (Hoyos, 2008).

El metano producido es consumido por microorganismos aerobios (metanotrofos), liberando CO_2 y H_2O . Se ha reportado oxidación anaerobia de metano. En el caso de lagos, este proceso es dependiente de nitratos/nitritos, mientras que en el caso de ecosistemas marinos está acoplada a sulfato-reducción, o es dependiente de hierro/manganeso (Borrel, *et al.*, 2011). El metano que no alcanza a ser oxidado tras su paso desde los sedimentos a través de la columna de agua, es emitido a la atmosfera ya sea por ebullición o difusión; se estima que estas burbujas (ebullición) contienen entre 46-95 % de CH_4 ; 3-50% de N_2 , y pequeñas trazas de CO_2 y H_2 . Estas burbujas de gas se producen cuando la suma de las presiones parciales de los gases disueltos excede la presión atmosférica más la presión hidrostática del agua suprayacente (Fendinger et al. 1990).

El crecimiento de organismos metanotrofos se da en ambientes con disponibilidad de CH_4 y O_2 ; al contrario del metano el O_2 proviene de las capas superficiales de la columna de agua, la presencia de este gas es primordial para el metabolismo de todos los organismos aerobios presentes en el ecosistema acuático. La distribución del oxígeno en cuerpos de agua está determinada por el intercambio gaseoso a través de la superficie del agua, la producción fotosintética, el consumo respiratorio y por procesos físicos de advección (movimiento horizontal del aire causando

principalmente por variaciones de la presión atmosférica cerca de la superficie). Por ende factores como el clima, altura, presión y temperatura entran a jugar un papel importante sobre el oxígeno disuelto (Wetzel, 2001). Es importante tener en cuenta que la distribución de O₂ en la columna de agua está relacionada también con la estratificación y el estado trófico del cuerpo de agua.

Tecnología OA-ICOS. Una amplia gama de métodos a escala de laboratorio y en campo se han venido aplicando con el objeto de medir gases de diferente índole, incluyendo métodos de cromatografía de gases para la absorción ultravioleta, para el seguimiento de los cambios de color en las tiras de papel tratados químicamente, he incluso incluyendo la medición de la quimioluminiscencia (Baer et al., 2012); uso de espectrometría de masa (Schlüter, M. & Gentz, T. 2008), todos los anteriores con ciertas limitaciones de sensibilidad, precisión, velocidad, linealidad, tamaño, rango dinámico, resistencia e incluso portabilidad. Actual y afortunadamente, una novedosa tecnología que supera todas estas limitaciones está siendo utilizada para la medición de gases de interés, la plataforma tecnológica OA-ICOS obedece a las necesidades de mediciones prolongadas y con sensibilidad de hasta partes por mil millones.

La técnica de espectroscopia de cavidad ringdown (CDRS) fue la primera técnica que supera estas limitaciones (Figura 1), comprendida por una célula limitada por dos espejos en cada extremo altamente reflectantes con error típico de 99.99%. Un rayo láser resonante esta acoplado dentro de la célula, este rebota hacia atrás y hacia adelante entre los espejos, posteriormente el rayo es abruptamente desactivado, el tiempo de desactivación del rayo de luz dentro de la cavidad (llamado tiempo ringdown) es medido y usado para determinar la concentración del gas dentro de la célula.

No obstante, Esta técnica novedosa y pionera tiene sus limitaciones debidas a las variaciones de la longitud de onda ya que requiere de precisión optomecánica, subnanometrica y de estabilidad.

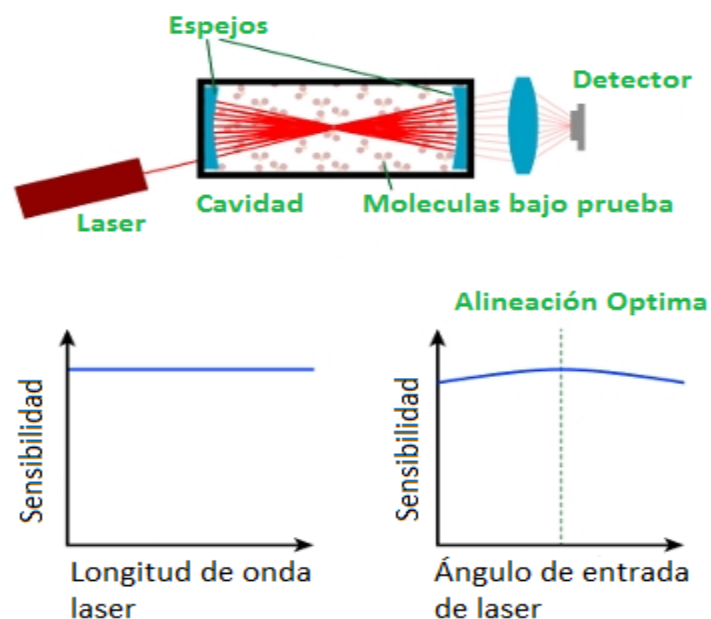
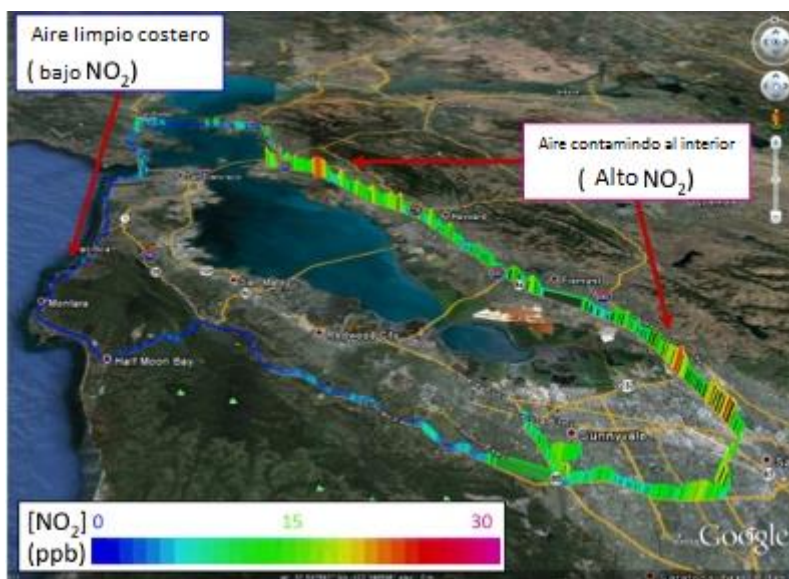


Figura 1. Espectroscopia de cavidad ringdown (CDRS)

Fuente: Baer et al., 2012

En OA-ICOS, el rayo láser ingresa en la cavidad óptica a un ángulo fuera del eje. Descartando limitaciones dándole extrema estabilidad de alineación y obstrucción de longitud de onda con alta resolución al permitir mediciones de absorción directa con longitudes de trayectoria óptica de miles de metros.

OA-ICOS desarrollado inicialmente por científicos de la Universidad de Harvard Cambridge MA, creado con el fin de superar estas limitaciones manteniendo aun la alta sensibilidad y precisión. OA-ICOS utiliza el haz de laser fuera del eje, y una alineación no ruidosa del mismo a la cavidad (Figura 1), dicha alineación no es fácil de lograr, por lo que OA-ICOS es de fabricación de un orden de magnitud más firme y con menor sensibilidad a cambios por temperatura y movimientos bruscos. Estos instrumentos son relativamente de simple fabricación y de bajo costo combinando las ventajas de CRDS junto con espectroscopia de absorción laser tradicional con alta resolución al permitir mediciones de absorción directa con longitudes de trayectoria óptica de miles de metros.



Registro de concentraciones de NO_2 alrededor de la bahía de San Francisco durante un periodo de 4 h, utilizando LGR transportado por un vehículo a velocidad de 55 mph. Reportando altos niveles de concentración en los lugares donde el flujo vehicular era alto.

Los analizadores OA-ICOS son muy prácticos cuando de mediciones móviles se trata, en la figura anterior se puede evidenciar un claro ejemplo de un estudio reciente sobre las emisiones de NO_2 alrededor de la bahía de San Francisco utilizando un analizador LGR (Mountain View, CA), transportado por coche con velocidades de hasta 55 mph, con un tiempo de recorrido de 4 h.

Resumiendo, la técnica se basa en dirigir el rayo láser fuera del eje con respecto a la cavidad y en efecto, espacialmente separar las múltiples reflexiones dentro de la cavidad hasta que la luz reconstruya su recorrido dentro de la misma, cuya condición es dada por la geometría de la cavidad.

2.3 Marco Legal

En los Estados Unidos Mexicanos, el marco jurídico ambiental encuentra sus bases en la Constitución Política de la cual se derivan el cuerpo normativo del país. En materia de calidad del aire, la Secretaría de Salud junto con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, han planteado diferentes Normas Oficiales Mexicanas NOMs direccionadas a la integridad de la salud de la población y a la medición de gases contaminantes. Para la determinación de este último, el SEMARNAT; ha establecido métodos de referencia para medir la concentración de contaminantes criterio en el aire; asimismo, en conjunto de otras dependencias especifican las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistema de monitoreo de la calidad del aire y de muestreo de contaminantes atmosféricos: Proyecto Norma Oficial Mexicana PROY- NOM- 156- SEMARNAT -2008.

Para el mes de julio del año 2012, se publica la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que entra en vigor en octubre de este año. En dicha Ley se establece la creación de instrumentos

de política pública como el Registro Nacional de Emisiones (RENE), quien manejará la información en materia de emisión de compuestos y GEI, atendiendo la necesidad de establecer metodologías y criterios que apoyen a la caracterización del inventario nacional.

La descripción de estas normas se articula al presente trabajo, con base al uso de instrumentos de medición confiables, como medio técnico con los que se efectúan las mediciones de concentración de gases de interés.

2.4 Marco Contextual

Sitios de Estudio. Con el objeto de poder evaluar y poner a prueba el funcionamiento del método DC-ICOS se tuvieron en cuenta dos ecosistemas de lago con características contrastantes, ubicados a la periferia del estado de México, cuerpos de agua dulce que han sido estudiados previamente. Para dicha selección, se tuvieron en cuenta aspectos como (i) Índice de Estado trófico; (ii) Índice de Calidad de Agua. Los lagos objeto de estudio fueron:

Lago Guadalupe (LG). Construido en 1943 como sistema de riego y control de inundaciones, localizado en el área metropolitana de la Ciudad de México, en el municipio de Cuautitlán Izcalli, a 2320 m.s.n.m a 25 Km al noroeste del centro de México con localización en 19° 37' 54.73" N y 99° 15' 27.98" O (Sepulveda Jauregui. *et al.*, 2013). Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura anual oscila entre 27.8 y 5 °C, con una media de 16 °C. El lago tiene un área superficial de 450 Ha, una profundidad media de 13.3 m y una profundidad máxima de 20 m (al final de la temporada de lluvia) (Tabla 2). De acuerdo con los criterios de la Comisión

Internacional de grandes Presas (ICOLD), LG es considerado una gran presa y según a los criterios de clasificación de Hutchinson, LG es un lago artificial de tipo "73". Con base, en el modelo longitudinal de Thornton et al. (1990), LG está constituida en tres zonas distintas, es decir, fluvial, transicional y lacustre, las cuales son morfológicamente distintas en cuanto a profundidad y proximidad a la presa; esta tiene forma irregular y su eje principal va desde el suroeste al noroeste siguiendo el flujo de agua desde la zona fluvial a la zona lacustre donde se localiza la presa. LG recibe descargas de aguas residuales sin tratar en la zona occidental de tres ríos (*Cuautitlán Izcalli, Vista Hermosa, San Pedro y Cuautitlán*) (Figura 2).

Debido al constante vertimiento a este ecosistema acuático, en 2013 fue categorizado según Sepulveda Jauregui *et al*, como un ecosistema hipereutrófico, con condiciones anóxicas en la mayor parte de la columna de agua, con grado de mezcla monomítico. En distintas ocasiones se ha cuantificado la emisión de metano, por lo que se ha clasificado en un reservorio de alta emisión. (Magaña F. 2013). Este ecosistema es habitado con más de 150 especies de aves endémicas y migratorias, como *Pelecanus erythrorhynchos, Anas platyrhyncho, Anas diazi and Aythya affinis*.



Figura 2. Lago Guadalupe

Fuente: <https://www.google.com.co/maps/@19.626195999,2667248,4243m/data=!3m1!1e3?hl=es,->

ps/@19.626195999,2667248,4243m/data=!3m1!1e3?hl=es,-

R₁ "Cuautitlán Izcalli"; R₂ "Vista Hermosa"; R₃ "San Pedro"; R₄ "Cuautitlán" 19.630 (latitud), -99.260 (longitud)- R entradas y salidas de agua

Presa del Llano; (PL). La PL en una presa artificial localizada a 70 km al noroeste de la ciudad de México, en el municipio de Villa del Carbón (19° 39' 24.97" N y 99° 30' 26.24" W), sobre la Cuenca de México, en un área de protección, a una altura de 2840 m.s.n.m; con profundidad máxima de 14 m y un área de 5.69 Ha. (Tabla 2).

Por su cercanía geográfica con el LG, existe semejanza entre las condiciones macroclimáticas a las que se encuentran sujetos ambos cuerpos de agua. PL cuenta con una zona boscosa y rodeada de ríos y abundante vegetación y bosques alpinos, tiende a tener una temperatura fría-templada en la mayor parte del año. En la temporada de invierno la temperatura suele ser muy baja y en la primavera templada; esta presa artificial funciona como fuente abastecedora de agua de los pueblos

vecinos, en la cual utilizan el recurso para irrigación principalmente; además de abastecer de agua, la presa cuenta con criaderos de peces tales como trucha arcoíris. Este ecosistema se caracteriza por tener bajos niveles de contaminación y bajas emisiones de GEI (Hoyos Santillán J. 2008). Según Sepulveda (2013), PL es un cuerpo de agua mesotrófico con altas concentraciones de oxígeno disuelto a lo largo de la columna de agua de perfil clinogrado; asimismo, se caracterizó como un ecosistema con régimen de mezclado momictico.

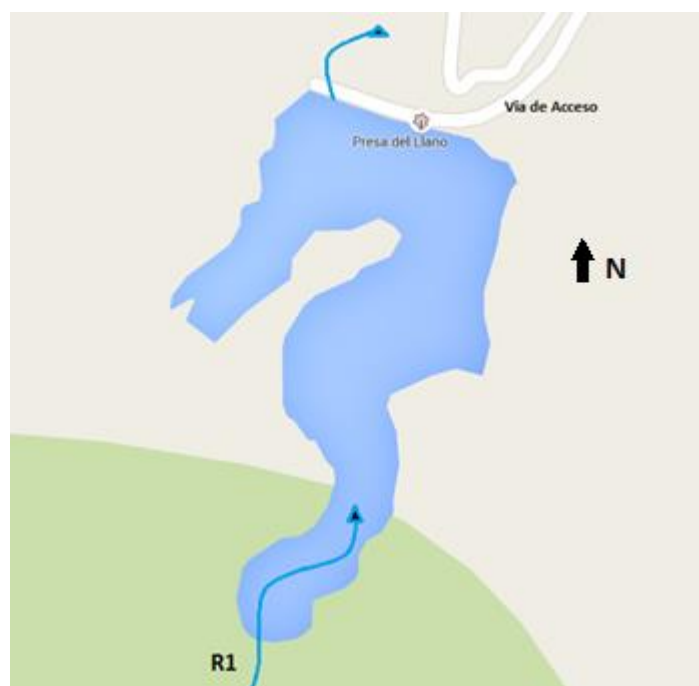


Figura 3. Lago Presa del Llano (PL)

Fuente: <https://www.google.com.co/maps/@19.657555799.506215,1179m/data=!3m1!1e3?hl=es,->

R_1 "entrada de agua"

Tabla 2. Parámetros morfométricos de los reservorios. (LG) indica Lago de Guadalupe y PL indicando parámetros del Lago Presa del Llano

Parámetro		LG	PL
Altitud	(m.s.n.m)	2320	2840
Dirección del eje mayor		SW-NE	SSW-NNE
Profundidad Máxima	(m)	17	14
Máxima longitud	(m)	3858	447
Ancho Máximo;	(m)	2522	209
Longitud orilla;	(m)	31574	1660
Área;	(Ha)	450	5.69
Volumen;	(Hm ³)	60	0.54
Profundidad media;	(m)	13.3	9.49
Profundidad relativa;	%	0.71	5.20

Fuente: SEPULVEDA JAUREGUI, A. CIVESTAV. *The impact of anthropogenic pollution on limnological characteristics of a subtropical highland reservoir "Lago de Guadalupe", Mexico*, (2013).

3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

Teniendo en cuenta el propósito de este trabajo, se considera que es de tipo *aplicado*; ya que se tomaron teorías generales ya establecidas y se llevaron a la práctica con el objeto de resolver la necesidad de un nuevo método que busca la medición, cuantificación y detección de las emisiones de GEI a las que esta sujetas un lago. *Exploratorio*, ya que el objeto principal de este estudio era establecer y estandarizar la técnica de DC usando la novedosa plataforma tecnológica OA-ICOS; técnica que no había sido abordada usando dicha tecnología. *Descriptivo*, debido a que la toma de fluxes (difusivos- ebullitivos) fueron medidos *in situ*, posteriormente, organización de datos, seguido de un análisis e interpretación de los mismos y finalmente presentación de resultados. Tipo *experimental*, ya que se realizaron pruebas dentro del laboratorio y toma de datos en campo, las cuales van direccionadas a la comprobación de hipótesis, además de conocer y controlar variables relacionadas con la técnica, lo que permitirá dar una explicación del funcionamiento de la misma.

3.2 Población y Muestra

Con base, en lo establecido dentro de los objetivos de este trabajo, la población y muestra está relacionada a los ecosistemas de lagos mexicanos (Lagos Guadalupe; Lago Presa del Llano), ecosistemas con características contrastantes, fácil acceso y sujetos a presiones demográficas, ambos asentados sobre la gran cuenca del Valle de México; los cuales fueron tenidos en cuenta para la puesta a prueba del método DC-ICOS.

3.3 Fases o Etapas

3.3.1 Revisión bibliográfica. Con el objeto de documentar y establecer las bases teóricas del presente trabajo se hace necesario realizar una previa revisión del estado del arte con el objeto de poder determinar que métodos y estrategias iban a permitir el desarrollo de cada objetivo propuesto; no obstante, durante toda la ejecución del trabajo, se realizó una contante revisión de estudios publicados que describen técnicas de medición de GEI en ecosistemas con características similares y fundamenten el uso de la plataforma tecnológica.

3.3.2 Etapa Experimental (*Estandarización del método*). En las instalaciones del laboratorio de Bioprocesos Ambientales del CINVESTAV, se desarrolló esta fase con el objeto de evaluar y poner a prueba la técnica de DC con el uso de la plataforma tecnológica OA-ICOS, técnica que posteriormente fue puesta a prueba en campo, para evaluar su funcionamiento en condiciones reales.

3.3.2.1 Adecuación del prototipo DC-ICOS.

➤ *Diseño Cámara Dinámica*. Adoptando características y especificidades dadas por (Rolston 1986; Aneja et al., 2000; Rochette & Eriksen. 2008; Gonzales Valencia 2013) se buscaba diseñar una cámara de bajo costo y de fácil manejo que permitiera la captura de gases emitidos por un ecosistema acuático.

Para el diseño de la cámara se tuvieron en cuenta aspectos como:

Altura. Está directamente relacionada con el volumen de la cámara, se pretendía que esta variable no fuera muy alta, ya que puede provocar altas diluciones de los gases objeto de estudio dificultando su medición y aumentando el tiempo de residencia del gas; si por el contrario esta es muy baja, las condiciones ambientales como la temperatura, humedad, y concentración del gas pueden ser afectadas; para evitar estos inconvenientes, Rochette & Eriksen 2008 recomiendan altura ≥ 10 cm; ≤ 40 cm.

Sistema de entradas y salidas de flujos. Buscando que la cámara cumpliera las especificidades de un sistema de flujo continuo esta debía estar comprendida por una entrada de flujo constante, para este caso N₂ comprimido libre de metano y dióxido de carbono (gases objeto de estudio); adicionalmente, una salida que comunica al detector LGR y una salida extra a la atmosfera con el fin de evitar la disminución del espacio de cabeza por saturación de gases. Con este sistema de entradas y salidas se pretendía que las condiciones internas (presión- temperatura) de la cámara no se fueran a alterar.

Área de muestreo. Es el área que recibe los gases objeto de estudio (CH₄; CO₂); está directamente relacionada con el perímetro de la cámara y se recomienda que esta área fuese superior a los 0.008 m², que corresponden a un diámetro de la cámara de aproximadamente 0.1 m (Gonzales Valencia 2010). Debido a la proporcionalidad de estos ecosistemas es difícil considerar grandes áreas, lo que se recomienda tomar un número de puntos representativos.

Profundidad de inserción. Por efectos de oleaje provocado por movimientos de la lancha u otros factores, era recomendable que dicha cámara fuese sumergida entre 4 a 12 cm de la altura de la misma.

Mezclado. Es recomendable que en el interior de la cámara se instale un pequeño ventilador de teflón, con el fin de que los gases dentro de la cámara sean idealmente mezclados.

Aislamiento. Existe la posibilidad de que la temperatura en el interior de la cámara varíe en función a la temperatura del medio ambiente y del agua, por lo que es importante tener en cuenta estos cambios, ya que pueden modificar el comportamiento de los gases dentro de la cámara.

Presión. El aumento de temperatura dentro del espacio de cabeza es una de las razones por las cuales se puede modificar la presión, sin embargo, si al pintar la superficie de la cámara con esmalte reflejante, la temperatura deja de ser una razón de variación de la presión; otra de las razones por las cuales se puede ver afectada la presión dentro del sistema es en el momento de poner la cámara sobre la superficie del agua, como habíamos mencionado antes el sistema de entrada y salida de la cámara cuenta con un agujero extra lo que permitirá regular la presión entre el espacio de cabeza y la atmosfera. Johansson y Granat (1984) realizaron una investigación sobre las diferencias de presión entre el medio exterior y el espacio de cabeza de un sistema de DC, utilizando un manómetro de agua inclinada, indicando una diferencia de presión por debajo de los límites detectables (0.2 mm H₂O).

➤ *Analizador de CH₄ y CO₂*. Existe la disponibilidad de un analizador OA-ICOS ultra-portátil de GEI (UGGA, modelo 915-0011, los Gatos Research Inc., E.U.A.) que permite detectar y cuantificar gas metano, dióxido de carbono y vapor de agua. Este prototipo está protegido por una caja a prueba de golpes; tiene un peso aproximado de 15 kg y es alimentado por una batería de (70 W), el analizador cuenta con una bomba de vacío interna para el muestreo del gas, este equipo es operado de forma remota mediante una Tablet. Para el funcionamiento en campo, el equipo puede ser suministrado de energía a través de una batería (intervalo de 10-30 Voltios de corriente continua) mediante un cable de alimentación.

3.3.2.2 *Medición de flujos de entrada y salida de la DC.* Con el fin de regular los flujos de entrada y salida de la cámara, se realizaron pruebas volumétricas basadas en la determinación del volumen desalojado de un vial con respecto al tiempo; estas pruebas consistían en llenar una tina con agua y dentro de esta introducir un vial completamente lleno del mismo líquido, con cronometro en mano se inicia el conteo por 30 s, al iniciar el conteo simultáneamente, se introduce la manguera conectada al flujo que deseábamos conocer y esta se retiraba del vial al terminar los 30 s, el volumen residual dentro del vial se llevaba a una probeta de un l l previamente calibrada para ser medido; posteriormente, se determina el volumen real expresado en litros, obtenido por la diferencia entre el volumen total del vial y el volumen residual y este era dividido por el tiempo expresado en min, lo que finalmente permitía hallar el flujo de interés en ($l\ m^{-1}$).

Como punto inicial determinamos el flujo de salida de la cámara, el mismo que es absorbido por la bomba interna de LGR lo que nos permitiría conocer el flujo de absorción del equipo detector. Para la determinación de dicho flujo se desarrollaron tres pruebas bajo diferentes

condiciones, con el fin de comparar los resultados y verificar que el flujo absorbido por el equipo varíe muy poco; (i) como primera prueba se instaló el sistema a utilizar en este trabajo, inyectando a una presión de 50 psi diferentes flujos de N_2 a la cámara, esta última fue sellada con papel envoplast y masking evitando el contacto entre el espacio de cabeza y la atmósfera; (ii) La segunda solo era encender el UGGA y justo en la salida del equipo conectábamos una manguera y se mide Q_{LGR} mediante las pruebas volumétricas descritas en el párrafo anterior; (iii) consistía en inyectar directamente diferentes flujos N_2 al ducto de absorción del UGGA a una presión de 10 psi. (Cada prueba fue realizada por triplicado)

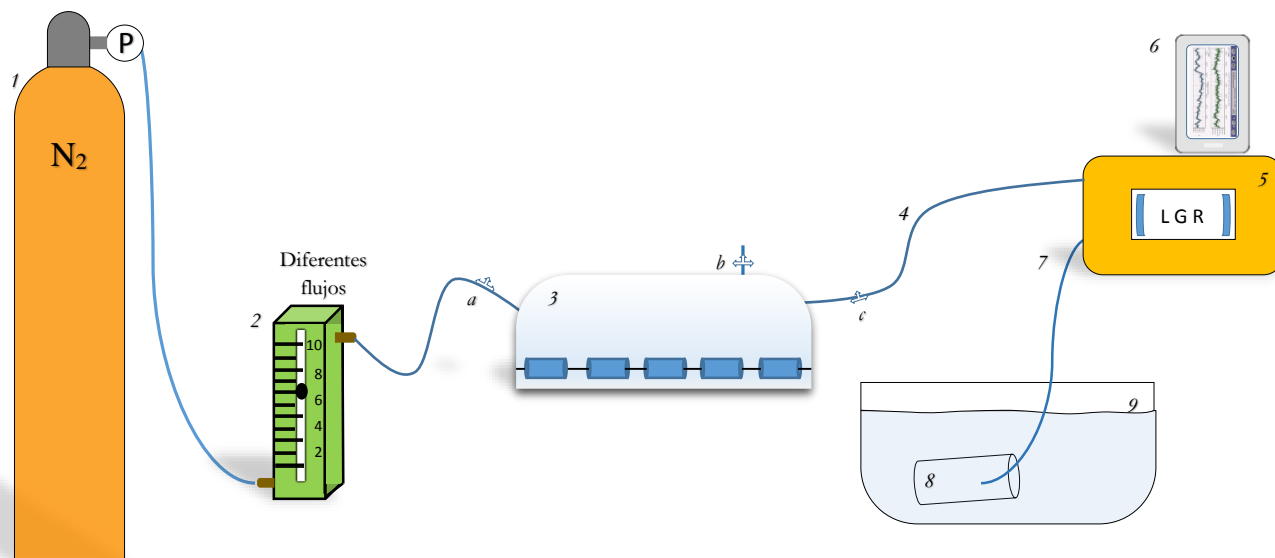


Figura 4. Bosquejo general de pruebas volumétricas para la determinación de flujos

1. Tanque de gas N_2 ; 2. Controlador de flujo (rotámetro); 3. DC; 4. Conducto de flujo a LGR; 5. UGGA; 6. Controlador remoto; 7. Waste salida de flujo de LGR; 8. Vial 600 ml; 9. Tina de agua; a, b, c válvulas de tres vías

Una vez conocido el flujo de absorción por la bomba de vacío de LGR, se determina Q_0 , teniendo en cuenta que fuera mayor al absorbido por el detector, con el fin de evitar pérdidas de

volumen de la cámara y alterar las condiciones de presión del sistema. Finalmente, por diferencia entre el flujo de N₂ y el absorbido por LGR podemos conocer el flujo de salida extra Q_e.

3.3.2.3 Modelización de tiempo de respuesta. Este método DC-ICOS, está sujeto a un retraso (tr), refiriéndose al tiempo que tarda en llegar la muestra del gas en cuestión desde el espacio de cabeza al equipo detector; para su cálculo, se instaló el sistema de DC-ICOS, aislando con varias capas de emboplast y masking el espacio de cabeza de la cámara con la atmosfera; una vez instalado el sistema y encendido el UGGA, en la válvula de tres vías que conecta la cámara con el flujo de entrada de N₂, inyectábamos con una jeringa volúmenes conocidos de metano (5-3-1 ml) al 99% (triplicado), a un flujo constante de N₂ (7.8347 l min⁻¹), cuya respuesta es de tipo pico; con los registros de concentración obtenidos se utilizó un modelo de tiempo de residencia aplicando la ecuación (E.1) de un sistema tipo CSTR (Ordaz et al. 2011). Cabe mencionar que dicho retraso está comprendido por el tiempo de respuesta propio del equipo (tr') que corresponde al tiempo que se requiere para que el UGGA alcance lecturas de estado estable; asimismo, el tiempo de transporte (t_t), refiriéndose al tiempo de recorrido desde la salida de cámara hasta el detector.

$$C = C_i + \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_r}\right)\right] * (C_f - C_i) \quad \text{E.1}$$

Donde C es la concentración medida del gas expresada en (ppm), C_i es la concentración inicial dentro del espacio de cabeza en (ppm); C_f concentración final dentro del espacio de cabeza (ppm); t tiempo de medición; t_r es el tiempo de residencia (tomado como el valor optimo entre las concentraciones calculado mediante la herramienta Solver) .

3.3.2.4 Simulación de fluxes

➤ Difusivos.

Habiendo equilibrado y determinado los flujos de entrada y salida de la DC, y con el objeto de medir fluxes difusivos, se simuló un ecosistema acuático, mediante el uso de una tina llena con agua; posteriormente, el agua fue burbujeadada con gas presurizado de metano al 99 %; al extremo de la manguera se le instaló un difusor que permitiera un mejor mezclado gas-liquido, el agua fue burbujeadada por un periodo de 5 min ver figura 4. Una vez realizado lo anterior, se instala el sistema de DC- ICOS, y se coloca la cámara en la superficie del agua. Las lecturas de fluxes difusivos fueron tenidas en cuenta después de que estas alcancen un nivel de lectura estable calculado mediante el uso del modelo MOD-TR.

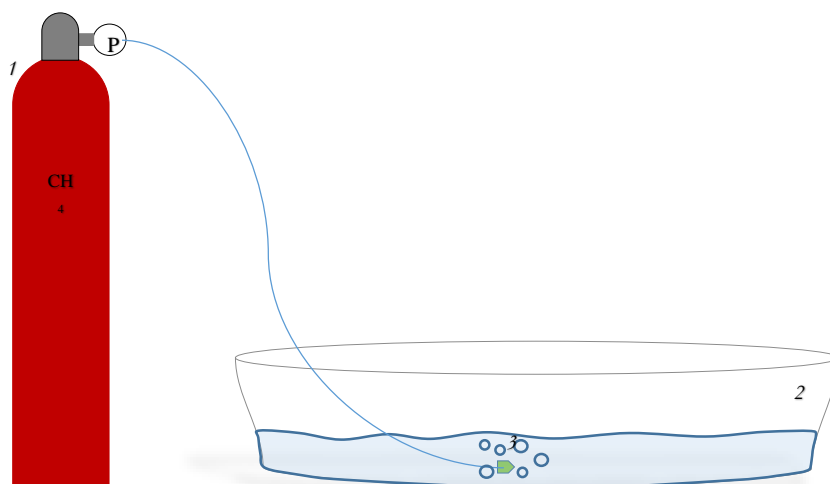


Figura 5. Simulación ecosistema acuático para la medición de flujos difusivos.

1. Tanque CH₄ al 99 %. 2. Tina con agua; 3. Difusor

➤ **Ebullitivos**

Teniendo instalado el sistema descrito en el punto anterior; para la medición de fluxes ebullitivos, se inyectan dentro de la tina con una jeringa diferentes volúmenes conocidos (1- 3- 5) ml de CH₄ al 99 %, asegurando que estos fueran atrapados por el área que cubre la cámara (figura 6), estos eran inyectados a una velocidad constante y con un periodo de tiempo entre inyecciones con base a lecturas estables. Con estas inyecciones, se esperaba una respuesta tipo pico del UGGA con base a lecturas estables. Con estas inyecciones, se esperaba una respuesta tipo pico del UGGA semejante al de un cromatógrafo de gases.

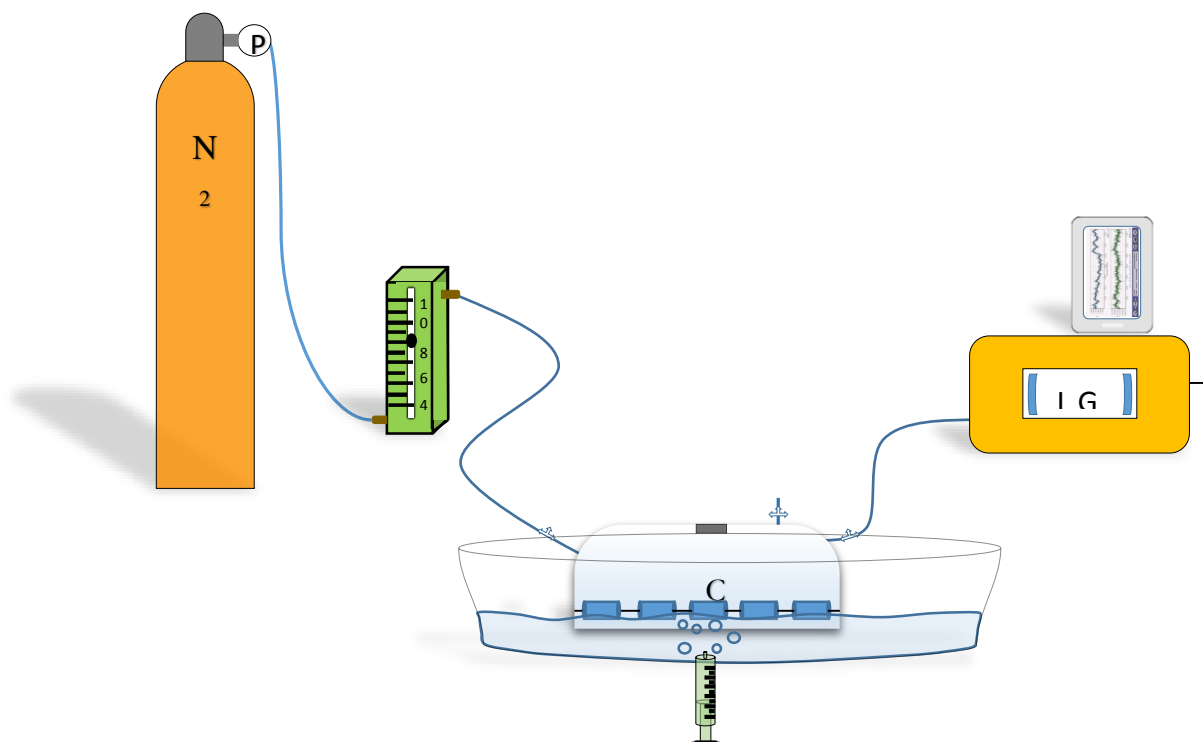


Figura 6. Simulación de fluxes ebullitivos de metano de un ecosistema acuático

Con flujo de entrada de 7.8347 l m^{-1} , inyecciones por triplicado de CH₄ de (1; 3; 5) ml.

3.3.2.5 Determinación de Fluxes instantáneos. Con las pruebas descritas anteriormente se buscaba la determinación de fluxes instantáneos que representaran ebullición y difusión, para

su cálculo, se hizo uso de un modelo MOD-DC creado en Microsoft Office Excel 2015 con el apoyo del Doc. Thalasso al que se le incorporaron las ecuaciones descritas a continuación

Los fluxes fueron determinados mediante balance de masa E.7, de acuerdo a diagrama y teniendo en cuenta corrección de tiempo de respuesta.

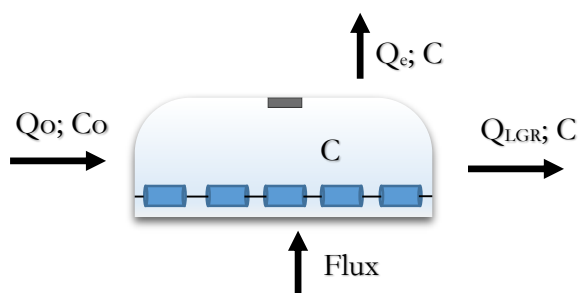


Figura 7. Sistema de entradas y salidas en cámara.

Q_o entrada de flujo continuo de N_2 (m^3h^{-1}); C_o concentración de flujo de entrada; C concentración en cámara (gm^3); $Flux$ ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$); Q_e flujo de salida extra; Q_{LGR} flujo de salida absorbido por UGGA (m^3h^{-1}).

$$\frac{dC}{dt} = \text{Entrada} - \text{Salida};$$

$$\frac{dC}{dt} = F * \frac{Ac}{Vc} + \frac{Q_o}{Vc} * C_o - \frac{Q_e}{Vc} * C - \frac{Q_{LGR}}{Vc} * C \quad E.2$$

Donde, dC/dt es la tasa de cambio de concentración con respecto al tiempo ($g\ m^{-3}\ s^{-1}$); F flux ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$); Ac área medible (m^2); Vc volumen de la cámara (m^3); Q_o flujo de entrada de N_2 ($m^3\ h^{-1}$); C_o concentración flujo entrada de N_2 ($g\ m^{-3}$); Q_e flujo de salida extra ($m^3\ h^{-1}$); Q_{LGR} flujo absorbido por la bomba interna del LGR; C concentración en el espacio de cabeza ($g\ m^{-3}$)

Factorizando E.1

$$\frac{dC}{dt} = F * \frac{Ac}{Vc} + \frac{Qo}{Vc} * C_o - \frac{Qe+QLGR}{Vc} * C$$

Para $C_0 = 0$; $\frac{Qe + QLGR}{Vc} = Qo$

$$\frac{dC}{dt} = F * \frac{Ac}{Vc} - \frac{Qo}{Vc} * C_o$$

Despejando F;

$$F = \left(\frac{dC}{dt} + \frac{Qo}{Vc} * C_o \right) * \frac{Vc}{Ac} \quad E.3$$

Esta última ecuación (E.3), representa al flux en función a los cambios de concentración del gas (CH₄; CO₂) con respecto al tiempo dentro de la DC; este balance de masa es considerando que la cámara se encuentra perfectamente mezclada, pero esta, está sujeta a un retraso lo cual debió ser corregido, lo que da lugar a una reconstrucción del flux

$$\frac{dC_m}{dt} = \frac{Qo}{Vc} * C_r - \frac{Qo}{Vc} C_m \quad E.4$$

E.4 Representa la variación de la concentración medida por el equipo en función del tiempo; donde, Cr es la concentración real que existe en la cámara con mezcla perfecta, lo que representa en la ecuación E.2 de balance de masa a C (g m⁻³); Cm es la concentración medida por el equipo (g m⁻³).

Donde;

$$C_m = \frac{dC_m}{dt} + C_m$$

Teniendo en cuenta que,

$$Tr = \frac{Vc}{Qo} \quad E.5$$

Donde, Tr es el tiempo de residencia o permanencia expresado en (s).

Reemplazando y Factorizando E.5 en E.4

$$\frac{dC_m}{dt} = \frac{C_r - C_m}{Tr}$$

Despejando Cr;

$$C_r = \frac{dC_m}{dt} * Tr + C_m \quad E.6 \quad \text{Para corregir tiempo de respuesta}$$

Con base a lo anterior, se aplicó el siguiente balance de masa para el cálculo de los fluxes con tiempo de residencia corregido

$$F = \left(\frac{dC_r}{dt} + \frac{Qo}{Vc} * C_r \right) * \frac{Vc}{Ac} \quad E.7$$

3.3.3 Campañas de Campo. Habiendo probado y desarrollado dentro de laboratorio el método DC-ICOS, posteriormente se realizaron pruebas de medición *in situ* en ambos lagos (LG; PL). Previo al desarrollo de estas campañas era necesario la coordinación de una logística, que

permitiera el buen desarrollo de dichas campañas, involucrando permisos institucionales, organización de materiales y descripción de un plan de acción.

Una vez en campo e instalado el sistema de DC-ICOS (Figura 8) y teniendo en cuenta la distribución espacial de las emisiones se realizaron mediciones en diferentes puntos a lo largo y ancho de ambos lagos (*LG, PL*); considerando aspectos como profundidad, entradas de corrientes de agua y descargas (*dilución y aporte de materia orgánica*), puntos altos y bajos de emisión identificados a través de la presencia-ausencia de burbujeo; georeferenciados con un localizador satelital (GPS) Garmin, modelo GPSmap 60CS; con tiempos de medición 15 min.

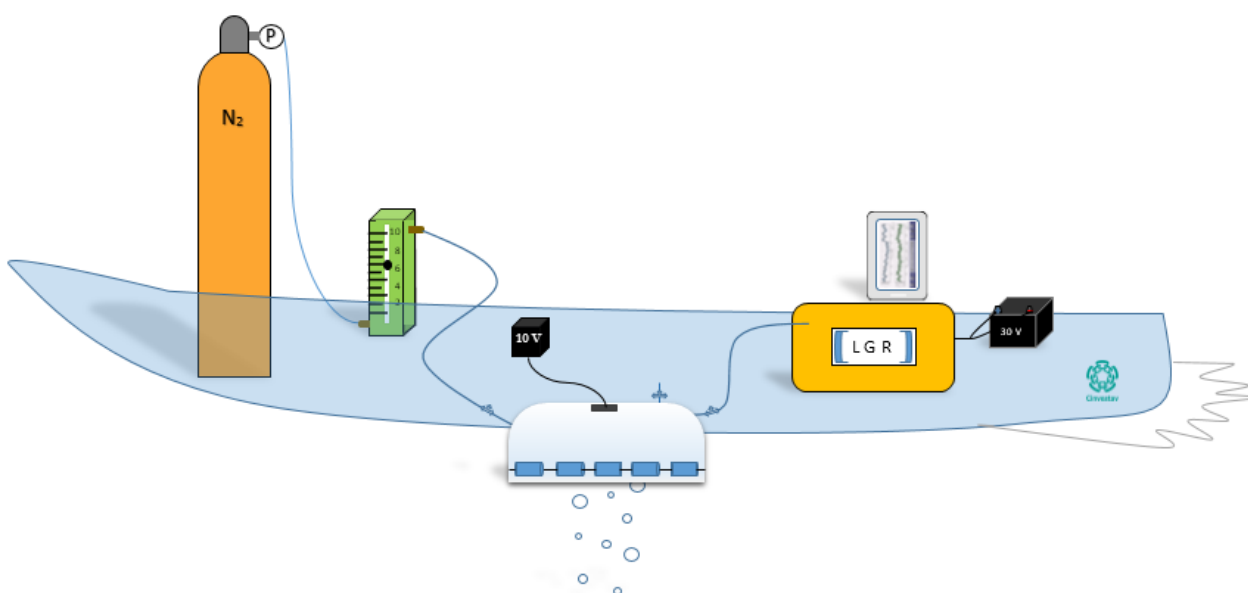


Figura 8. Instalación del sistema DC-ICOS en campo

Con el propósito de verificar el funcionamiento de la técnica DC-ICOS; durante el desarrollo de cada campaña, se realizaron mediciones de las concentraciones de gases objeto de este estudio, mediante la aplicación de la técnica ya estandarizada de SC con uso del detector OA-ICOS por el

equipo de trabajo; es preciso mencionar, que dicha cámara contaba con las mismas dimensiones que el prototipo utilizado para el desarrollo de la primera, no obstante, con algunas modificaciones, como la suspensión de la entrada contante de flujo de N_2 y el taponamiento de la salida extra (Q_e), cumpliendo con las especificidades y características de una SC.

3.3.4 Procesamiento Análisis y Elaboración de reportes. Durante el desarrollo de este trabajo se obtuvieron datos de tipo experimentales y de campo; con los primeros se hicieron simulaciones de fluxes difusivos y ebulitivos junto con las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.2.5, estas se incorporaron dentro de un modelo (MOD-DC) creado en Microsoft Office Excel 2015 con el apoyo del Doc. Thalasso; Asimismo, con las pruebas donde se simularon cambios en la concentración en el espacio de cabeza, se utilizó el modelo de tiempo de residencia (MOD.TR) cuya bondad de ajuste entre los datos experimentales y el modelo se calcularon con R^2 . Para la calibración del controlador de flujo (rotámetro) se determina ecuación de linealidad y R^2 con el fin de obtener valores de volúmenes reales. Con los datos obtenidos en campo se modelan en MOD-DC. Con los datos obtenidos a partir de la aplicación de la técnica SD, estos fueron tratados con el ya diseñado modelo (MOD-SC).

Finalmente, este informe es presentado bajo los lineamientos adoptados por la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente de la Universidad Francisco de Paula Santander- Colombia previo a su aceptación por parte del Doc. Frederic Thalasso y la Dirección de Biotecnología del CINVESTAV – México.

4. Resultados y Análisis.

4.1 Etapa experimental

4.1.1 Adecuación del prototipo DC-ICOS. Adoptando características y especificidades dadas por (Rolston 1986; Aneja et al., 2000; Rochette & Eriksen. 2008; Gonzales Valencia 2013) se diseñó una cámara de bajo costo y de fácil manejo para la captura de gases emitidos por un ecosistema acuático (Figura 9). Para el diseño de la cámara se tuvieron en cuenta características como: dimensiones, presión y temperatura (Tabla 3).

Una de las principales características a tener en cuenta en el momento de diseñar una cámara de este tipo, es la altura y el área de muestro, ya que estas dimensiones están directamente relacionadas con el volumen de la misma. En relación a la primera, se tuvo en cuenta que esta no fuese muy alta, ya que podía provocar altas diluciones de los gases dentro del espacio de cabeza, y también aumentar el tiempo de residencia; asimismo, se tuvo en cuenta que no fuese muy baja ya que las condiciones como temperatura, humedad y concentración de los gases se podrían ver alteradas; con base a las anteriores consideraciones, se adoptó una altura (h_t) de 0.15 m rango recomendado por los mencionados autores. Es importante tener en cuenta que por efectos de oleaje provocados por el viento o por movimientos bruscos de la lancha, la cámara debía ser sumergida (h_s) no menos de 0.04 m para evitar que esta se voltee y se llene de agua, quedando una altura real (h_r) en el espacio de cabeza de 0.11 m; no obstante se le instaló en la parte externa e inferior de la cámara unos flotadores de styrofoam permitiéndole mayor estabilidad y flotabilidad.

En lo referente al área de muestreo asociada al perímetro de la misma y con base a especificaciones descritas en Gonzales Valencia 2010; Rochette & Eriksen 2008 se adoptó un diámetro de 0.37 m, lo que corresponde a un área de 0.1075 m², calculada a partir de la ecuación de área de un círculo; no obstante, debido a que la cámara es sumergida 0.04 m y esta tiene forma de cono truncado, el diámetro útil sería de 0.355 m, lo que correspondería a un área útil de 0.09897 m².

Teniendo en cuenta la forma y dimensiones de la cámara utilizada en este trabajo, se calculó el volumen total (0.01289 m³) y espacio de cabeza (0.009012 m³) mediante la ecuación de volumen de un cono truncado.

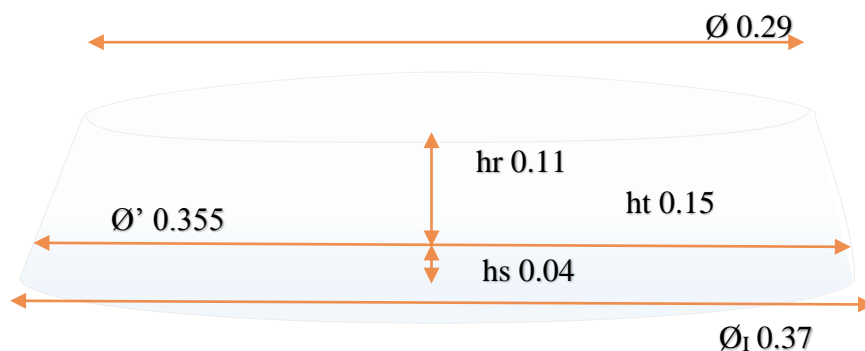


Figura 9. Dimensiones Cámara Dinámica

Ø diámetro cubierta superior; Ø' diámetro útil; Ø₁ diámetro inferior; ht altura total; hr altura útil; hs altura sumergida.

Cumpliendo con las características de una cámara dinámica, se le adecuó un sistema de entrada y de salida comprendido por (i) un agujero para la entrada constante de N₂ comprimido al 99 % libre de metano y dióxido de carbono (*gases objeto de estudio*), controlado por un rotámetro previamente calibrado a través de pruebas volumétricas. (ii) Una salida cuyo flujo es absorbido

por la bomba interna de vacío de LGR, estos flujos eran transportados a través de mangueras de silicón de 2 m de largo y ½” de diámetro; adicionalmente, a este sistema se le instaló (iii) una salida extra en contacto con la atmosfera, con el fin de evitar que se reduzca el volumen de la cámara o que el espacio de cabeza se sature de gases y termine por levantarse, presentando mediciones erróneas. Con este sistema de entradas y salidas se buscaba que las condiciones internas (presión- temperatura) de la cámara se mantuvieran estables.

Tabla 3. Principales características y especificidades del diseño de la DC

Característica	Nomenclatura	Unidad
Altura total	0.15	m
Volumen total	0.01289	m ³
Área/ perímetro total	0.37	m ²
Altura sumergida	0.04	m
Altura útil	0.11	m
Área/ perímetro útil	0.355	m ²
Espacio de cabeza	0.009012	m ³
Ventilación	40-100	rpm

Con el fin de que los gases dentro del espacio de cabeza fueran idealmente mezclados, en el interior y ubicado en la cubierta superior de la cámara, se instaló un pequeño ventilador de teflón ocupando un volumen dentro del espacio de cabeza de $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$; este era impulsado por un motor con velocidad promedio entre las 40 a 100 rpm. Este sistema cuenta con los criterios de funcionamiento de un CSTR, suponiendo que la concentración en del espacio de cabeza es la misma en cualquier punto de la cámara y suponiendo que no existen puntos de estancamiento.

Anudado a lo anterior, se consideraron factores externos, como la temperatura del medio ambiente y del agua, modificando y alterando el comportamiento de los gases dentro de la misma. En condiciones reales, la cámara estaría expuesta a la radiación solar durante toda la campaña; para disminuir el efecto esta se cubrió con un esmalte reflejante de color blanco de tal manera que estos cambios solo se debieran a la temperatura del agua, Atkinson (2003) realizó la investigación sobre las diferencias de temperaturas entre el ambiente y el espacio de cabeza indicando fluctuaciones de $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Otro factor importante que se tuvo en cuenta fueron los cambios de presión dentro del sistema en el momento que se coloca la cámara sobre la superficie del agua, por esta razón en el sistema de flujo de entrada y salida de la cámara se incluye un agujero de salida extra lo que permitirá regular la presión entre el espacio de cabeza y la atmosfera durante la medición. Johansson y Granat (1984) realizaron una investigación sobre las diferencias de presión entre el medio exterior y el espacio de cabeza de un sistema de DC, utilizando un manómetro de agua inclinada, indicando una diferencia de presión por debajo de los límites detectables ($0.2\text{ mm H}_2\text{O}$).

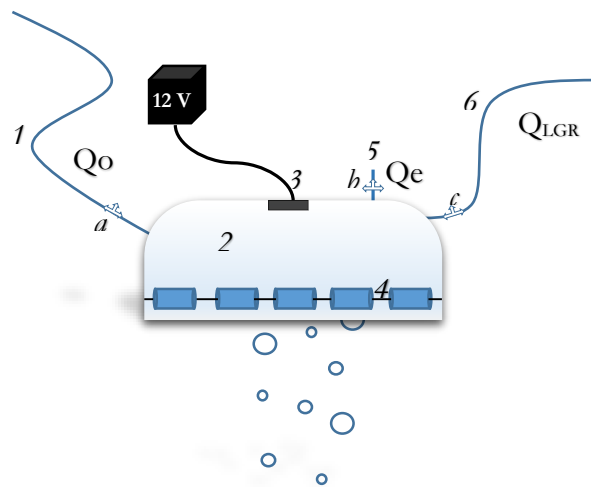


Figura 10. Diseño Cámara Dinámica

1. Qo conducto flujo entrada de N_2 ; 2. Cámara de material plástico; 3. Sistema de ventilación; 4. Flotadores de styrofoam; 5. Qe Flujo de salida extra; 6. Q_{LGR} conducto de salida que conduce a LGR. a, b y c control de flujos (válvulas de tres vías).

4.1.2 Precisión analizador OA-ICOS. Teniendo el prototipo de DC, se hizo uso de un analizador OA-ICOS ultra-portátil de GEI (UGGA, modelo 915-0011, los Gatos Research Inc., E.U.A.) que permite detectar y cuantificar gas metano, dióxido de carbono y vapor de agua. Este prototipo está protegido por una caja a prueba de golpes; tiene un peso aproximado de 15 kg y es alimentado por una batería de (70 W), el analizador cuenta con una bomba de vacío interna para el muestreo del gas, con un tiempo de respuesta de ~ 8 s (Gonzales Valencia. 2014) (tiempo para alcanzar lecturas de estado estable), este equipo es operado de forma remota mediante una pantalla portátil conectada al medidor a través de una señal de conexión inalámbrica. Para el funcionamiento en campo, el equipo era suministrado de energía a través de una batería (intervalo de 10-30 Voltios de corriente continua) mediante un cable de alimentación. A continuación, se presenta en la Figura 11 el equipo detector de gases.

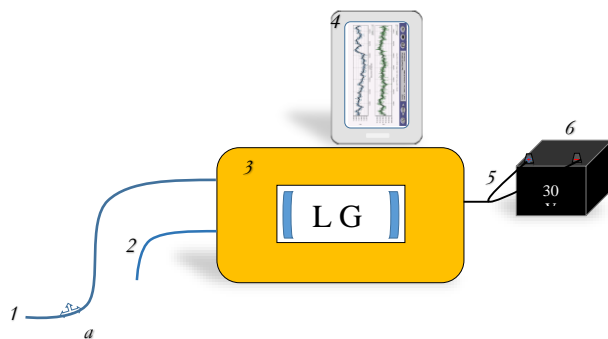


Figura 11. Sistema equipo detector de gases OA-ICOS

1 Conducto flujo absorbido por la bomba interna del UGGA Q_{LGR} ; 2. Waste ducto de salida del equipo; 3. Analizador OA-ICOS ultra-portátil de GEI (UGGA, modelo 915-0011, los Gatos Research Inc., E.U.A.); 4. Operador remoto (tablet, Samsung 12"); 5. Cable alimentador de energía; 6. Batería 30 V.

Este equipo no requiere de calibración adicional a la de fábrica, Gonzales Valencia 2014 a través de la inyección de varios gases estándar de 2 a 500 ppm de CH₄ y de 20 a 1500 ppm de CO₂, determinó que el UGGA no requiere de dicha calibración ya que mostró una respuesta lineal en todo el intervalo ensayado; asimismo, meses anteriores al desarrollo de este trabajo, el equipo de trabajo verificó la concentración de 8 estándares por cromatografía de gases, los resultados obtenidos reportan una pendiente de 1.0016 y un coeficiente de correlación de 0.999; posteriormente, esos mismos estándares fueron inyectados al UGGA cuyas mediciones están representadas por pendiente de 0.9998 y un coeficiente de correlación de 0.9986; confirmando la precisión del equipo analizador utilizado en este trabajo.

4.1.3 Medición de flujos de entrada y salida de la DC. Teniendo en cuenta los resultados de las tres pruebas realizadas para la determinación del flujo absorbido por el equipo y con base a que las variaciones en las mediciones presentan de buena a muy buena homogeneidad se consideró que el valor del flujo absorbido por LGR es el promedio de estos ensayos $Q_{LGR} 0.5808 \text{ l min}^{-1}$

Tabla 4. Resultados del flujo de absorción por la bomba de vacío del UGGA

Prueba	Prom.	Desv est.	CV
i	0.571	0.00	0.135
ii	0.6315	0.04	6.60
iii	0.54	0	0

Prom. Promedio; Desvest. Desviación estándar; CV. Coeficiente de variación.

Los valores de la 2^{da} columna, están expresados en l min^{-1}

Una vez calculado el flujo de absorción por UGGA, se establece un flujo de entrada de N_2 a la cámara de 6 l min^{-1} (lectura en rotámetro), buscando que fuera mayor al absorbido por el LGR, con el fin de evitar reducción en el espacio de cabeza y/o alteraciones en la presión del sistema; considerando la calibración del rotámetro el flujo real sería de $7.8347 \text{ l min}^{-1}$, cuya calibración se realizó mediante ensayos volumétricos con correlación entre pruebas de R^2 . 0.9952.

Debido a que el sistema DC-ICOS funciona al igual que un CSTR, el flujo Q_e sería de $7.2239 \text{ l min}^{-1}$ dado por la diferencia entre el flujo de entrada Q_0 y el flujo de salida al detector Q_{LGR} .

4.1.4 Modelización de tiempo de respuesta. Utilizando la ecuación (E. 1), se calculó un tiempo de residencia de $\sim 101 \pm 0.6 \text{ s}$ (figura 12), con una bondad de ajuste entre los datos experimentales y el modelo de R^2 0.999; este tiempo es comprendido por el tiempo de transporte (t_t) de la DC al detector ($\sim 24 \text{ s}$), calculado a partir del volumen interno de la manguera por donde se transporta el gas y la velocidad de flujo del UGGA; asimismo, el tiempo de respuesta del equipo que es de alrededor de 8 s (Gonzales Valencia, 2011).



Figura 12. Respuesta tipo pico de tiempo de residencia

(101 ± 0.6 s) a partir de inyecciones por triplicado de concentraciones conocidas de metano (5-3-1 ml) al 99% con flujo continuo de entrada de N₂ de $7.8347 \text{ l min}^{-1}$. Tiempo estimado por el promedio de las inyecciones con desviación estándar de 1.03, cuya bondad de ajuste entre concentraciones de CH₄ (línea verde) y el modelo (línea roja) de R^2 0.999.

Las lecturas tenidas en cuenta para el tratamiento de datos fueron a partir de 2 min después de puesta la cámara en superficie, tiempo suficiente para que el sistema alcanzara lecturas estables, determinado mediante el uso del modelo MOD-TR; para calcular este tiempo (figura 13), se colocó la cámara sobre el agua contenida en la tina y una vez estabilizada la lectura esta se levantó bruscamente y nuevamente se puso en contacto con el agua mostrando un salto como respuesta a dicha alteración; el tiempo transcurrido desde el salto hasta nuevamente alcanzar las concentraciones de $6.63 \text{ ppm} \pm 0.015$ (CH_4) registradas antes de levantar la cámara, es considerado el tiempo requerido para alcanzar lecturas estables, este último valor es la concentración tomada como referencia representando el promedio de lecturas estables con nivel de confianza de 0.98. Este tiempo también es tenido en cuenta para las lecturas de CO_2 .

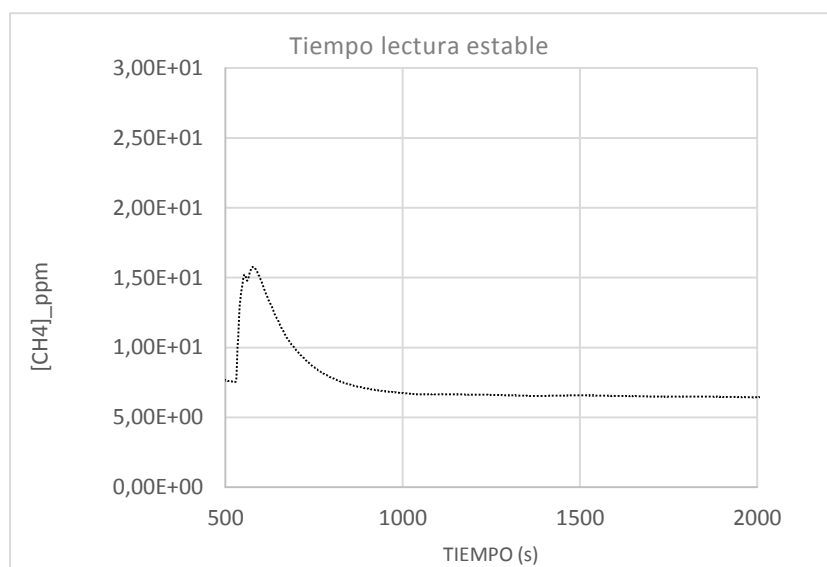
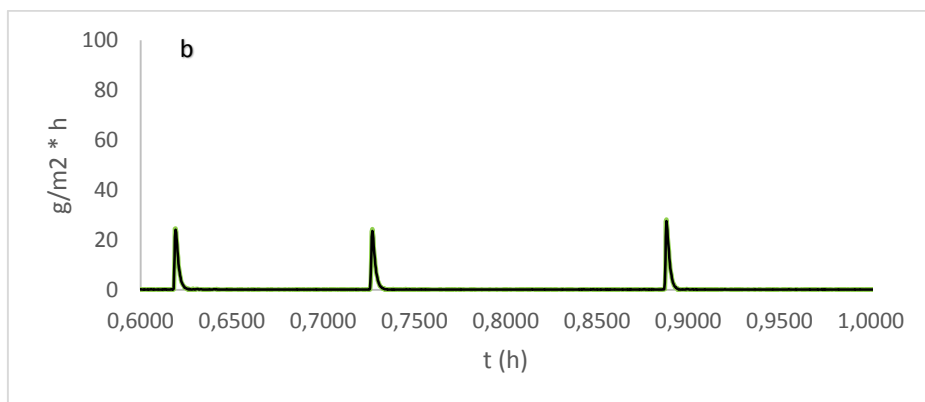
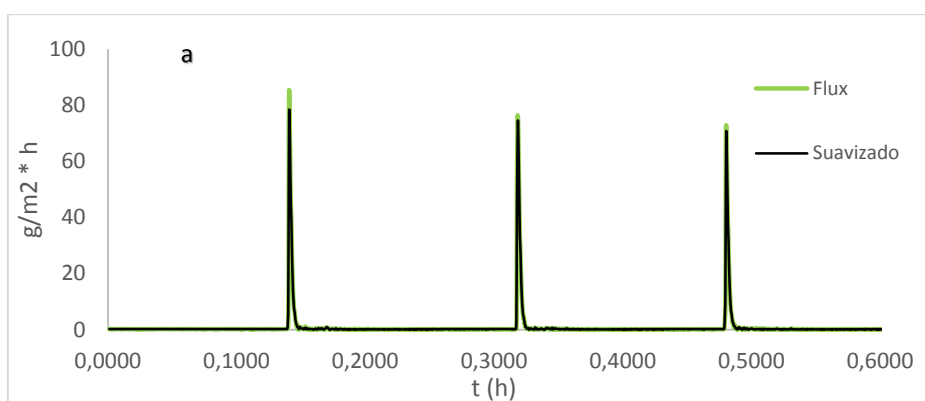


Figura 13. Respuesta tipo pico UGGA al poner cámara en tina

Representando el tiempo en alcanzar lecturas estables, calculado a partir del uso del MOD-TR con un tiempo estimado de ~ 106 s.

4.1.5 Cálculo de fluxes instantáneos Con la simulación de un ecosistema acuático dentro del laboratorio y considerando tanto las emisiones de tipo difusivas como ebullitivas representadas mediante gráficos de dispersión, se determinaron fluxes instantáneos mediante el uso del modelo MOD-DC con el fin de estudiar la respuesta transitoria a un cambio brusco de concentración en el espacio de cabeza y para poner a prueba este modelo se simularon fluxes constante y otro tipo escalón.



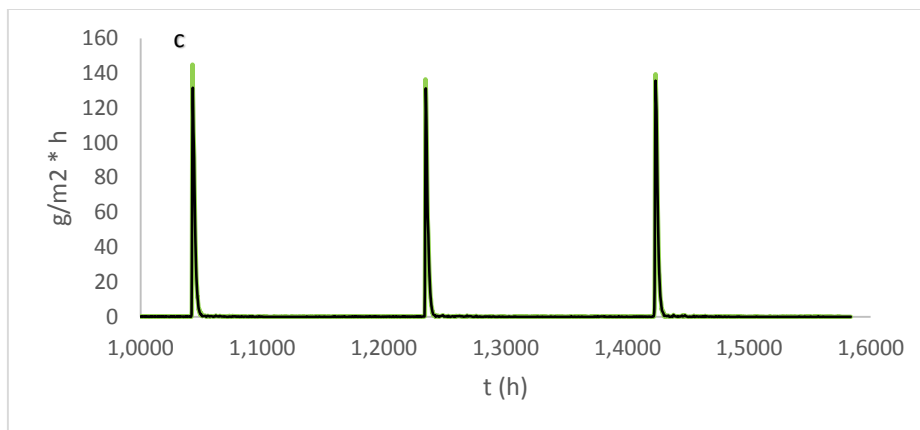


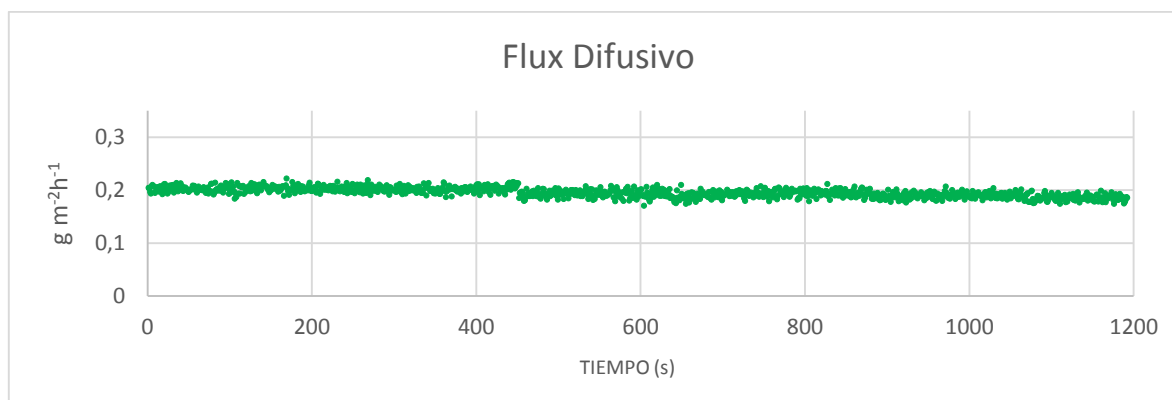
Figura 14. Prueba de Fluxes instantáneos en laboratorio

Rectas representan fluxes difusivos y los picos a fluxes ebulitivos (respuesta a cada inyección de CH₄). a.

inyecciones de 3 ml de CH₄; b. inyecciones de 1 ml; inyecciones de 5 ml.

* Datos experimentales (información soporte IS MOD-DC 10Oct2015)

Para determinar fluxes difusivos se tomaron los datos que representaban rectas eliminando los aumentos bruscos de concentración, los datos que conformaban cada recta eran promediados, determinando un flux difusivo promedio; finalmente, estos eran nuevamente promediados para obtener un flux difusivo de referencia de $0.0319 \pm 0.033 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ con un nivel de confianza de 0.98.



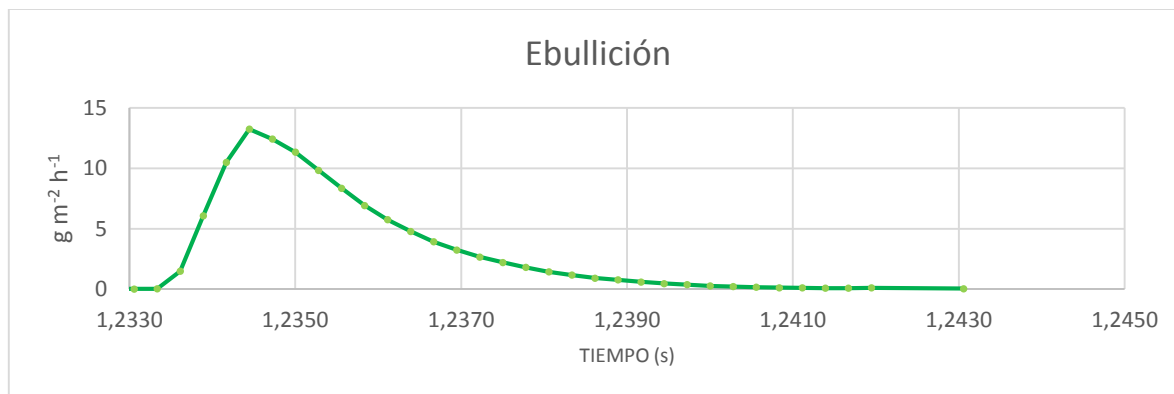


Figura 15. Rectas flux difusivo de CH₄ eliminando picos de respuesta.

*Datos experimentales (IS MOD-DC 10Sept2015)

Los picos como respuesta de las inyecciones representan fluxes ebullitivos, calculados de la misma manera que los fluxes difusivos; no obstante, cabe mencionar que dentro de estos picos existe una pequeña porción de difusividad, por lo que al flux ebullitivo promedio se le resta el flux difusivo de referencia dando como resultado un flux ebullitivo real de $0.91 \pm 0.62 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

4.2 Campañas de campo

Las pruebas de medición *in situ* consistieron en la determinación de diferentes puntos a lo largo y ancho de ambos lagos (LG; PL), considerando aspectos como profundidad, entradas de corrientes de agua y descargas (*dilución y aporte de materia orgánica*), puntos altos y bajos de emisión identificados a través de la presencia- ausencia de burbujeo, cada uno georeferenciado con GPS. En lo que respecta al lago Guadalupe se realizaron tres campañas para un total de 18 puntos, 15 con tiempo de duración de ~15 min y tres con duración de ~1 h; en cuanto a la Presa del Llano se realizó solo una campaña con un total de 6 puntos con duración por punto de ~15 min de medición.

Tabla 5. Puntos de medición en ecosistemas objeto de estudios

N Campana	Punto	Profundidad (m)	Coordenada	
			N	W
1	1	19.2	19.63223	-99.25500
	2	7.5	19.63339	-99.27285
	3	11.1	19.63339	-99.26943
	4	4.6	19.63012	-99.26427
	5	5	19.63237	-99.26109
	6	4.6	19.62805	-99.26796
2	1	2	19.62554	-99.24945
	2	20	19.62524	-99.25123
	3	21	19.63070	-99.25407
	4	2.6	19.63589	-99.25703
	5	3	19.62479	-99.25698
	6	3.3	19.62080	-99.24901
	7	3.8	19.62332	-99.28005
	8	6.2	19.62603	-99.27500
	9	9.5	19.62700	-99.27083
3	1	3	19.62147	-99.28085
	2	3.3	19.62022	-99.28044
	3	3.9	19.62493	-99.28172
1*	1	12.5	19.65850	-99.50808
	2	19.5	19.65809	-99.50826
	3	9.6	19.65822	-99.50734
	4	14.2	19.65639	-99.50780
	5	13.2	19.65724	-99.50756
	6	5.5	19.65554	-99.50814

Los números de campaña 1-2-3 hacen referencia a las realizadas en LG; 1* campaña

lago PL; Profundidades medidas con profundímetro portátil sumergible PS-7

A continuación, se especializan los diferentes puntos de medición en cada uno de los lagos

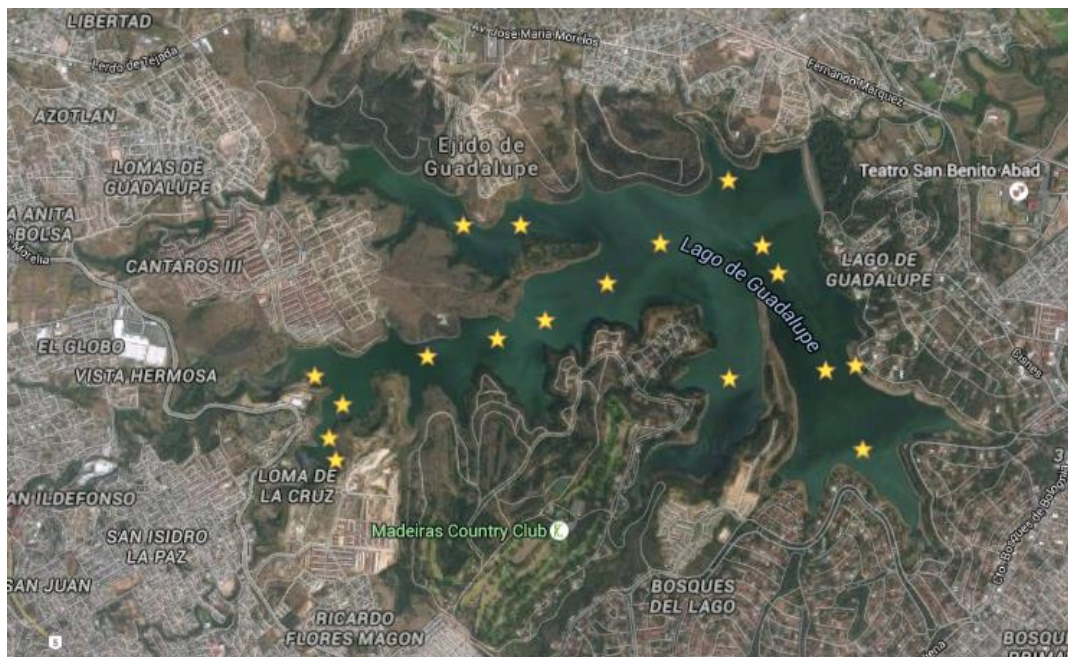


Figura 16. Puntos de medición "Lago Guadalupe"

Fuente: <https://www.google.com.co/maps/@19.6261959,-99.2667248,4243m/data=!3m1!1e3?hl=es>



Figura 17. Puntos de medición "Lago Presa del Llano"

Fuente: <https://www.google.com.co/maps/@19.6575557,-99.506215,1179m/data=!3m1!1e3?hl=es>

19.658 (latitud), -99.507 (longitud).

Con los registros de concentraciones de gases de ambos lagos se calcularon fluxes mediante el uso del modelo MOD-DC; los datos negativos tanto para el CH₄ como para el CO₂ fueron eliminados mediante el uso de la función S.I. y con el propósito de disminuir el ruido en los datos, estos fueron suavizados mediante el método de medias móviles (por tres); finalmente, estos fueron representados mediante gráficos de dispersión (Figura 18), donde tanto para el metano como para el dióxido de carbono la difusividad está representada mediante rectas y los picos representan un aumento en la concentración del gas asociado a burbujeo (*ebullición*); Posteriormente, el conjunto de datos con características homogéneas (rectas) se tomaban y se representaban nuevamente mediante gráficos de dispersión al igual que con los datos tipo picos cromatográfico (Figura 19).

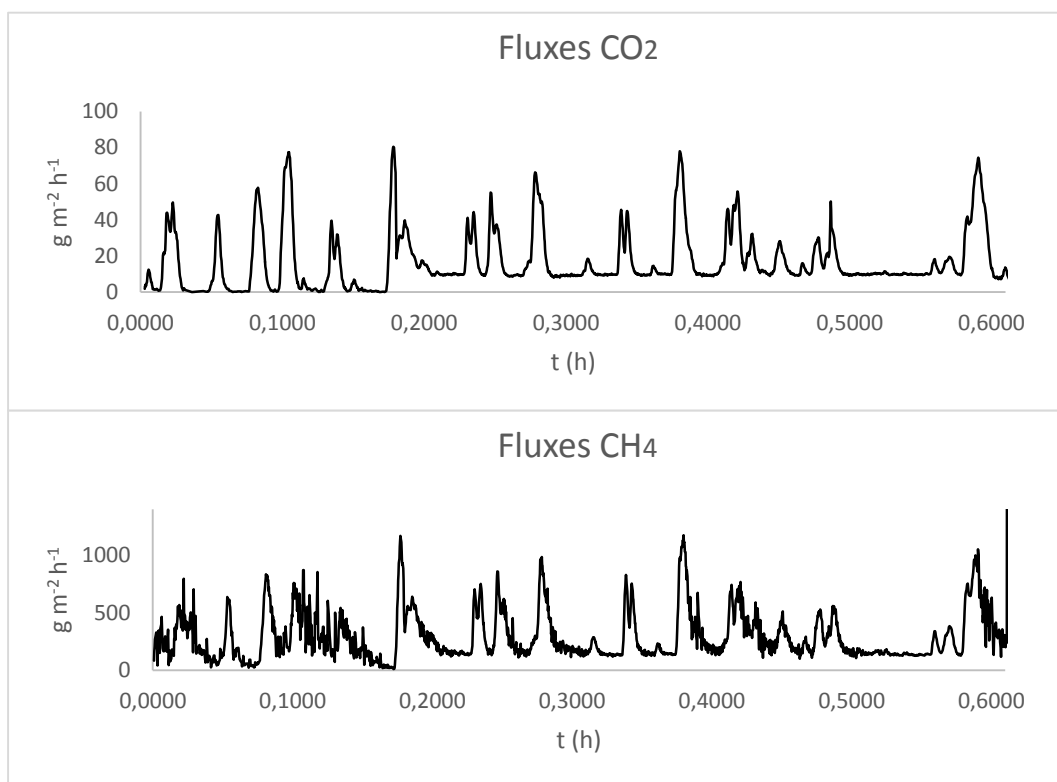


Figura 18. Fluxes CH₄ (arriba); CO₂ (abajo)

Datos tomados en campo *Lago Guadalupe*- 22Oct2015; 19.62147 latitud norte; -99.28085 longitud oeste.

De cada conjunto de datos, se tomó un flux de referencia mediante el promedio de los mismos, alcanzando fluxes en el Lago Guadalupe de hasta $1,17 \cdot 10^3 \pm 11.2 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CH_4 ; $8,05 \cdot 10^1 \pm 0.86 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CO_2 y con registros mínimos de $3 \cdot 10^{-6} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CH_4 y $1 \cdot 10^{-4} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CO_2 con 0.98 nivel de confianza; en cuanto a registros de fluxes en el Lago Presa del Llano se alcanzaron mediciones de hasta $9.56 \pm 0.62 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ de CH_4 $3.66 \pm 0.024 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ de CO_2 y con registros mínimos de $2 \cdot 10^{-6} \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ de CH_4 y $4 \cdot 10^{-4} \pm 0.5$ de CO_2 ; los errores de la medición fueron calculados mediante el error típico de la media, los anteriores valores superan el rango de valores mínimos y máximos reportados en estudios realizados en estos ecosistemas utilizando otras técnicas similares (tabla 6), lo que comprueba la sensibilidad de la técnica acá desarrolla. Cabe mencionar, que en los puntos donde se presenciaba burbujeo contante, no fue posible diferenciar la difusividad, debido al incremento en las mediciones, por lo que se opta por tomar solo un flux como referencia mediante el promedio de todos los datos.

Tabla 6. Fluxes calculados mediante método DC-ICOS

<i>Lago Guadalupe</i>																
N Campana	Punto	GEI	Fluxes													
			Difusividad				Ebullición				Total					
			Emis	DS	ES	ME	Emis	DS	ES	ME	Emis	Max	Min	% Ebul	%Dif	
1 ^{RA}	1	CH ₄	0.028	0.019	0.009	0.023	0.366	0.117	0.067	0.161	0.42	2.83	0.001	86.34	13.6	
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	1.02	0.011	-	-	
	2	CH ₄	0.024	0.006	0.003	0.007	0.119	0.093	0.038	0.091	0.169	1.585	0.006	68.05	31.95	
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.489	1.772	0.039	-	-	
	3	CH ₄	0.005	0.001	5*10 ⁻⁴	0.001	0.293	0.006	0.003	0.008	0.039	0.271	0.001	71.63	28.37	
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.275	1.006	0.005	-	-	
	4	CH ₄	0.036	0.030	0.021	0.052	2.175	0.744	0.526	1.252	2.249	14.73	0.005	94.67	3.31	
		CO ₂	0.263	0.145	0.014	0.033	0.380	0.648	0.458	1.091	0.908	3.367	0.016	30.07	69.93	
	5	CH ₄	0.016	0.010	0.003	0.009	0.342	0.324	0.108	0.257	0.376	4.064	3*10 ⁻⁴	90.83	9.17	
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.295	1.753	0.022	-	-	
	6	CH ₄	0.037	0.024	0.002	0.005	1.405	1	0.707	1.683	1.480	10.31	4*10 ⁻⁴	94.89	5.11	
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.124	0.618	2*10 ⁻⁴	-	-	
		1	CH ₄	0.051	0.007	0.004	0.010	0.091	0.091	0.055	0.133	0.194	3.605	0.001	37.59	62.41
			CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.379	1.421	0.023	-	-
		2	CH ₄	0.006	0.001	0.001	0.002	0.169	0.243	0.032	0.076	0.183	0.884	0.001	92.39	7.61
			CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.366	3.879	0.031	-	-
		3	CH ₄	0.021	7*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁴	9*10 ⁻⁴	0.038	0.016	0.008	0.020	0.080	0.572	0.003	72.43	27.57
			CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.347	1.218	0.058	-	-

2 ^{DA}	4	CH ₄	0.014	$9 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.201	0.041	0.029	0.069	0.230	1.306	0.001	86.82	13.18
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.334	3.910	0.005	-	-
	5	CH ₄	0.014	0.004	0.002	0.004	0.513	0.311	0.155	0.370	0.542	3.36	$2 \cdot 10^{-4}$	94.75	5.25
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.389	3.530	0.008	-	-
	6	CH ₄	0.010	0.006	0.003	0.007	0.531	0.362	0.209	0.497	0.552	7.245	$3 \cdot 10^{-4}$	96.33	3.67
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.036	0.328	$8 \cdot 10^{-4}$	-	-
	7	CH ₄	0.108	0.070	0.049	0.117	0.815	0.954	0.426	1.015	1.031	13.79	0.006	77.83	22.17
		CO ₂	0.042	0.014	0.008	0.019	0.098	0.044	0.025	0.061	0.182	0.784	$1 \cdot 10^{-4}$	48.83	53.17
	8	CH ₄	0.023	0.009	0.004	0.010	0.292	0.273	0.111	0.265	0.340	3.091	$1 \cdot 10^{-4}$	85.45	14.55
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.034	0.523	$1 \cdot 10^{-4}$	-	-
	9	CH ₄	0.035	0.029	0.011	0.026	0.349	0.388	0.137	0.327	0.420	4.372	0.005	77.75	22.25
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.033	0.095	$5 \cdot 10^{-4}$	-	-
3 ^{RA}	1	CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	306.5	1174	8.98	-	-
		CO ₂	0.304	0.015	0.009	0.021	19.47	6.501	2.654	6.316	20.08	80.47	0.017	96.94	3.06
	2	CH ₄	0.030	0.022	0.008	0.020	6.071	4.719	2.724	6.484	6.130	30.29	$1 \cdot 10^{-4}$	99.02	0.98
		CO ₂	0.258	0.013	0.007	0.018	4.371	2.231	1.288	3.066	4.887	16.14	$4 \cdot 10^{-4}$	89.15	10.85
	3	CH ₄	0.012	0.020	0.008	0.019	0.320	0.282	0.099	0.237	0.345	0.105	$3 \cdot 10^{-6}$	92.82	7.18
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.267	0.953	$7 \cdot 10^{-4}$	-	-

Presa Lago del Llano

N ^o Campan ^o a	Pun to	GEI	Fluxes												
			Difusividad				Ebullición				Total				
			Emi s	DS	ES	ME	Emi s	DS	ES	ME	Emi s	Max	Min	% Ebul	%D if
1 ^{RA}	1	CH ₄	0.01 2	0.001	0.001	0.002	0.60 8	0.134	0.094	0.225	0.63 3	2.42 6	8*10 ⁻⁴	95.8 7	4.13
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.30 2	1.68 3	0.009	-	-
	2	CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	1*1 0 ⁻³	0.00 7	1.8*1 0 ⁻⁶	-	-
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.30 7	1.13 7	4*10 ⁻⁴	-	-
	3	CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00 1	0.00 6	1*10 ⁻⁵	-	-
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27 3	1.06 2	0.003	-	-
	4	CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01 0	0.07 1	5*10 ⁻⁴	-	-
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.30 6	3.66 3	0.008	-	-
	5	CH ₄	0.01 0	0.03 2	0.00 1	0.00 2	2.51 3	2.34 9	0.26 4	0.62 8	2.53 4	9.56 7	3.4*1 0 ⁻⁵	99.1 6	0.84
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26 2	1.06 1	0.010	-	-
	6	CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00 2	0.00 8	2*10 ⁻⁴	-	-
		CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28 3	1.21 1	0.002	-	-

Registro de las mediciones de CH₄ y CO₂ mediante el uso de la técnica DC-ICOS; emisión del gas en g m⁻²h⁻¹; DS desviación estándar; ES error estándar; ME margen de error con nivel de confianza de 0.98; %Ebull es el porcentaje de burbujeo durante toda la medición; %Dif porcentaje de difusividad durante la medición. Los valores no registrados se deben a mucho ruido impidiendo diferencias un flux del otro, por lo que solo se promediaron las mediciones y se tomó uno de referencia.

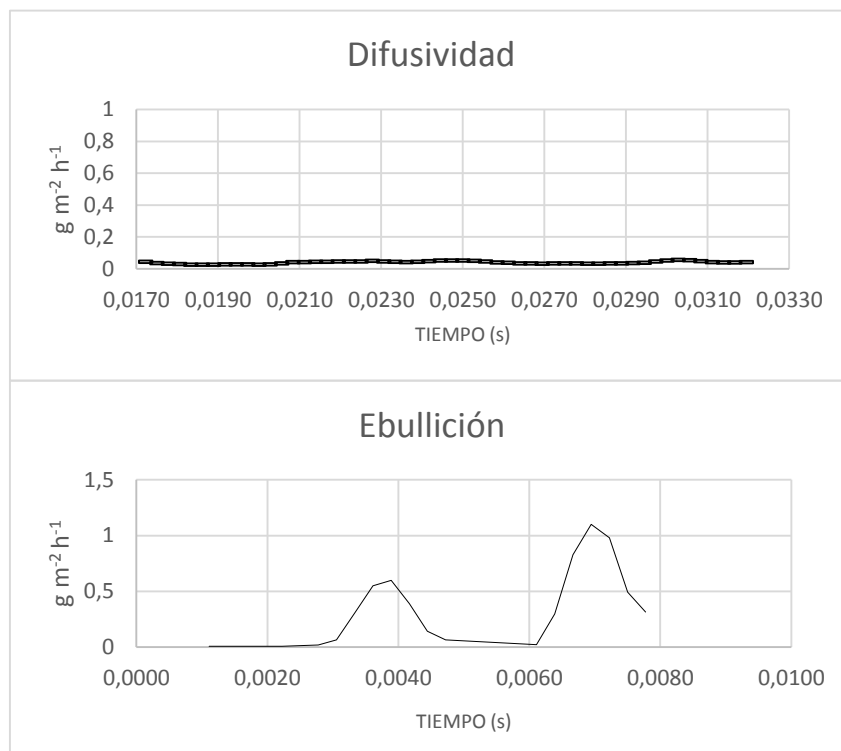


Figura 19. Rectas de fluxes de CH₄ asociadas a difusividad (arriba);

Desvesta 0.009; error estand 0.001; marg error 0.004. Picos de CH₄ asociados a ebullición (abajo); Desvesta 0.29; error estand 0.04; marg error 0.098.

Datos tomados en campo *Lago Guadalupe*- 15Oct2015; 19.63339 latitud norte; -99.27285 longitud oeste.

La difusividad y ebullición eran claras en puntos donde el burbujeo era intermitente, permitiendo que las concentraciones dentro del espacio de cabeza descendieran y permanecieran estables por periodos donde se lograba diferenciar un flux del otro; asimismo, cuando el burbujeo era constante y alto (fluxes $>10 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$), los registros de CO₂ eran más fáciles de detectar y se podía evidenciar la proporción entre el CH₄ y CO₂ (figura 20); por el contrario, en puntos donde el burbujeo era bajo, los fluxes de este último era muy difíciles de diferenciar la difusividad de una ebullición, debido a mediciones ruidosas (figura 21), por lo tanto, se tomó como flux de referencia el promedio de todos los fluxes del punto en cuestión.

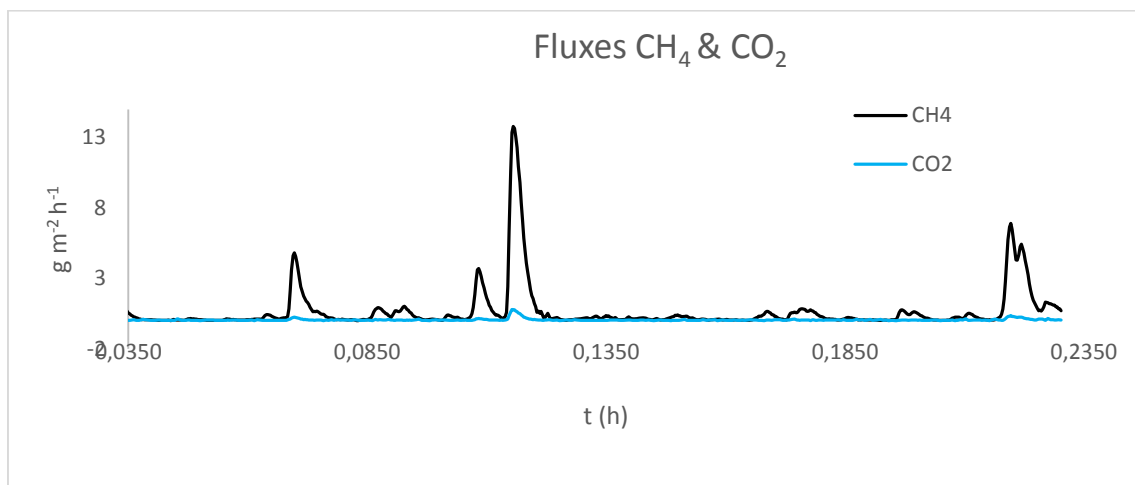


Figura 20. Relación CH_4 & CO_2 . Rectas representan difusividad en ambos gases y burbujeo representados mediante picos.

Datos tomados en campo *Lago Guadalupe*- 21Oct2015; 19.62332 latitud norte; -99.28005 longitud oeste

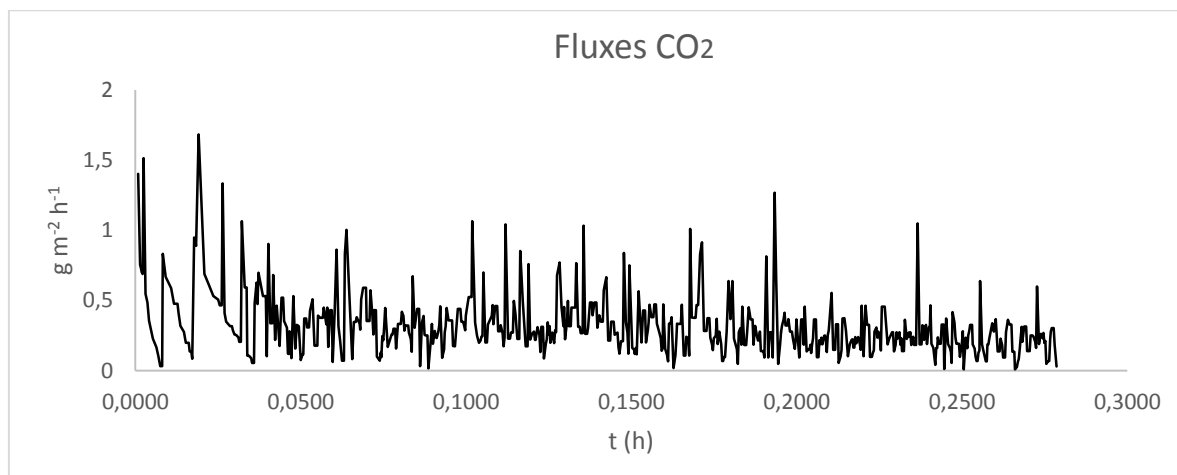


Figura 21. Fluxes CO_2 Lago Presa del Llano.

Datos tomados en campo 10Nov2015; 19.65850 latitud norte; -99.508008 longitud oeste

Aplicando la técnica de SC, durante periodos de ~ 5 min e incorporando estos datos en el modelo MOD-SC, se logran determinar fluxes similares a los valores calculados por la técnica objeto de este estudio consolidados en la tabla 6; cabe aclarar, que la determinación de un flux por SC, era el resultado del procesamiento de un conjunto de datos que a partir de la función pendiente era determinada. En lo referente a dicho procesamiento, el conjunto de datos eran representado mediante graficas de dispersión, donde se evidencia el crecimiento exponencial de las concentraciones de gases tanto de CH₄ como de CO₂ (figura 22), cuyo aumento está asociado a la difusividad; en el evento de incrementos bruscos, estos son asociados con procesos de ebullición.

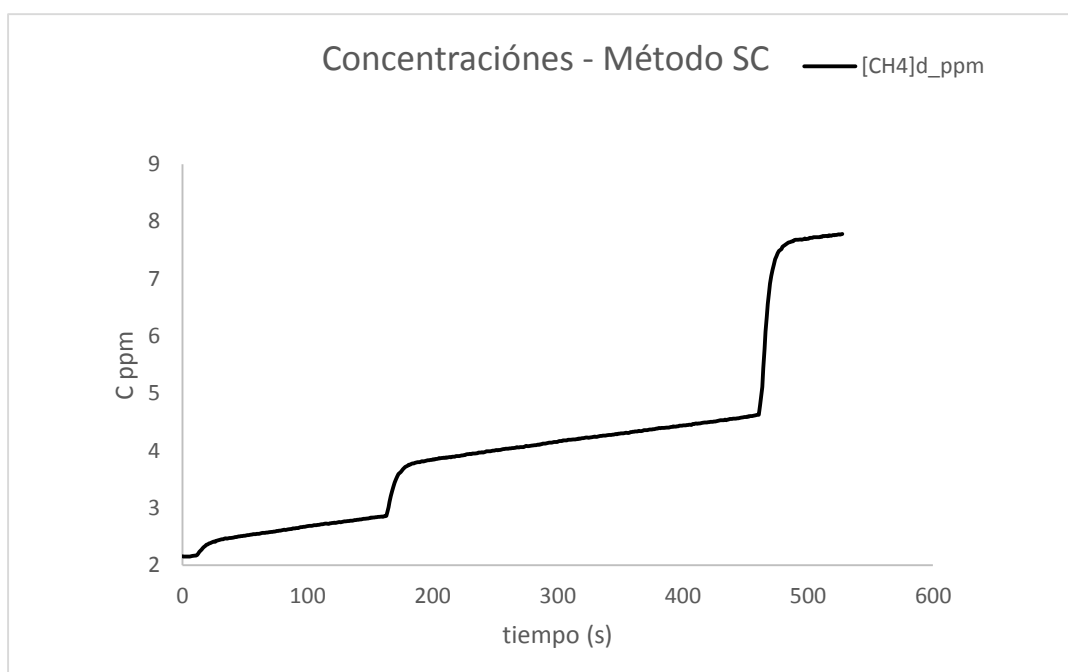


Figura 22. Concentraciones de CH₄ a partir del uso de la técnica SC

Datos tomados en campo 15Oct2015; 19.63223 latitud norte; -99.255 longitud oeste.

Con todo el conjunto de datos, mediante la función pendiente, se determina un flux total por punto; posteriormente, para la determinación de fluxes difusivos, los incrementos bruscos eran

eliminados quedando una línea de tipo de crecimiento logarítmico y mediante la función pendiente se determinaban fluxes de tipo difusivo; por tanto, mediante la diferencia entre estos dos últimos se determinaban fluxes de tipo ebulitivos.

Conclusiones

El desarrollo de la técnica DC-ICOS, resulta ser sencilla y práctica, considerándola como una alternativa para conocer las emisiones de GEI (CH₄; CO₂) a las que está sujeta un lago durante periodos de tiempo deseado, debido a la entrada y salida de un flujo continuo que evita el estancamiento y acumulación de gases en el espacio de cabeza, dándole estabilidad a la cámara una vez puesta en contacto con el espejo de agua sin presentar cambios importantes de presión.

Se logró evidenciar la dinámica de las emisiones de CH₄ y CO₂ mediante fluctuaciones entre registros de concentración de estos gases dentro de un ecosistema de lagos durante periodos de tiempo de 15 y 60 min. El prototipo DC-ICOS, permitió la determinación de fluxes de CH₄ y CO₂ con frecuencia de 1 Hz, alcanzando mediciones de hasta $1,17 \cdot 10^3 \pm 11.2 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CH₄; $8,05 \cdot 10^1 \pm 0.86 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el CO₂ y con registros mínimos de $2 \cdot 10^{-6} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; $1 \cdot 10^{-4} \pm 0.019 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ de CH₄; CO₂ respectivamente, con 0.98 de nivel de confianza; estas mediciones superan el rango de valores mínimos y máximos reportados en estudios previos en ecosistemas de lagos utilizando técnicas similares.

Tal como se esperaba, los fluxes calculados a partir de las mediciones de CH₄ en el LG, resultaron siendo de orden mayor a los determinados en PL, lo que está asociado a mayor aporte de materia orgánica y condiciones hipertróficas a las que está sujeto este ecosistema por presión demográfica. Por el contrario, en la mayoría de los cálculos de fluxes de CO₂ realizados en ambos lagos, PL registra mayor emisión de este gas, lo que puede estar asociado a la presencia de la densa vegetación acuática involucrando factores de respiración (Cole *et al.* 1998; Sepúlveda *et al.* 2015).

Debido a que la técnica desarrollada en este trabajo es de fácil transporte y aplicación, permite realizar mediciones en diferentes puntos y por el tiempo que se desee, no sin antes contemplar que la disponibilidad de nitrógeno y energía para el funcionamiento de los equipos puede ser una limitante.

En concordancia al punto anterior, es posible realizar mediciones que permitan determinar y evaluar a través de un diagnóstico las variaciones espaciales y temporales de las emisiones de gases de efecto invernadero a las que está sujeta un ecosistema de lagos.

Recomendaciones

Con el fin de reducir el tiempo de residencia del gas dentro del espacio de cabeza, sería importante considerar el tamaño de la cámara.

Desarrollar campañas con mayor tiempo de medición con el fin de poder establecer y conocer con mejor precisión las variaciones diurnas y nocturnas de emisiones de GEI a los que está sujeto un ecosistema de lago.

Aplicar el método DC-ICOS en diferentes puntos a lo largo y ancho de la superficie del ecosistema objeto, teniendo en cuenta entradas de cuerpos de agua, aporte de materia orgánica, profundidad y presencia-ausencia de burbujeo; con el fin de poder establecer las variaciones espaciales a las que están sujetos estos ecosistemas.

Con base a las dos últimas recomendaciones y con el fin de hacer de esta método una alternativa para determinar las emisiones de CH_4 y CO_2 dentro de un ecosistema de lago, sería interesante considerar los cambios estacionales y otras variables como temperatura, oxígeno disuelto e índices de calidad de agua y estado trófico, propendiendo realizar un análisis más profundo sobre los cambios y variable que influyen en la emisión de estos gases.

Reconociendo que el método desarrollado en este trabajo es de fácil aplicación y que se puede adaptar a diferentes ecosistemas, es posible la implementación de la misma en un ecosistema terrestre o agrícola (p.ej. cultivos de arroz) a la cual se le deberá realizar algunas pequeñas modificaciones y adaptaciones.

Bibliografía

- Algesten, G., Sobek, S., Bergström, A. K., Ågren, A., Tranvik, L. J., & Jansson, M. (2004). *Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. Global change biology*, 10(1), 141-147.
- Aneja, V. P., Malik, B. P., Tong, Q., Kang, D., & Overton, J. H. (2001). *Measurement and Modelling of ammonia emissions at waste treatment lagoon-atmospheric interface. Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 1(5-6), 177-188.
- Baer, D. S., Paul, J. B., Gupta, M., & O'Keefe, A. (2002, September). *Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated cavity output spectroscopy. In International Symposium on Optical Science and Technology (pp. 167-176). International Society for Optics and Photonics.*
- Baer, D., Gupta, M., Leen, J. B., & Berman, E. (2012). Environmental and atmospheric monitoring using off-axis integrated cavity output spectroscopy (OA-ICOS). *Am Lab*, 44(10).
- Bartlett, K.B., Cril, P.M., Sebacher, D.L., Harriss, R.C., Wilson, J.O. and Melack, J.M. (1988). *Methane flux from the central Amazonian floodplain. Journal of Geophysical Research* 93: doi: 10.1029/88JD01589. issn: 0148-0227.

- Bastviken, D., Cole, J., Pace, M., & Tranvik, L. (2004). *Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate*. *Global biogeochemical cycles*, 18(4).
- Battin, T. J., Luysaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A., & Tranvik, L. J. (2009). *The boundless carbon cycle*. *Nature Geoscience*, 2(9), 598-600.
- Borrel, G., Jézéquel, D., Biderre-Petit, C., Morel-Desrosiers, N., Morel, J. P., Peyret, P., ... & Lehours, A. C. (2011). *Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems*. *Research in Microbiology*, 162(9), 832-847.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). *Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra* [Version Electrónica]. *Revista UNAM.MX*, Vol. 8, 10. 1067-6079.
- Cole, J. J., N. F. Caraco, G. W. Kling, and T. K. Kratz (1994), *Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes*, *Science*, 265, 1568– 1570, doi:10.1126/science.265.5178.1568.
- Dean, W. E., & Gorham, E. (1998). *Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands*. *Geology*, 26(6), 535-538.

- Downing, J. A., Prairie, Y. T., Cole, J. J., Duarte, C. M., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., ... & Middelburg, J. J. (2006). *The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments*. *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2388-2397.
- Einsele, G., Yan, J., & Hinderer, M. (2001). *Atmospheric carbon burial in modern lake basins and its significance for the global carbon budget*. *Global and Planetary Change*, 30(3), 167-195.
- Gonzales Valencia, R. (2010). *Calidad de agua en lagos mexicanos y su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero*. Tesis de Maestría. CINVESTAV.
- Gonzalez-Valencia, R., Sepulveda-Jauregui, A., Martinez-Cruz, K., Hoyos-Santillan, J., Dendooven, L., & Thalasso, F. (2014). *Methane emissions from Mexican freshwater bodies: correlations with water pollution*. *Hydrobiologia*, 721(1), 9-22.
- Gonzalez-Valencia, R., Magana-Rodriguez, F., Gerardo-Nieto, O., Sepulveda-Jauregui, A., Martinez-Cruz, K., Walter Anthony, K., ... & Thalasso, F. (2014). *In Situ Measurement of Dissolved Methane and Carbon Dioxide in Freshwater Ecosystems by Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy*. *Environmental science & technology*, 48(19), 11421-11428.
- Granat, L., & Johansson, C. (1983). Dry deposition of SO₂ and NO_x in winter. *Atmospheric Environment* (1967), 17(1), 191-192.

Hoyos Santillán, J. (2008). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Lagos Mexicanos: Importancia del Ciclo del Carbono. Tesis de Maestría en Ciencias*. México, DF.: CINVESTAV.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jahangir, M. M., Johnston, P., Khalil, M. I., Grant, J., Somers, C., & Richards, K. G. (2012). *Evaluation of headspace equilibration methods for quantifying greenhouse gases in groundwater*. *Journal of environmental management*, 111, 208-212.

Kankaala, P., Huotari, J., Peltomaa, E., Saloranta, T., & Ojala, A. (2006). *Methanotrophic activity in relation to methane efflux and total heterotrophic bacterial production in a stratified, humic, boreal lake*. *Limnology and Oceanography*, 51(2), 1195-1204.

Kankaala, P., Huotari, J., Tulongen, T., & Ojala, A. (2013). *Lake-size dependent physical forcing drives carbon dioxide and methane effluxes from lakes in a boreal landscape*. *Limnol Oceanogr*, 58, 1915-1930.

LEDEZMA RODRIGUEZ, Mauricio and CABALLERO QUINTERO, Yadira. *Marco de análisis del mecanismo de desarrollo limpio y las oportunidades del mercado del carbono para el desarrollo de Colombia*. Rev. P+L [online]. 2013, vol.8, n.1, pp. 48-79. ISSN 1909-0455.

Lambert, M., & Fréchette, J. L. (2005). *Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies*. In *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes* (pp. 37-60). Springer Berlin Heidelberg.

Lewis Jr, W. M. (1983). *A revised classification of lakes based on mixing*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(10), 1779-1787.

López Bellido, J., T. Tulonen, P. Kankaala, and A. Ojala (2009), *CO₂ and CH₄ fluxes during spring and autumn mixing*.

Madigan, M., Martinko, J., & Parker, J. (2003). *Brock. Biología de los Microorganismos*. España: Prentice Hall.

Magaña Rodríguez, F. (2013). *Mapeo de la concentración de metano en lagos eutrofizados*. Tesis de Maestría en Ciencias. México, DF.: CINVESTAV.

Marcano José. *Ecología de aguas dulces*. Recuperado en <http://www.jmarcano.com/nociones/fresh3.html>

- Moreno Franco, D., Quintero Manzano, J., & López Cuevas, A. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofía*. *ContactoS*, 78, 25-33.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes1. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
- MULHOLLAND, P. J., & ELWOOD, J. W. (1982). *The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle*. *Tellus*, 34(5), 490-499.
- NUTRIENTES Y GASES: *OXIGENO DISUELTO*. Tercera Parte. (pag. 6-7). Recueprado en <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p3-oxigeno.pdf>.
- Nixon, S. W. (1995). Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41(1), 199-219.
- Parameswaran, K. R., Rosen, D. I., Allen, M. G., Ganz, A. M., & Risby, T. H. (2009). Off-axis integrated cavity output spectroscopy with a mid-infrared interband cascade laser for real-time breath ethane measurements. *Applied optics*, 48(4), B73-B79.
- Riebeek, H. (2010). *Global warming*. Retrieved January, 11, 2011.
- 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(2), 331-342.

Rolston, D. E. (1986). *47 Gas Flux. Methods of soil analysis part, 1*, 1103-1119.

Sanchez Ureña S. (2015). *Caracterización de la actividad metanotrófica en lagos por espectroscopia láser*. Tesis de Maestría. CINVESTAV.

Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. New York: National Academic Press.

Schlüter, M., & Gentz, T. (2008). *Application of membrane inlet mass spectrometry for online and in situ analysis of methane in aquatic environments*. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 19(10), 1395-1402.

SEMARNAT. (2005). Secretaria de Ambiente y Recursos Naturales. *Informe de la situación ambiental de México. Compendio de estadísticas Ambientales*. Recuperado en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/estadisticas-ambientales/informes-y-otras-publicaciones/informes-del-medio-ambiente>.

Sepulveda-Jauregui, A., Martinez-Cruz, K., Strohm, A., Anthony, W., Katey, M., & Thalasso, F. (2012). *A new method for field measurement of dissolved methane in water using infrared tunable diode laser absorption spectroscopy*. *Limnology and Oceanography: methods*, 10(7), 560-567.

- Sepulveda-Jauregui, Armando. 2012 *“Ciclo del metano en ecosistemas acuáticos: importancia del clima y del estado trófico”*. Tesis de maestría. CINVETSAV.
- Sepulveda-Jauregui A, Hoyos-Santillan J., Gutierrez-Mendieta F.J., Torres-Alvarado R., Dendooven L., Thalasso F. (2013), *The impact of anthropogenic pollution on limnological characteristics of a subtropical highland reservoir “Lago de Guadalupe”*, Mexico. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 410, 04.
- Sepulveda-Jauregui, A., Walter Anthony, K. M., Martinez-Cruz, K., Greene, S., & Thalasso, F. (2014). *Methane and carbon dioxide emissions from 40 lakes along a north–south latitudinal transect in Alaska*. Biogeosciences Discussions, 11(9), 13251-13307.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B. & Miller, H. L. (2007). IPCC, 2007: *summary for policymakers. Climate change*, 93-129.
- Stallard, R. F. (1998). *Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial*. Global Biogeochemical Cycles, 12(2), 231-257.
- Thauer, R. K., Kaster, A. K., Seedorf, H., Buckel, W., & Hedderich, R. (2008). *Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation*. Nature Reviews Microbiology, 6(8), 579-591.

Wetzel, R. (2001). *Oxygen*. En R. Wetzel, *Limnology: lake and river ecosystems* (págs. 151-168). Gulf Professional Publishing.

Yang, H., Xing, Y., Xie, P., Ni, L., & Rong, K. (2008). *Carbon source/sink function of a subtropical, eutrophic lake determined from an overall mass balance and a gas exchange and carbon burial balance*. *Environmental Pollution*, 151(3), 559-568.