



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR  
DE SAN ANDRÉS TUXTLA**

**TITULACIÓN INTEGRAL  
TESIS PROFESIONAL**

**“MEDICIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO  
INVERNADERO DE LOS HUMEDALES URBANOS DE  
XALAPA, VER.”**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**BIANKA SUZETH ALONSO FONSECA**

**ASESOR INTERNO**

**DRA. VIOLETA ALEJANDRA BASTIÁN LIMA**

**DIRECTOR EXTERNO**

**DRA. MARIA ELIZABETH HERNANDEZ ALARCON**



27291

GOBIERNO DEL ESTADO DE VERACRUZ DE IGNACIO DE LA LLAVE

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA



ACTA DE EXAMEN PROFESIONAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA

En la Ciudad de San Andrés Tuxtla, Ver., a los 28 días del mes de NOVIEMBRE de 2023, siendo las 12:00 HORAS, se reunieron en la Sala de Titulación del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, clave 30EIT0001U los integrantes del Jurado:

Presidente (a): DRA. VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA  
Secretario (a): M.C./Q. INDRÁ DE LA O. ORTIZ  
Vocal: M.C./A. DAMARIS DE LOS ANGELES GARCIA GRACIA

Y de acuerdo a las disposiciones reglamentarias en vigor sobre la Titulación Integral, se procedió a efectuar el Acto de Recepción Profesional a el (la) C. BIANKA SUZETH ALONSO FONSECA No. de control 181U0305 egresado(a) del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, pasante de la carrera de INGENIERIA AMBIENTAL.

Tomando en cuenta los integrantes del Jurado, el contenido del Trabajo Profesional, cuyo tema es: 1.-TESIS PROFESIONAL "MEDICION DE LA EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LOS HUMEDALES URBANOS DE XALAPA, VER." y la réplica del mismo, dictaminó que fuera Aprobada

El (la) Presidente (a) del Jurado le hizo saber al sustentante el resultado obtenido, el Código de Ética Profesional y le tomó la Protesta de Ley. Dándose por terminado el Acto a las 13:00 horas, se asentó la presente en el Libro para Actas de Examen Profesional por Titulación Integral No VI a las 40 fojas, autorizado por la H. Junta Directiva del Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla, con fecha 05 de JUNIO de 2023 y una vez escrita, leída y aprobada la firmaron para constancia las personas que en el acto intervinieron.

Para los usos legales correspondientes se expide la presente en la Ciudad de San Andrés Tuxtla, Veracruz, a los 28 días del mes de NOVIEMBRE del año 2023.

PRESIDENTE(A)

VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA  
DOCTORA EN DESARROLLO REGIONAL  
CEDULA PROFESIONAL: 2045733



SECRETARÍA  
INDRÁ DE LA O. ORTIZ  
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA  
CEDULA PROFESIONAL: 5114716

DAMARIS DE LOS ANGELES GARCIA GRACIA  
MAESTRA EN CIENCIA EN INGENIERIA AMBIENTAL  
CEDULA PROFESIONAL: 12229287



VERACRUZ  
GOBIERNO  
DEL ESTADO



SEV  
Secretaría  
de Educación



DET  
Departamento  
de Estudios  
Técnicos



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
SAN ANDRÉS TUXTLA



"2023: 200 años de Veracruz de Ignacio de la Llave, cuna del Heroico Colegio Militar 1823-2023"

Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla

Asunto: Constancia  
San Andrés Tuxtla, Ver. a 29 de noviembre de 2023

**A QUIEN CORRESPONDA:**

**PRESENTE**

Por medio de la presente se hace constar que la **Dra. María Elizabeth Hernández Alarcón**, fue designada y fungió como **Directora Externa** de la Tesis de la alumna **Blanca Suzeth Alonso Fonseca** con numero de control 181U0305 de la carrera de Ingeniería Ambiental. La tesis se titula **"Medición de la emisión de gases de efecto invernadero de los humedales urbanos de Xalapa, Ver"**, la cual ha sido presentada y aprobada el día 28 de noviembre de 2023.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**

*"Transformarse para trascender"*

M.I.A. Octavio Obil Martínez  
Director Académico



c.c.p.

Archivo consecutivo  
OOM/lcss"



**200**  
VERACRUZ  
CUNA DEL HEROICO  
COLEGIO MILITAR  
1823 - 2023



# FORMATO DE LIBERACIÓN



## FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Lugar: San Andrés Tuxtla, Veracruz Fecha: 23/03/2023  
Asunto: Liberación de proyecto para la Titulación integral.

LIC. MARIELA BERNAL VILLEGAS  
Jefe del Departamento de Estudios Profesionales del ITSSAT

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado:	ALONSO FONSECA BIANKA SUZETH
Carrera:	INGENIERÍA AMBIENTAL
No. de Control:	181U0305
Nombre del Proyecto:	MEDICIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LOS HUMEDALES URBANOS DE XALAPA, VER.
Producto:	1.-TESIS PROFESIONAL

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

MCIA JESSICA ALEJANDRA REYES LARIOS  
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

 D.D.R. VIOLETA ALEJANDRA BASTIAN LIMA	 M.C.I.Q. INGRID DE LA O ORTIZ	 M.C. DAMARIS DE LOS ANGELES GARCIA GRACIA
Nombre y firma del asesor	Nombre y firma del revisor*	Nombre y firma del revisor*

\* Solo aplica para el caso de tesis o tesina.

Carr. Costera del Golfo S/N, KM 140+100  
Loc. Maticapan, Mpio, San Andrés Tuxtla, Ver.  
C.P. 95804 A.P. 110  
Tel: 01(294)9479100 ext. 131  
9479107

# AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES



## Autorización de Impresión para Titulación Integral

San Andrés Tuxtla, Ver. 08 de noviembre del 2023

OPCION: 1.-TESIS PROFESIONAL

### INTEGRANTES

Nombre del Estudiante	No. de Control	Carrera	Plan de Estudios
ALONSO FONSECA BIANKA SUZETH	181U0305	INGENIERÍA AMBIENTAL	IAMB-2010-206

De acuerdo con el Reglamento de Titulación Vigente y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo a su trabajo profesional para la obtención del título a nivel licenciatura, comunico a Usted que este departamento concede la autorización para que proceda a la impresión del proyecto denominado:

## "MEDICIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LOS HUMEDALES URBANOS DE XALAPA, VER."

Atentamente

\_\_\_\_\_  
LIC. MARIELA BERNAL VILLEGAS  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
SAN ANDRÉS TUXTLA

DEPARTAMENTO  
DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a mi abuela por ser mi motivación de cada día y brindarme su apoyo incondicional durante todo el trayecto de mi formación.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para la realización del documento profesional de licenciatura en el Instituto de Ecología A.C.

Al Instituto de Ecología A.C. por abrir sus puertas para mí y por permitirme la realización de este proyecto.

A la Red de Manejo Biotecnológico de Recursos del INECOL, especialmente a la Dra. María Elizabeth Hernández Alarcón, por su apoyo y disposición, ya que sin ella no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Agradezco a la Dra. Violeta Alejandra Bastián Lima, por brindarme su apoyo, tiempo y por confiar en mi durante la realización de este trabajo.

Especial agradecimiento al Biól. Alejandro Hernández Sánchez, técnico de la Red de Manejo Biotecnológico de Recursos, por su apoyo en campo y laboratorio, que hicieron posible la realización de esta tesis

De la misma forma agradezco a todos los maestros por parte del Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla por sus enseñanzas en clases durante cuatro años, sin ellos no sería posible la realización mi formación académica.

## INDICE

<b>FORMATO DE LIBERACIÓN.....</b>	<b>II</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRPCION DEL PROBLEMA.....	4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3 HIPÓTESIS.....	5
1.4 OBJETIVOS .....	5
1.4.1 GENERAL.....	5
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	5
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.6 ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.2.1 DEFINICIÓN DE HUMEDALES.....	12
2.2.2 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES.....	13
AGUA .....	13
SUELO .....	14
PLANTAS .....	14
2.2.3 SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS HUMEDALES .....	15
APROVISIONAMIENTO .....	15
REGULACIÓN.....	16
CULTURALES.....	16
2.2.4 LOS HUMEDALES Y EL CAMBIO CLIMATICO .....	17
2.2.5 MECANISMOS POR LOS QUE SE PRODUCEN LOS GEI EN LOS SUELOS DE HUMEDALES.....	19
<b>2.3 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>20</b>
2.3.1 HUMEDALES URBANOS.....	20
2.3.2 CAMBIO CLIMÁTICO.....	21
2.3.3 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) .....	22

DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	23
METANO (CH <sub>4</sub> ) .....	23
ÓXIDO NITROSO (N <sub>2</sub> O) .....	24
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>8</b>
3.1 SITIO DE ESTUDIO .....	26
3.2 CAMPAÑAS DE MUESTREO .....	27
3.3 MUESTREO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CO <sub>2</sub> Y CH <sub>4</sub> ) .....	29
3.4 NIVEL DE AGUA .....	31
3.5 CÁLCULO DEL FLUJO DE GAS .....	32
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	32
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
4.2.1 EMISIONES DE CH <sub>4</sub> .....	35
VARIACIONES ESPACIALES DENTRO DE CADA HUMEDAL .....	35
VARIACIONES TEMPORALES POR MES ENTRE CADA HUMEDAL .....	36
COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES ENTRE LOS HUMEDALES .....	38
ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	38
4.2 EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	39
VARIACIONES ESPACIALES DENTRO DE CADA HUMEDAL .....	39
VARIACIONES TEMPORALES POR MES ENTRE CADA HUMEDAL .....	40
COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES ENTRE LOS HUMEDALES .....	42
ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	42
4.3 NIVEL DE AGUA Y TEMPERATURA DEL SUELO .....	43
<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>



<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Diagrama esquemático que muestra los principales componentes del balance de carbono en un humedal y sus intercambios de carbono con la atmósfera.	17
2.2	Efecto invernadero, nótese el cambio de longitud de onda entre la luz que incide en la superficie terrestre (visible y ultravioleta) y la que es reflejada por la superficie terrestre una vez que se ha calentado (infrarrojo).	22
3.1	Localización de los humedales de estudio en la ciudad de Xalapa, Ver.	26
3.2	Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal molino de San Roque.	27
3.3	Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Santa Fe.	28
3.4	Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Maver	28
3.5	Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Los Patos	28
3.6	Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Santuario Bosque de Niebla	28
3.7	Cámara terrestre para la toma de gases	30
3.8	Cámara acuática para la toma de gases.	30
4.1	Gráfica de los promedios de emisiones de CH <sub>4</sub> de cada cámara durante los cuatro meses por cada humedal: a)HSBN, b)HLP, c) HSF, d) H MV y e) HMSR.	36
4.2	Gráficas de los promedios por meses de las emisiones de CH <sub>4</sub> de cada humedal: a) HSBN, b) HLP, c) HSF, d) H MV y e) HMSR.	38
4.3	Gráfica de los promedios totales de emisiones de CH <sub>4</sub> por cada humedal	38
4.4	Gráfica de los promedios de emisiones de CO <sub>2</sub> de cada cámara durante los cuatro meses por cada humedal: a)HSBN, b)HLP, c) HSF, d) H MV y e) HMSR.	40
4.5	Gráficas de los promedios por meses de las emisiones de CO <sub>2</sub> de cada humedal: a) HSBN, b) HLP, c) HSF, d) H MV y e) HMSR.	41
4.6	Gráfica de los promedios totales de emisiones de CO <sub>2</sub> por cada humedal.	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
5.1	Promedios de emisiones de CH <sub>4</sub> por humedal en orden de menor a mayor.	45
5.2	Promedios de emisiones de CO <sub>2</sub> por humedal en orden de menor a mayor.	45

## LISTA DE ECUACIONES

No. Ecuación		Página
1	VP= nRT	32

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

GEI	Gases de efecto invernadero
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NO <sub>3</sub>	Nitrato
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
C	Carbono
H <sub>2</sub> O	Agua
Fe	Fierro
SO <sub>4</sub>	Sulfato
Ppm	Parte por millón
M	Metros
L	Litros
PVC	Policloruro de vinilo
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
Mg m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>	Miligramos por metro cuadrado por minuto
ml min <sup>-1</sup>	Mililitros por minuto
Ft	Pies
K	Temperatura
Atm	Atmósfera
Cm	Centímetros
Ppm /min	Partes por millón sobre minutos
V	Volumen
Mm	Milímetros
MI	Mililitros
RAMSAR	Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional
ANOVA	Analysis of Variance
C1	Cámara 1
C2	Cámara 2
C3	Cámara 3
C4	Cámara 4
HSBN	Humedal santuario bosque de niebla
HLP	Humedal los patos
HSF	Humedal santa fe
HMV	Humedal maver
HMSR	Humedal molino de san roque

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en los humedales urbanos de Xalapa, Ver., para conocer si los niveles de perturbación tienen relación con las emisiones de estos gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), o si otros factores como los niveles de agua superficial y las temperaturas del suelo en los humedales urbanos tienen influencia sobre los niveles de emisiones.

Con mediciones mensuales durante cuatro meses, se utilizó la técnica de la cámara cerrada en la toma de muestras de gases para posteriormente ser analizadas por medio de la cromatografía de gases, además, se realizó una investigación acerca de las variaciones del nivel de agua y la temperatura del suelo, con el propósito dar a conocer si estos factores tienen relación alguna con las emisiones de los gases con los que se trabajó.

Los resultados indicaron que la perturbación en los humedales urbanos de Xalapa si tienen influencia en las emisiones de gases de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , dando a conocer también que el factor temperatura no tiene gran influencia en las emisiones, a diferencia del nivel de agua superficial, el cual se concluyó que es uno de los principales factores que interviene en aumento y disminución de las emisiones de estos dos gases de efecto invernadero.

## **ABSTRACT**

This work presents an evaluation of greenhouse gas emissions in the urban wetlands of Xalapa, Ver., to find out if the disturbance is related to the emissions of these gases (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), or if other factors such as surface water levels and soil temperatures in urban wetlands have influence and emission levels.

With measurements once a month during four months, the closed chamber technique was used to take gas samples which later were analyzed by gas chromatography, in addition, strenuous research was carried out in studies about the variations of the water level and the soil temperature, in this way to find out if these factors have any relation with the emissions of the gases with which we worked.

Results demonstrated that the disturbance in the urban wetlands of Xalapa does have an influence on the emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gases, also showing that the temperature factor does not have a great influence on emissions, unlike the level of surface water, which was concluded to be one of the main factors involved in increasing and decreasing emissions of these two greenhouse gases.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales son zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos, que se caracterizan por tener el suelo inundado o saturado de agua por largos periodos que permiten el crecimiento de vegetación adaptada a vivir bajo dichas condiciones [1]. Los humedales ocupan solo entre el 4 y el 6% de la superficie de la tierra, sin embargo, se consideran de suma importancia globalmente por su potencial para almacenar carbono. Dicha capacidad se debe a la alta productividad de la vegetación de los humedales, que captura el  $\text{CO}_2$  atmosférico y lo convierte en carbono orgánico mediante la fotosíntesis. Cuando los residuos de las plantas llegan al suelo, éstos se descomponen lentamente debido a las condiciones anaerobias que predominan en los suelos inundados, favoreciendo la acumulación de materia orgánica semi-descompuesta llamada turba. Sin embargo, en estos suelos se llevan a cabo procesos anóxicos y anaerobios como la desnitrificación y metanogénesis cuyos productos finales entre otros son el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ), los cuales son gases de efecto invernadero [2]. En el caso del metano, no todo el gas que se produce en los humedales es liberado a la atmósfera, pues parte del metano que se produce en las zonas anaeróbicas es oxidado por las bacterias metano tróficas en las partes aeróbicas, principalmente en la zona de la rizosfera. En los humedales, la mayor parte del carbono almacenado se encuentra en el suelo (87% en promedio), mientras que el almacén de carbono de la biomasa aérea y raíces en promedio es el 13%. Estos datos contrastan con los almacenes de carbono en bosques terrestres, donde el carbono en el suelo representa sólo el 51% y el carbono de la biomasa aérea es el 35%, mientras que en las raíces y mantillo se encuentra el restante 14%.

Desde hace algún tiempo se ha reconocido que la captura de carbono por los ecosistemas es una alternativa de bajo costo para mitigar las emisiones de carbono a la atmósfera. En numerosos estudios se ha dicho que los humedales son una solución natural que ayudan a reducir la emisión de carbono a la atmósfera, contribuyendo a mitigar el cambio climático. En un entorno urbano, los humedales



son un ecosistema invaluable para mitigar problemas urbanos frecuentes como la contaminación del aire, la carencia de agua, las inundaciones y la contaminación por aguas negras. Sin embargo, a pesar de todos los servicios ambientales que los humedales proveen al entorno urbano, es también este ambiente el que se vuelve hostil para dichos ecosistemas. Los humedales urbanos son frecuentemente utilizados como tiraderos de basura, son rellenados para construir casas o parques en ellos, pastorean animales en ellos, y el agua es contaminada por escorrentías urbanas. La degradación de los humedales urbanos puede incrementar la emisión de gases de efecto invernadero en ellos y por lo tanto disminuir su capacidad como sumideros de carbono.

# **CAPÍTULO I**

---

GENERALIDADES

## 1.1 DESCRPCION DEL PROBLEMA

México posee aproximadamente 0.6 % de los humedales a nivel global, es decir, cerca de 3,318 500 ha [3], de las que 1,567 000 ha les corresponden a superficies de humedales costeros o estuáricas [4] y 1 751 500 ha a humedales continentales [5]. El país ha degradado 62.1% de sus humedales [6]. Los humedales urbanos están sujetos a disturbios, generalmente porque se quieren utilizar como terrenos para construir casas o negocios. La perturbación de los humedales urbanos, por desecación o por contaminación del agua puede disminuir su capacidad como sumideros de carbono al aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero en ellos. La población aledaña a los humedales es quien más influencia tiene en las perturbaciones y en muchas ocasiones es por ignorancia del funcionamiento de los humedales.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presencia de humedales urbanos ejerce un gran impacto sobre el clima, tanto a nivel local como global, en función de su tasa de evapotranspiración, esto aunado a que los humedales representan importantes reservorios de carbón, al tener un mal manejo de estos ambientes puede repercutir en aumento de gases tipo invernadero [7]. El estudio de los almacenes de carbono y emisión de gases de efecto invernadero en el estado de Veracruz, se ha llevado a cabo principalmente en humedales costeros en zonas rurales. Sin embargo, poco se sabe de la función de los humedales urbanos de montaña como sumideros de carbono. Estos humedales cuentan con un potencial de almacenamiento de carbono, pero actividades humanas que conllevan drenados, quemas y pastoreos causan la liberación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por tal razón que el cuidado de los humedales se encuentra en un momento crítico con relación a la regulación del ciclo de carbono en el suelo y su influencia con el cambio climático [8]. Este proyecto busca evaluar los niveles de emisión de gases de efecto invernadero y factores que tienen influencia en estas emisiones.

### 1.3 HIPÓTESIS

Los humedales urbanos de Xalapa tienen diferente grado de perturbación, lo cual afectará la emisión de gases de efecto invernadero, esperándose que a mayor perturbación más emisión de gases.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 GENERAL

Medir la emisión de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ) en humedales urbanos de Xalapa, Ver.

#### 1.4.2 ESPECÍFICOS

- Investigar si existen variaciones temporales debidas a las variaciones de la temperatura del suelo y nivel de agua en las emisiones de gases de efecto invernadero en humedales urbanos de Xalapa, Ver.
- Medir la emisión de gases de efecto invernadero en suelos de humedales urbanos de Xalapa.
- Analizar factores influyentes presentes en cada humedal urbano de Xalapa.

### 1.5 JUSTIFICACIÓN

Los humedales son muy importantes a nivel global por tener la capacidad de almacenar carbono, mediante el proceso de fotosíntesis de las plantas y gracias a sus suelos inundados la materia orgánica suele descomponerse en un periodo de tiempo mayor al habitual [8].

Los humedales urbanos están expuestos a varias perturbaciones debido al crecimiento urbano. Dichas perturbaciones incluyen, desecación o relleno, invasión de pastos invasores, disminución del hidropéridos y contaminación del agua. Todos estos disturbios pueden afectar los ciclos biogeoquímicos en los suelos de los humedales y por consecuencia la emisión de gases de efecto invernadero. La contribución del metano ( $\text{CH}_4$ ) al calentamiento global es de tal importancia, ya que

su potencial de calentamiento global es 20 veces mayor que el de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), aunque la concentración de este gas de efecto invernadero en la atmósfera sea menor al del  $\text{CO}_2$ . Los humedales se consideran como una de las fuentes importantes emisoras de  $\text{CH}_4$ , abarcando un porcentaje de 40 al 55% de emisiones anuales a nivel global. Los humedales son considerados sumideros de carbono (C), ya que tiene una gran capacidad de almacenar la biomasa vegetal en sus suelos [9].

Este proyecto busca evaluar la capacidad de los humedales urbanos de Xalapa, Ver., como fijadores de carbono y realizar estudios comparativos para identificar entre los tres humedales a analizar, cual tiene un mayor potencial como sumidero de carbono además de conocer los factores que influyen en estos humedales urbanos.

## 1.6 ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto se llevó a cabo en tres humedales de estudio Humedal Santa Fe, Humedal Maver y Humedal Molino de San Roque; se tomaron datos de referencia de los humedales: Santuario Bosque de Niebla y Humedal Los Patos, por la magnitud del proyecto, así como las condiciones climatológicas en Xalapa y la duración del proyecto (4 meses). Las actividades a realizadas fueron la toma de gases por el método de la cámara cerrada una vez al mes por cada humedal.



# **CAPÍTULO II**

---

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 2.1 ANTECEDENTES

Se presentan diversos estudios realizados en diferentes humedales del mundo los cuales tienen como tema común las emisiones de gases de efecto invernadero, a continuación, se muestran esos estudios:

En esta investigación se evaluó sistemáticamente el impacto de los cambios hidrológicos en la comunidad microbiana de los humedales y la actividad metabólica del carbono, incluida las emisiones de gases de efecto invernadero, realizado en ocho sitios de estudio ubicados en un humedal subtropical de Dajiuhu, en China central. Los resultados mostraron que el humedal impacta significativamente en la abundancia microbiana relativa y estructural de la comunidad, teniendo un flujo de CH<sub>4</sub> alto cuando la turba estaba inundada, mientras que el CO<sub>2</sub> no mostró una diferencia tan dramática entre los distintos periodos [10].

En este estudio se investigó la correlación potencial en las emisiones de gases de efecto invernadero, midiendo las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> antes y después de la presencia de agua, además de estudiar la estructura de la comunidad procariota, llevado a cabo en el área semiárida de Noorong, dentro de la cuenca del río Murray en Nueva Gales del Sur. Para las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se utilizó la técnica de la cámara estática cerrada y las tasas de emisión utilizando una ecuación de flujo estándar. A diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub>, las emisiones de CH<sub>4</sub> mostraron una correlación negativa con el carbono liberado, y se mostró que la rehabilitación hidrológica tuvo un impacto positivo en el ecosistema de humedales al disminuir las emisiones de GEI [11].

En el siguiente estudio se evaluó los efectos del cambio del uso de la tierra, las estaciones y las propiedades del suelo de los humedales en la región tropical. Se realizaron mediciones de campo de las tasas de emisión de tres GEI predominantes (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) de áreas convertidas a tierras agrícolas y áreas no convertidas

del humedal Anyiko en el condado de Siaya Kenia. Las muestras fueron tomadas bajo la técnica de la cámara cerrada. El enfoque de análisis, comprendía análisis de árboles de decisión para determinar los efectos principales y de interacción, donde el humedal presento emisiones y absorción de CH<sub>4</sub>. En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub> no presentaron diferencias significativas, mientras que para las emisiones de N<sub>2</sub>O fueron bastante diversas [12].

Esta investigación se centró en cuatro tipos de humedales en la parte baja del Rio Amarillo que se encuentra en condados de Fenggiu y Changyuan en el estado de Xinxiang provincia de Henan, como sitios de estudio fueron tomados cuatro humedales, donde se investigaron las características de las emisiones de GEI y sus variaciones debido al cambio del tipo de suelo. Se presentaron flujos de CO<sub>2</sub> significativamente diferentes entre los cuatro tipos de humedales, las actividades que se realizaron cerca del Rio Amarillo han afectado el patrón de distribución de los contenidos de C y N del suelo y la actividad de la comunidad microbiana del suelo, lo que ha impulsado el proceso de cambio de C y N entre el suelo y la atmosfera, además que influyó en las comunidades de bacterias y luego actúa sinérgicamente sobre las emisiones de GEI. La humedad y la temperatura fueron factores claves que afectan las emisiones de N<sub>2</sub>O [13].

Se realizó un estudio de gases de efecto invernadero en diferentes tipos de humedales construidos, ubicados en el Jardín botánico “Francisco Javier Clavijero” en la ciudad de Xalapa y otro a escala piloto en la comunidad del municipio de Pinoltepec, Ver. construidos con plantas ornamentales a diferentes escalas, así como conocer el efecto del flujo de agua, tipo de sustrato, la densidad de la planta, siendo abastecidos con aguas residuales urbanas sin tratar de la ciudad, donde se tomaron muestras de las emisiones de gases dos veces al mes durante seis meses, siendo analizadas por su CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Concluyendo que las emisiones de GEI en los mesocosmos de humedales se vieron afectados por el tipo de sustrato y flujo de agua [14].

De acuerdo a un estudio realizado por [15], donde se cuantificó las reservas de carbono y la emisión de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  en manglares, ubicados en tres lagunas costeras del Estado de Veracruz los flujos de gases se midieron in situ una vez al mes durante un año, Las variaciones estacionales en los flujos de metano revelaron diferentes patrones entre los manglares estudiados, sobre las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  se mostraron emisiones significativamente más altas durante las estaciones ventosas y secas. Los factores que influyeron en las emisiones de metano en los manglares fueron la vegetación, la salinidad y el pH. En cuanto al  $\text{N}_2\text{O}$  los factores que presentaron mayor influencia fueron las concentraciones de nitrato y temperatura del suelo.

Uno de los objetivos de este proyecto es conocer si la temperatura del suelo y el nivel del agua, además de la perturbación presente en los humedales, tiene alguna relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente en gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Por lo que se realizó una investigación de algunos humedales del estado en los cuales ya se habían realizado análisis de temperaturas y nivel de agua, con relación a dichas emisiones, información que se presenta a continuación.

En un estudio realizado por [2], acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero en humedales costeros de agua dulce, en el estado de Veracruz, menciona que en los humedales presentaron temperaturas que oscilaron entre 18 y 35 °C, esto se notó durante la estación seca y no se encontraron diferencias significativas. Dentro del mismo estudio, los niveles de agua oscilaron entre 90 y 25 cm, sin diferencias significativas entre los humedales que se estudiaron. Sin embargo, los niveles de agua por temporada se mostraron significativamente diferentes con valores mayores en las temporadas de lluvia y viento, en comparación con los niveles obtenidos en la estación seca, y no se observaron diferencias significativas entre humedales con diferentes comunidades vegetales. La presencia de agua en el suelo, fue uno de los principales factores que intervinieron en la variación de las emisiones de los GEI, durante la estación seca, los niveles de agua estaban por debajo de la superficie del suelo aumentando las condiciones de oxidación y por lo tanto disminuyó las emisiones de  $\text{CH}_4$  y aumentaron las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

En otro estudio [16] realizado en humedales de agua dulce dentro del estado de Veracruz, menciona que cuando se promediaron los valores del nivel de agua por cada estación, se observó diferencias significativas con valores más altos en la estación lluviosa y las estaciones ventosas a comparaciones con los niveles de agua observados durante la estación seca. Las temperaturas del suelo en los humedales oscilaron entre 19 y 37°C, las estaciones tuvieron un efecto significativo sobre las temperaturas del suelo, con temperaturas más bajas durante la estación ventosa en comparación con las estaciones lluviosas. En relación con las emisiones tanto de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> los flujos fueron significativamente por la estación, con mayores emisiones de CH<sub>4</sub> durante las estaciones lluviosas y ventosas, en comparación con la estación seca, al contrario, con las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que se observaron flujos altos durante los meses de estación seca y flujos bajos en estaciones de lluvia y viento.

En una investigación [9], acerca de los suelos de humedales como fuentes de metano, menciona que la presencia de agua superficial tiene una fuerte influencia sobre la producción de CH<sub>4</sub> en humedales. En [17], compararon las emisiones de CH<sub>4</sub> en humedales de zonas tropicales de indonesia y de zonas templadas en Japón. Encontrando que las emisiones de CH<sub>4</sub> más altas se presentaron en la zona templada, que permanecieron inundados por largos periodos, mientras que en los bosques tropicales que fueron inundados intermitentemente, resultaron bajas emisiones de este gas.



## 2.2 MARCO TEÓRICO

### 2.2.1 DEFINICIÓN DE HUMEDALES

Existen varias definiciones de lo que se considera un humedal, según lo planteó Keddy (2000), lo define como *“un ecosistema que se forma cuando inundaciones por agua producen que los suelos sean dominados por procesos anaeróbicos que fuerzan a la biota, particularmente a plantas arraigadas, a exhibir adaptaciones para tolerar la inundación”* [18].

La convención internacional de Ramsar (2017), define los humedales como: *“Ecosistemas tanto naturales como artificiales que se hallan permanente o temporalmente inundados, ya sea por aguas dulces, salobres o salinas, estancadas o corrientes, y que incluyen regiones ribereñas, costeras o marinas, que no excedan los 6 m de profundidad 19]*.

A nivel nacional, definidos por la Ley de Aguas Nacionales como: *“Zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional, las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos”* [20].

Otra definición de humedal la ofrece la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, citado por Fariña y Camaño (2012), que establece *“Los humedales son ecosistemas que dependen de la inundación o saturación de la superficie del sustrato, sea esta constante o temporal, la cual determina las características físicas, químicas y biológicas del ecosistema”* [21].

El comité para la caracterización de los humedales de los Estados Unidos (1995), presenta la siguiente definición para humedales, *“Es un ecosistema que depende de un sistema constante o recurrente de inundación poco profunda o de saturación en o cerca de la superficie del sustrato. Las características esenciales mínimas de*

*un humedal son la inundación o saturación recurrente o sostenida en o cerca de la superficie y la presencia de rasgos físicos, químicos y biológicos que reflejan dichos procesos. Entre las características diagnosticadas más comunes de los humedales son los suelos hidro mórficos y la vegetación hidrofítica. Estas características deberán estar presentes, excepto cuando factores específicos físico químicos, bióticos y antropogénicos las hayan removido o bien no permitan su desarrollo”.* Existen numerosas definiciones para el término humedal, esto quizás se deba a la gran variedad de tipos de climas, características geomorfológicas y diferentes condiciones en su hidrología [22].

## 2.2.2 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES

### AGUA

La condición ecológica de los humedales como origen de biodiversidad está relacionado con sus características hidrológicas, ya que son estas la que determinan el hidropериodo, actividad que tiene relación con el aumento o disminución de los niveles de agua superficial o subterránea e influenciado por las entradas y salidas [23]. En los humedales la hidrología es extremadamente variada y dinámica. Los gradientes de salinidad van de agua salada a agua dulce y las mareas pueden tener o no un impacto. Generalmente los humedales se encuentran conectados por cuerpos de agua superficiales, ya sean lagos, lagunas, ríos y mares. Además, también existen humedales en donde su principal fuente son aguas subterráneas [24].

Los humedales cuya fuente de agua es subterránea regularmente se encuentran en lugares donde el nivel freático no se encuentra tan distante de la parte superficial del terreno. En ellos, el agua constituye un factor importante en el desarrollo de los suelos, la vegetación y el paisaje [25].

Las aguas subterráneas forman más del 97% del agua dulce disponible en el mundo [26], con el tiempo son la principal fuente segura para abastecimiento humano, y contribuyen a las demandas de actividades económicas [20].

## SUELO

Los humedales están constituidos por suelos hídricos, término que es usado como sinónimo de suelos de humedales, estos suelos poseen una delgada capa aerobia en la parte superficial de la columna de agua [27]. En los espacios intermedios del suelo es movido por el agua, causando condiciones anaeróbicas, favoreciendo procesos biogeoquímicos como el almacenamiento de materia orgánica y la reducción del hierro y otros elementos reducibles como el magnesio [29]. Tales procesos causan cambios en la apariencia de los suelos de humedales, estas características llevan por nombre “reacciones redoximórficas” [29]. Estas características redoximórficas prevalecen aún si el humedal se encuentra drenado, es así como se pueden reconocer los suelos de humedal [29].

Las reacciones redoximórficas se pueden agrupar en 3 tipos:

- Concentraciones redox, refiriéndose al almacenamiento de óxidos de hierro y manganeso. Estos óxidos se forman cerca de la rizosfera, a causa del oxígeno transportado de las hojas de las plantas a la raíz que forman motas de un color amarillo-café y gris oscuro.
- Disminución de redox, refiriéndose a los valores bajos de croma (son menor a 2), en la carta de colores de suelo Munsell, presentes en los humedales.
- Matrices reducidas, El  $Mn^{+4}$  es reducido a  $Mn^{+3}$  y  $Mn^{+2}$  dando una coloración grisácea.

## PLANTAS

La vegetación herbácea presente en los humedales lleva por nombre macrófitas o hidrófitas, las cuales son aquellas plantas que pueden vivir o adaptarse para sobrevivir en terrenos inundados. Siendo estas macrófitas las principales dentro de la cadena alimenticia en los humedales, Algunas plantas acuáticas son muy productivas y en este caso los herbívoros no comen gran parte de la materia orgánica producida, sino que es transformada a detritus entrando así en la cadena alimenticia. Además, las plantas también crean un hábitat para grupos taxonómicos como lo son los microorganismos epifitos, macroinvertebrados y peces [30]. Las

plantas influyen en la química del agua, donde actúan como fuentes o sumideros de nutrientes que son bombeados al sedimento desde la columna de agua.

Otra característica de estas macrófitas es que poseen un tejido arenquimal, lo cual les permite transportar el oxígeno a las raíces que se encuentran por encima del nivel del suelo, influenciando el potencial redox, indicador de la disponibilidad de electrones en el sedimento.

### 2.2.3 SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS HUMEDALES

Para el Millennium Ecosystem Assessment (2005) la situación es poco esperanzadora, dando importancia al cambio climático global ya que es uno de los factores con mayor influencia en la degradación, pérdida y función de los humedales. De acuerdo con dicho documento de referencia, define los servicios ambientales como “los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas”, y los clasifica en servicios de aprovisionamiento, regulación, y culturales [31].

#### APROVISIONAMIENTO

La principal fuente de agua dulce renovable para uso humano, descende de una serie de humedales interiores, donde se incluyen lagos, ríos, acuíferos subterráneos poco profundos. Se estima que una tercera parte del suministro de esta agua a nivel global es accesible para la población, teniendo en cuenta su proximidad física y su variación con el tiempo. El agua subterránea, regularmente recargada a través de humedales, toma un papel importante en el suministro de agua, brindando un aproximado de entre 1.500 y 3.000 millones de personas con agua potable, además, es fuente de agua para el 40 % del uso industrial y el 20% de riego.

Algunos alimentos, como el pescado y productos pesqueros son servicios de importancia en los países en desarrollo, debido a que es una de las fuentes principales de proteína animal para comunidades rurales. En África, la pesca y la recolección de plantas acuáticas en llanuras aluviales y pantanos es el principio de subsistencia e ingresos para comunidades locales.

También se tienen servicios de aprovisionamiento como fibras, combustible, productos bioquímicos, y materiales genéticos, beneficiosos para el ser humano.

## REGULACIÓN

Los humedales brindan un importante servicio al tratar y desintoxicar una variedad de productos de desecho, ya que el agua que fluye a través de estos, resulta considerablemente más limpia al salir del humedal. Algunos humedales construidos de manera artificial se han desarrollado principalmente para tratar efluentes de aguas residuales ricos en nitrógeno, esto debido al paso relativamente lento del agua, dando el tiempo para que los patógenos sean consumidos por otros organismos del ecosistema o pierdan su viabilidad.

Los sistemas de agua continentales, contribuyen con el desempeño de dos funciones fundamentales, aunque contrastantes en la mitigación de los efectos del cambio climático; regulación de los GEI (principalmente el dióxido de carbono) y la moderación física de los impactos generados por el cambio climático. Los humedales se identifican como grandes depósitos de carbono, así como fuentes de dióxido de carbono, fuentes netas de secuestro de carbono en sedimentos y por ser transportadores de carbono al mar.

También como controladores de inundaciones y debido a su protección contra tormentas.

## CULTURALES

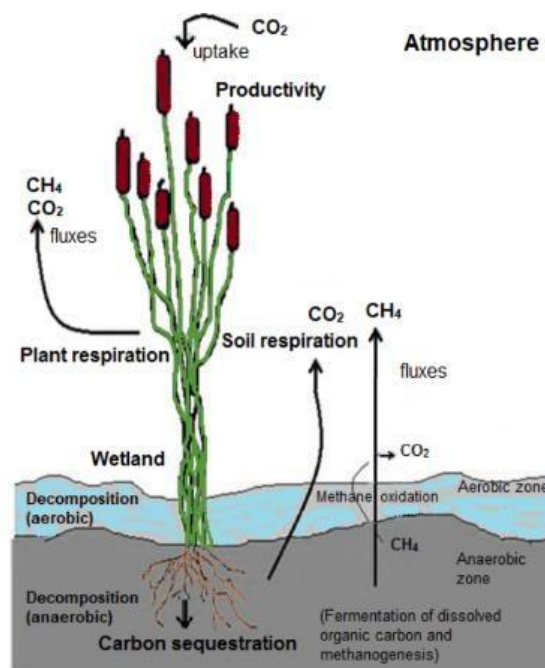
En algunos lugares, la presencia del turismo brinda un apoyo importante a las economías rurales. La demanda de sitios biológicamente ricos, aumenta el valor de hábitats vinculados, como manglares y praderas marinas, ya que ofrecen sentimientos personales y de bienestar, apreciación de las características naturales, así como también la oportunidad de educación.

Sin embargo, el deterioro de los humedales ha puesto a sus servicios ambientales y a las personas dependientes de ello en alto riesgo. Muchos contaminantes de larga vida llegan a transformarse en compuestos con interacciones e impactos

mayormente desconocidos, como consecuencia de la contaminación, muchos humedales han disminuido su capacidad para ser fuentes de agua limpia y fiable.

#### 2.2.4 LOS HUMEDALES Y EL CAMBIO CLIMATICO

Según el concepto promulgado en Ramsar (2000), los humedales sirven como sumideros en un porcentaje cercano al 40% (Ramsar, 2000) del carbono generado en el planeta debido al secuestro o bien captura de carbono que estos realizan, el cual es un proceso físico que conlleva la captura de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y su almacenamiento. En humedales, los componentes más importantes en el ciclo del carbono se muestran en la Figura 2.1, donde distintas reacciones que usan carbono tienen lugar en estos, con procesos claves se tiene la respiración y la fotosíntesis en aeróbicos, además de la metanogénesis, oxidación de metano, reducción de sulfato, hierro y nitrato en áreas anaeróbicas [32], [33].



**Fig. 2.1** Diagrama esquemático que muestra los principales componentes del balance de carbono en un humedal y sus intercambios de carbono con la atmósfera.  
Fuente: [59].

Tal acumulación de carbono en estos ecosistemas es resultado de la productividad primaria y la acumulación de sustancias orgánicas, menos la degradación de materia orgánica (MO). Es un equilibrio que nos permite determinar el funcionamiento que muestra el humedal, actuando como emisor de GEI o bien sumidero de C. La captación de C se realiza mediante 2 componentes principales, vegetación y suelos. Se tiene algunos factores influyentes en la productividad de tales ecosistemas; condiciones climáticas, tipo de especie presente en el sitio, la cantidad de nutrientes e hidropériodo [24].

La degradación de los humedales evitaría la captura de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, por lo tanto, aumentaría el potencial de retención del calor en la atmósfera, implicando al calentamiento global y el aumento de las temperaturas, así como todos sus efectos sobre el sistema climático en general y sobre la vida humana en particular. En otro caso los humedales forman ecosistemas débiles, siendo particularmente vulnerables al cambio climático debido al endemismo regional y otras peculiaridades, naturales y provocadas por el hombre. Como muestra de la alta vulnerabilidad de los humedales al cambio climático, cabe mencionar la información contenida en el tercer informe de evaluación del panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) que algunos humedales se encuentran entre los ecosistemas especialmente vulnerables al cambio climático por su baja capacidad de adaptación, sufriendo daños apreciables e irreversibles [34]. Los humedales pueden verse afectados por el cambio climático de diversas maneras, algunos impactos potenciales son: afectar los procesos ecológicos al provocar modificaciones en la hidrología y otros factores, que favorecen la coexistencia de los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, afectaciones a la flora, fauna, por sequías, eventos de extremas precipitaciones, al a fuentes de abasto de agua por desbalance hídrico, al transporte de sedimentos y nutrientes [35].

## 2.2.5 MECANISMOS POR LOS QUE SE PRODUCEN LOS GEI EN LOS SUELOS DE HUMEDALES

Dentro de los humedales se presentan gradientes de óxido-reducción, que intervienen en las transformaciones y camino de la materia orgánica. Los humedales presentan condiciones aeróbicas en su parte superficial, así como condiciones anaerobias en una profundidad cercana a mayor de 15 cm, donde la densidad de las raíces disminuye [29]. Mediante la fotosíntesis ocurre la captación del carbono convirtiéndose a C orgánico, llega al suelo cuando las plantas llegan a su ciclo de envejecimiento. En primer punto ocurre la hidrólisis de los lípidos, proteínas y los carbohidratos que se encuentran en la biomasa vegetal, según las condiciones de óxido-reducción, el producto de la hidrólisis seguirá una ruta metabólica. En caso que se encuentre en condiciones aerobias, llegan a ser oxidados en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  usando el oxígeno como último aceptor de electrones. Por otra parte, si se tienen condiciones anaerobias, los microorganismos para la obtención de energía química dan uso a la glucosa, dando como producto el acetato, propionato y butirato, que son ácidos grasos que serán convertidos a  $\text{CO}_2$ , haciendo uso del  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mn}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  [24],[36].

En los humedales la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) es obtenida en condiciones altamente reducidas, debido a una variedad de bacterias, dependiendo del sustrato a utilizar [37]. Además, la hidrología tiene gran influencia, ya que, para crear condiciones reducidas, es necesario que el suelo se encuentre inundado por largos períodos. Ocurre una oxidación del metano, en la zona aerobia como anaerobia, las bacterias causantes de esta acción son llamadas metanotróficas y se encuentran mayormente en columnas de agua, así como en la rizósfera [38]. En los humedales que presentan agua salobre por diferentes grupos de Archaea, en sus zonas de cambio de reducción de sulfatos y metanogénesis, presentan una oxidación anaerobia [37].

La emisión de metano a la atmósfera ocurre por medio de 3 mecanismos; difusión pasiva a través de las plantas (también llamado ventilación), difusión a través del



agua y por ebullición o formación de burbujas [39]. El primer mecanismo por las plantas, se da a través del aerénquima, el cual es un espacio vacío presente en el tallo que las macrófitas poseen para traer oxígeno de sus hojas a la raíz [40],[41]). El transporte de metano a través del agua, debido a la baja solubilidad suele ser un mecanismo muy lento [39]. Mientras que la ebullición es referente al paso de burbujas de metano por la columna de agua sin romperse en ella, siendo uno de los más importantes.

La biomasa vegetal presente en los humedales toma un rol importante en la producción, oxidación y transporte de metano a la atmósfera. afectando la producción ya que la cantidad y calidad de los exudados de carbono orgánico de las raíces de macrófitas difiere de especie a especie [42],[43]. Variando en un amplio intervalo la magnitud de las emisiones de metano, ya que su producción puede ser influenciada por distintos factores.

## **2.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1 HUMEDALES URBANOS**

Los humedales urbanos de acuerdo a RAMSAR (2013), los incluye como objetos de conservación. Misma institución define como humedal periurbano a los humedales que colindan con una zona urbana entre los barrios bajos y las zonas rurales; en cuanto a humedales urbanos, son los humedales que se localizan dentro de los límites de ciudades, poblaciones y otras urbanizaciones [44].

La importancia de los humedales urbanos se encuentra en su gran aporte a la diversidad biológica, estética al paisaje [45] y, de acuerdo con Smith y Romero (2009), *“Los humedales ubicados al interior de la ciudad o cercanos a ella, adquieren aún mayor importancia debido a que las funciones y mecanismos naturales de estos ecosistemas deben ser entendidos como servicios ambientales que reportan beneficios directos e indirectos a la humanidad, entre los que se encuentran purificación de aire, regulaciones microclimáticas, reducción de ruido, drenaje del agua de lluvia, tratamiento de aguas residuales y oferta de espacios*

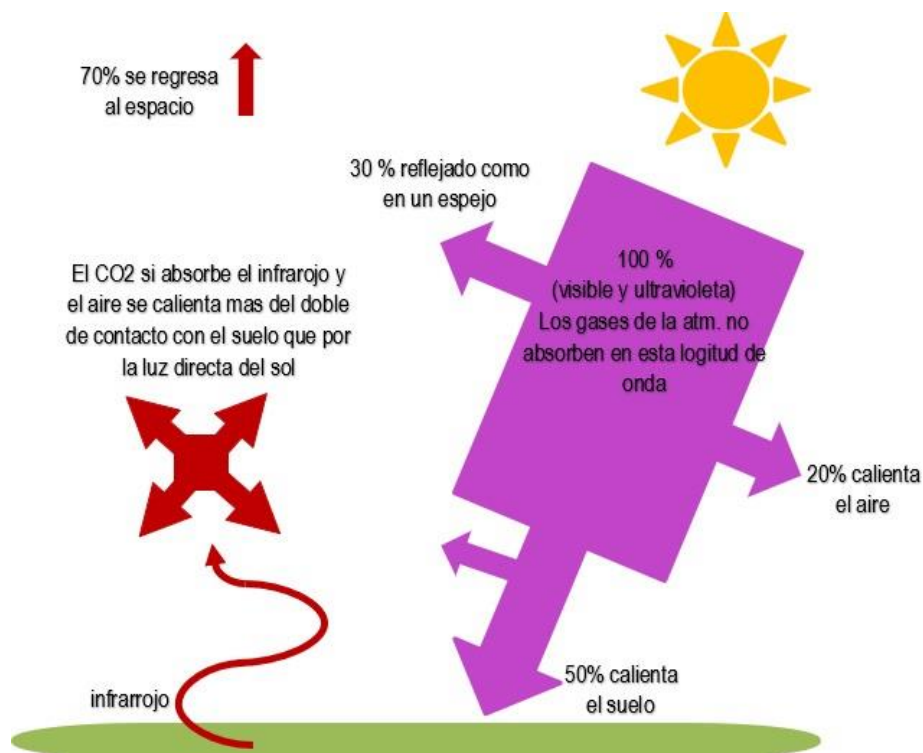
*para la recreación*”, fundamentando la idea de conservar estas áreas verdes dentro de las zonas urbanizadas. Sin embargo, actualmente, en países como Uruguay [46] Colombia [47] y Costa Rica, varios humedales de entornos urbanos comienzan a degradarse o se encuentran ya degradados a causa del crecimiento de la población de los alrededores, debido a la contaminación, el manejo incorrecto de los residuos domésticos, relleno de las zonas pertenecientes a los humedales, aumentando el hecho de que tales actividades han afectado los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales urbanos, a causa de esto no se les reconoce su valor e importancia por parte de los encargados de la toma de decisiones y de las comunidades urbanas [44].

### 2.3.2 CAMBIO CLIMÁTICO

Actualmente se vive una crisis medioambiental sin precedentes. La contaminación atmosférica causa millones de muertes prematuras anuales, incluyendo cientos de niños menores de cinco años. El riesgo ambiental más apremiante es el cambio climático, ya que no solo causa la contaminación atmosférica y la pérdida de la diversidad biológica, sino que implica una amplia gama de situaciones de riesgo para el ser humano. De acuerdo a la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), se entiende al cambio climático como un cambio del clima que es causado directa o indirectamente por la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada con el tiempo.

Existe otro concepto muy importante, el efecto invernadero, siendo un mecanismo por medio del cual la atmósfera de la tierra se calienta, esta atmósfera es una delgada capa de gases que rodea a nuestro planeta, muy importante, ya que en ella residen aquellos gases fundamentales para el desarrollo de la mayor parte de vida en el mundo, su composición química está conformada en su mayor parte por dos gases, nitrógeno (N) en un 79% y oxígeno (O<sub>2</sub>) en un 20%, siendo el 1% restante

gases abundantes; argón (Ar) en un 0.9% y el CO<sub>2</sub> en aproximadamente un 0.03%, siendo este último gas de crucial importancia. Volviendo al efecto invernadero, los gases que conforman a la atmósfera no pueden absorber la luz del sol, de alta energía, dejando pasar la mayor parte a la superficie de la tierra, planteándose que el 30% es reflejado como espejo hacia el espacio, 20 % de energía retenida por la atmósfera y el 50% que resta alcanza la superficie terrestre, calentándola, tal como observamos en la Figura 2.2. Al calentarse la superficie de la tierra transforma la luz solar (de alta energía) en radiación de baja energía (cargadas hacia el infrarrojo) que se reflejan nuevamente a la atmósfera [48].



**Fig. 2.2 Efecto invernadero, nótese el cambio de longitud de onda entre la luz que incide en la superficie terrestre (visible y ultravioleta) y la que es reflejada por la superficie terrestre una vez que se ha calentado (infrarrojo). Fuente: [48].**

### 2.3.3 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Estos son gases en la atmósfera que absorben la radiación de la luz solar, retienen el calor y crean un efecto invernadero; siendo Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano

(CH<sub>4</sub>) y Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) los gases principales de efecto invernadero (IPCC, 2007). Al mismo tiempo, la tasa de crecimiento anual de estos gases en la atmósfera es del 0.5%, 0.3% y 1.1%, respectivamente [49].

### DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

Este GEI, ayuda a mantener la temperatura de la tierra en condiciones habitables. La concentración atmosférica del CO<sub>2</sub> ha aumentado un 50% desde la revolución industrial, siendo de 280 ppm a más de 415 ppm, gas que permanece concentrado en la atmosfera en un periodo de entre 20 y 100 años [50]. La última vez que este gas alcanzó ese nivel fue en el plioceno, hace aproximadamente 3 millones de años, lo que significa que nuestra especie, el *homo sapiens*, nunca ha experimentado esta situación [51], expertos en temas del cambio climático, dentro del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas estiman que las temperaturas globales han aumentado 0.6°C dentro de los últimos 100 años, lo que resulta en una alteración en el equilibrio natural del ciclo de carbono; donde el CO<sub>2</sub> es producto de la fotosíntesis de las plantas y la respiración de los animales hacia la atmósfera.

### METANO (CH<sub>4</sub>)

Este gas se describe como el segundo compuesto que más contribuye al efecto invernadero con un potencial de calentamiento 23 veces mayor que el CO<sub>2</sub> durante un periodo de 100 años [34], teniendo un rango de vida de 10 a 15 años, con una vida media de 12.4 años (Mhyre et al., 2013). Por otra parte, se tienen diversas fuentes naturales y artificiales de metano en la atmósfera incluyen: Rellenos sanitarios (33%), Fertilizantes (29,7%), Petróleo y gas natural (17,9%), Minería de carbón (4%), Pantanos (23%), y las aguas residuales (2,6%). Teniendo a los humedales como principales fuentes naturales de metano, el principal producto de la degradación de materia orgánica [9].

## ÓXIDO NITROSO (N<sub>2</sub>O)

Gas traza de efecto invernadero contribuyente al calentamiento global, el cambio climático y destrucción de la capa de ozono estratosférica [52]. Con un potencial de calentamiento atmosférico de 296 veces mayor que las emisiones de CO<sub>2</sub> en 100 años [53]. Permaneciendo en la atmósfera durante un promedio de 114 años (Emisiones de óxido nitroso | US EPA). Con un aumento aproximado del 0.3% de la concentración de este gas en la atmósfera [54]. Ocurre en los sistemas de aguas residuales [55], en el proceso de tratamiento del nitrógeno, cuando se convierte de nitrato (NO<sub>3</sub>) a nitrógeno molecular N<sub>2</sub> [56], por medio de la desnitrificación; fuente principal del óxido nitroso [52]. Un proceso complejo y mayormente influenciado por factores ambientales que convierten los nutrientes de las aguas sucias a compuestos gaseosos que a su vez se liberan a la atmósfera mediante varios procesos microbianos [57].

# **CAPÍTULO III**

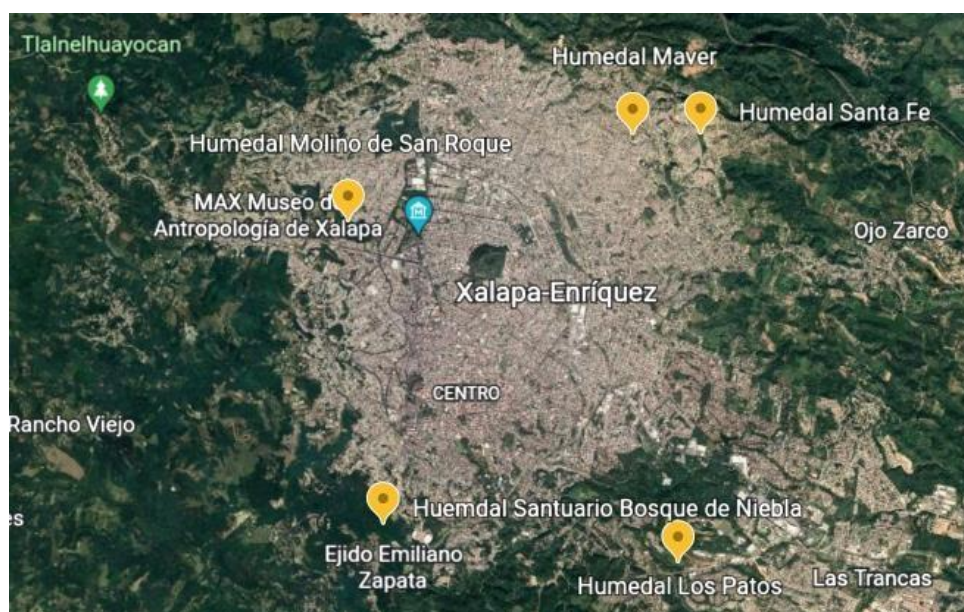
---

METODOLOGÍA

### 3.1 SITIO DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Xalapa, Ver, ubicada al centro del estado de Veracruz y aproximadamente 280 kilómetros al este de la Ciudad de México, colinda al norte con Banderilla, Jilotepec y Naolinco, al sur con Coatepec, al oeste con Tlalnelhuayocan y al este con Actopan y Emiliano Zapata una altura de 1,460 metros sobre el nivel del mar. Sus 124.38 km<sup>2</sup> de extensión representan el 0.17% del territorio veracruzano.

El trabajo de campo se desarrolló en cinco humedales urbanos dentro de la ciudad de Xalapa (Figura 3.1), con diferente estado de conservación, manteniendo características homogéneas de los sitios, como: biomasa vegetal, cercanía a centros poblados y rangos de altura. Se identificaron los siguientes humedales: Humedal Molino de San Roque (en recuperación), Humedal Santa Fe (perturbado) y Humedal Maver (perturbado), Humedal Los Patos (conservado) y Humedal Santuario Bosque de Niebla (conservado) área perteneciente al Instituto de Ecología A.C., estos dos últimos se estudiaron con la iniciativa de ser tomados como “Humedales de referencia”.



**Fig. 3.1 Localización de los humedales de estudio en la ciudad de Xalapa, Ver.**  
Fuente: [60].



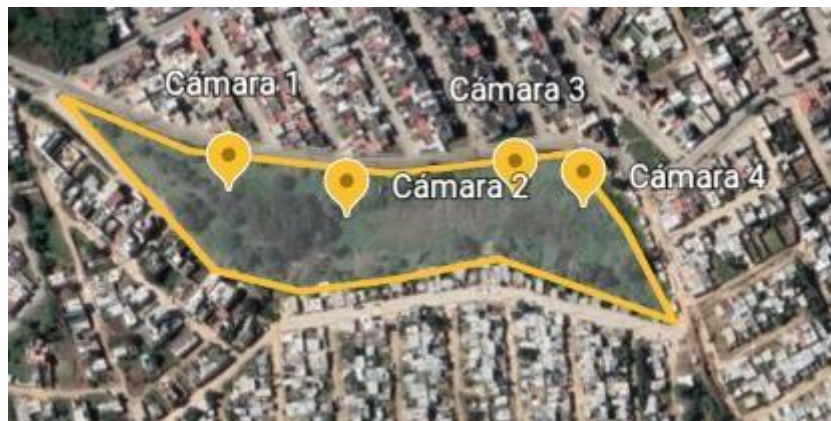
### 3.2 CAMPAÑAS DE MUESTREO

La recolección de muestras de gases y agua fueron tomadas de cuatro puntos situados a lo largo de cada humedal de estudio (Figura 3.2 a Figura 3.6), con una frecuencia de una vez al mes por cada muestra, durante cuatro meses (septiembre - octubre) del año 2022.

Los puntos de muestreo para cada humedal fueron seleccionados en base a características presentes como son: variaciones del nivel de agua y vegetación.



**Fig. 3.2** Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal molino de San Roque.  
Fuente: [60].

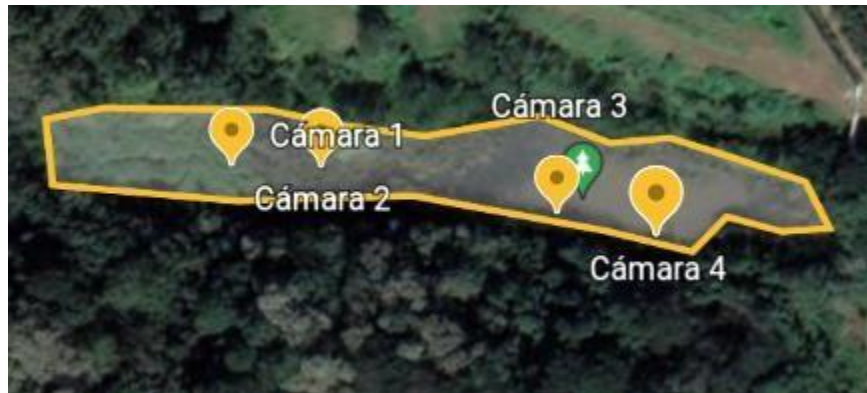


**Fig. 3.3** Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Santa Fe.  
Fuente: [60].





**Fig. 3.4** Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Maver.  
Fuente: [60].



**Fig. 3.5** Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Los Patos.  
Fuente: [60].



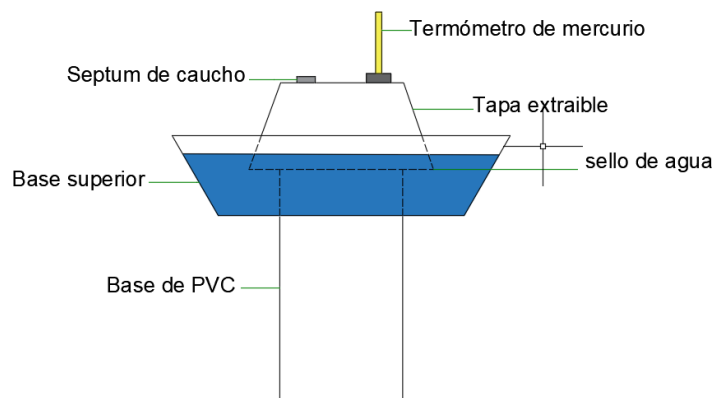
**Fig. 3.6 Localización de los puntos de muestreo dentro del Humedal Santuario Bosque de Niebla.**  
**Fuente: [60].**

En cada punto se midió la emisión de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), nivel de agua, temperatura y características fisicoquímicas del agua y contenido de materia orgánica en el suelo. A continuación, se detalla la metodología para cada medición.

### 3.3 MUESTREO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ( $\text{CO}_2$ Y $\text{CH}_4$ )

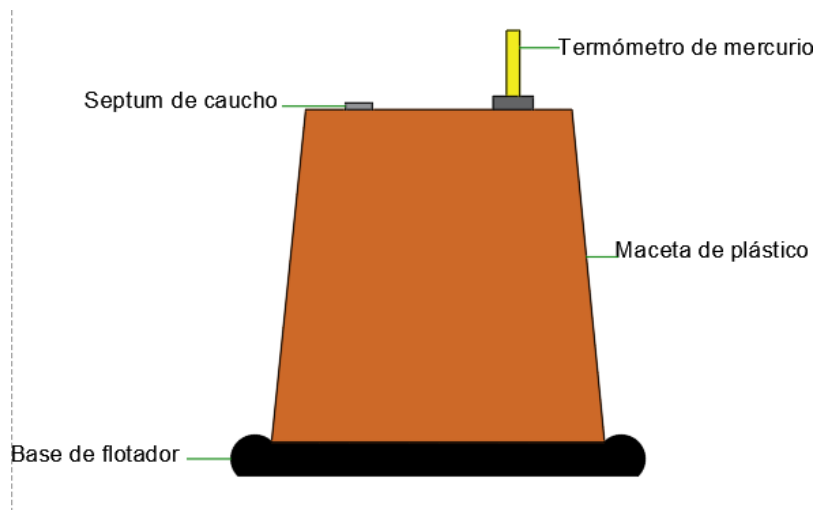
Para las muestras de GEI en campo, se empleó la técnica de cámaras estáticas según [2] y [14] donde las cámaras utilizadas fueron fabricadas dentro del Instituto de Ecología A.C., se obtuvieron dos diseños; cámara terrestre y cámara flotante.

La cámara terrestre (Figura 3.7) se conformó de dos partes, la base hecha con tubos de cloruro de polivinilo (PVC) con 15 cm de diámetro, 30 cm de altura y fueron insertadas aproximadamente 5 cm de los suelos de humedales y la segunda parte se enfocaba en la cámara, conformada por una palangana pequeña de plástico, insertada a 5 cm de la parte superior del PVC creando un cuello, con su respectiva tapa extraíble adecuada con septum de caucho y un termómetro de mercurio, creando un ambiente aislado entre el suelo y el aire ambiente del humedal, cada vez que se medían los flujos de gas, se añadía agua para garantizar un sellado hermético al gas entre la base y la tapa. La estructura de la cámara fue considerada para aspectos específicos presentes en algunos humedales, en este caso se utilizó cuando se presentó un nivel de agua menor a 10 cm [2].



**Fig. 3.7 Cámara terrestre para la toma de gases.**

En caso de la cámara flotante (Figura 3.8), conformada por una maceta de plástico con una capacidad de 6 L de agua, y un are de 0.0415 m<sup>2</sup>, la cual actúa como cámara, adecuada con septum de caucho, termómetro de mercurio y un flotador de base que le permite mantener el equilibrio y al mismo tiempo crear un sello entre la maceta y el agua del humedal, tal como se muestra en la figura, este tipo de cámara fue utilizada mayormente cuando los humedales presentaron un nivel de agua mayor a 10 cm.



**Fig. 3.8 Cámara acuática para la toma de gases.**

Para la determinación de los GEI se tomaron cinco muestras de gases durante intervalos de tiempo de 6 minutos (0, 6, 12, 18 y 24 minutos) y se registró la

temperatura interna. La muestra cero se tomó antes de cerrar la cámara y después cada seis minutos una vez tapada, para lo cual la muestra se extrajo por medio de una jeringa de propileno de 20 ml, con su respectiva llave de paso unidireccional (Lieur) que era insertada en el punto de toma de la cámara (en el septum de caucho). Antes de la toma de muestra se homogenizó el contenido de la cámara por medio de dos bombeos de aire con la jeringa insertada en el septum de caucho, para posteriormente extraer la muestra y depositarla en un vial de vidrio previamente evacuados al vacío de 10 ml, para ser trasladada al laboratorio donde se determinó la concentración de los GEI: metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La cuantificación se realizó dentro de las 48 horas después de recolectar la muestra, por medio de la cromatografía de gases; técnica donde los componentes en una muestra vaporizada son separados en consecuencia del reparto entre una fase gaseosa y una fase estacionaria contenida en una columna. La muestra es inyectada en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución es producida por el flujo de una fase móvil de gas inerte, la fase móvil no tiene interacción con las moléculas del analito, ya que su única función es transportarlas a través de esta columna. Así llega al punto donde se produce la separación de los componentes de la muestra y finalmente son determinados gracias a un detector que amplifica la señal integrándola y dando los resultados analíticos [78].

Las concentraciones de gas se analizaron en un cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus de 500 equipado con un detector de ionización de llama (FID) para  $\text{CH}_4$  y también equipado con un metanizador para detectar niveles de  $\text{CO}_2$  y un detector de captura de electrones (ECD) para  $\text{N}_2\text{O}$ , utilizando una columna de acero inoxidable para la separación de muestras, empaquetado con Poropack Q (malla 80/100), de 6 ft de largo y 2 mm de diámetro interior. Se utilizó como gas portador nitrógeno ( $7 \text{ ml min}^{-1}$ ).  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  se cuantificaron por separado [2].

### 3.4 NIVEL DE AGUA

El nivel de agua se midió con una regla plástica y se registraba en las hojas de anotaciones de campo, siempre y cuando el humedal presentara agua superficial.

### 3.5 CÁLCULO DEL FLUJO DE GAS

El flujo se calculó a partir del cambio de concentración del analito de interés en el espacio de la cámara. Ya que las unidades asociadas con los estándares de gas suelen ser ppm(v), cuando se aplica la relación de la curva estándar para calcular las concentraciones de gas de las muestras, la unidad resultante del analito también es ppm(v). Si la tasa de cambio de la concentración de gas es constante, entonces se puede usar la regresión lineal para calcular la pendiente de la concentración frente a datos de tiempo [68].

Para convertir los valores de flujo de una base volumétrica a una base másica se utiliza la ley de los gases ideales (Ec. 1):

$$VP = nRT \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde P = presión, V = volumen, n = el número de moles de gas, R = la constante de la ley de los gases y T = temperatura. Cuando el valor de R = 0.08206 L atm Mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> se utiliza, las unidades de P, V, n y T tienen unidades correspondientes de atm, litros, moles y K.

Por lo tanto,

$$(\text{Ppm}/\text{min}^{-1}) * (\text{m}^3/\text{m}^2) ((1\text{mg}/\text{L})/(1\text{ppm})) *(1000\text{L}/1\text{m}^3) = \text{mg m}^2 \text{min}^{-1}$$

Multiplicando el flujo calculado con unidades ppm/min<sup>-1</sup> con el V correspondiente de la cámara en unidades de m<sup>3</sup> sobre el área de base en m<sup>2</sup>, se obtiene el flujo de gas en mg m<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el programa de software (PAST), utilizando un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para averiguar si existía alguna relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero con los parámetros físico-químicos del agua presentes en cada humedal.

# **CAPÍTULO IV**

---

PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE  
RESULTADOS

## 4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la toma de las emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) analizados durante los cuatro meses de muestreo en los humedales de estudio y referencia, mostrando variaciones espaciales, variaciones temporales por mes y una comparación de la emisión de gases entre los humedales, además de los niveles de agua y temperatura. Con la finalidad de demostrar la influencia de los factores estudiados en los niveles de emisión de los GEI.

## 4.2 RESULTADOS

### 4.2.1 EMISIONES DE $\text{CH}_4$

#### VARIACIONES ESPACIALES DENTRO DE CADA HUMEDAL

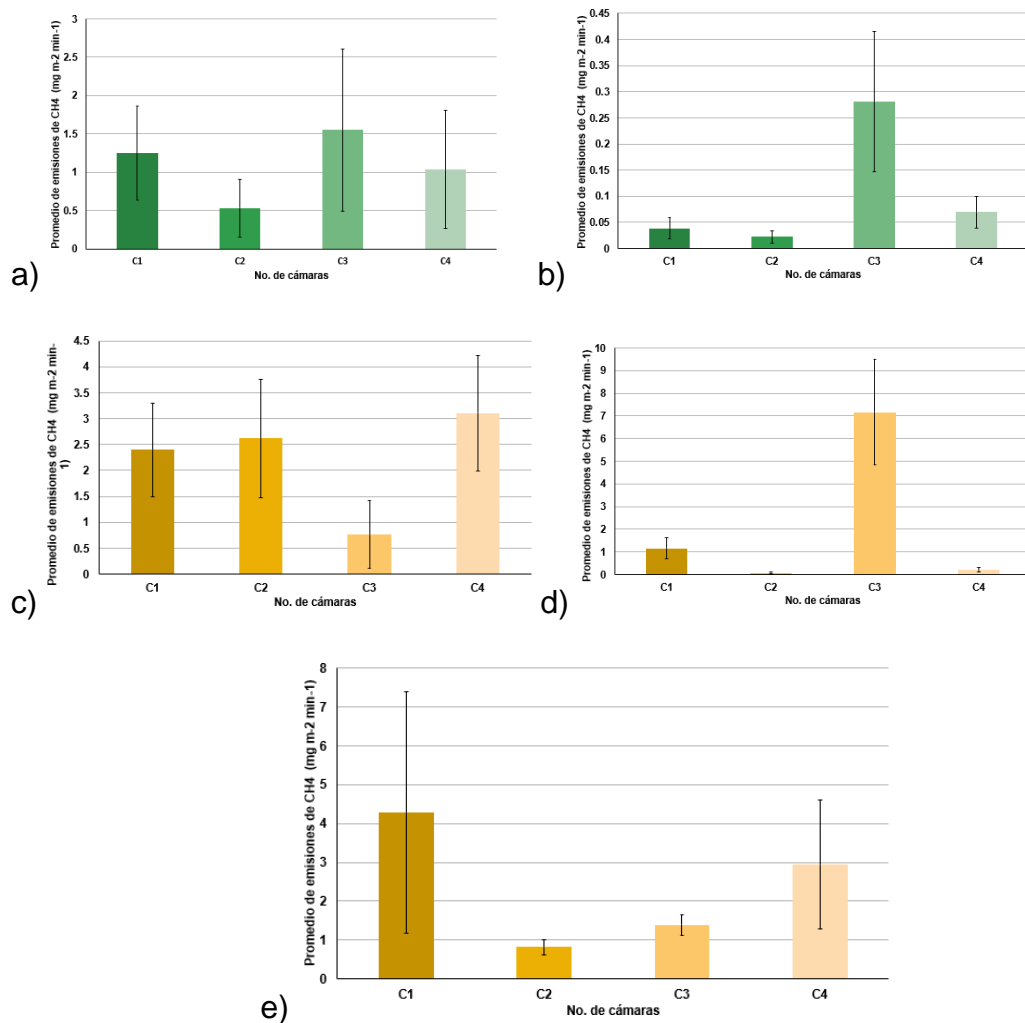
En la Figura 4.1 se muestran el promedio de emisiones de  $\text{CH}_4$  de cada cámara (C1, C2, C3 y C4) por humedal, durante los cuatro meses de estudio, de manera que las gráficas se clasificaron por letra según el humedal; a) Humedal Santuario Bosque de Niebla (HSBN), b) Humedal Los Patos (HLP), c) Humedal Santa Fe (HSF), d) Humedal Maver (HMV) y e) Humedal Molino de San Roque (HMSR).

En las gráficas de a) y b) siendo los humedales de referencia, observamos que las emisiones más altas de  $\text{CH}_4$  se presentaron en las cámaras 4 de ambos humedales, con un promedio de  $0.25 - 1.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , mientras que sus emisiones más bajas se presentaron en las cámaras 2, donde en a) fueron de  $0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y para b) de  $0.02 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

En cuanto a los humedales de estudio se notó que en c) las emisiones más altas fueron presentadas en la cámara 1, 2 y 4 con una emisión de entre  $2.39$  a  $3.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y una emisión mínima de  $0.75 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  en la cámara 3. Para d) se obtuvieron mayores emisiones en la cámara 3 siendo de  $7.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , muy



variables a comparación de las presentadas en la cámara 2 que fueron de  $0.06 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Por último, en el humedal e) con emisiones altas de  $2.93 - 4.27 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  en las cámaras 1 y 4, siendo las emisiones más bajas de  $1.38 - 0.81 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  presentes en las cámaras 2 y 3.



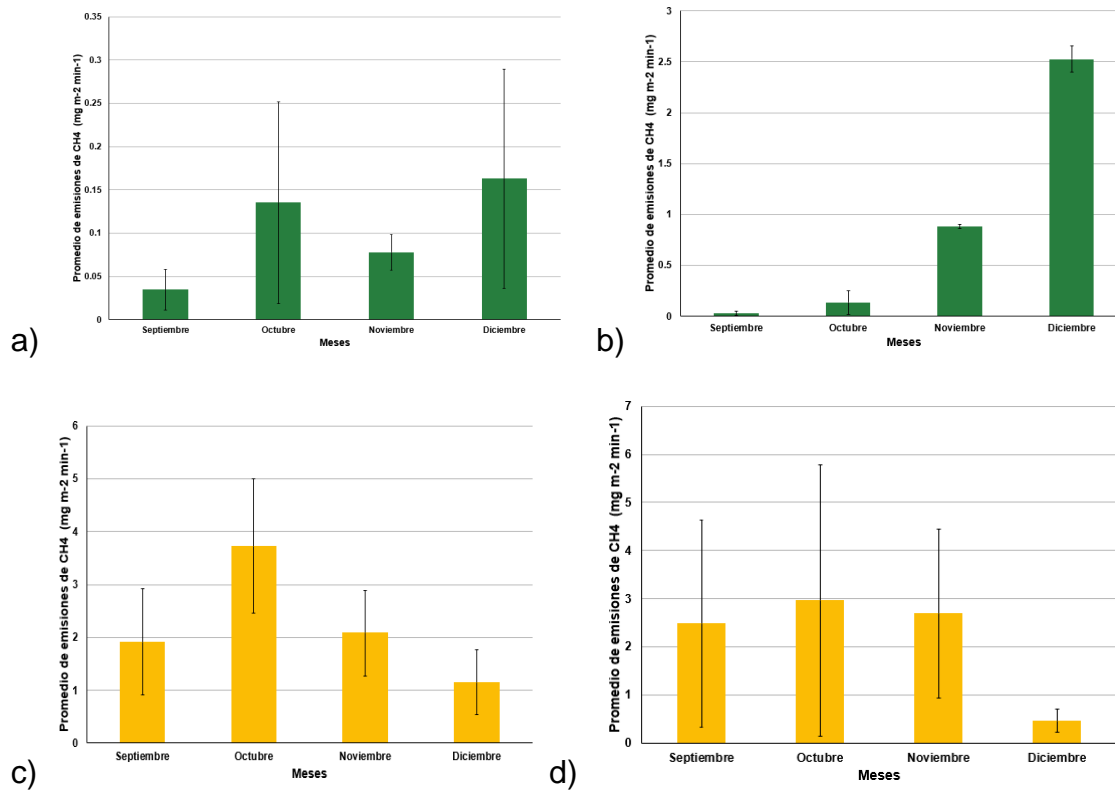
**Fig. 4.1** Gráfica de los promedios de emisiones de CH<sub>4</sub> de cada cámara durante los cuatro meses por cada humedal: a) HSNB, b) HLP, c) HSF, d) HMV y e) HMSR.

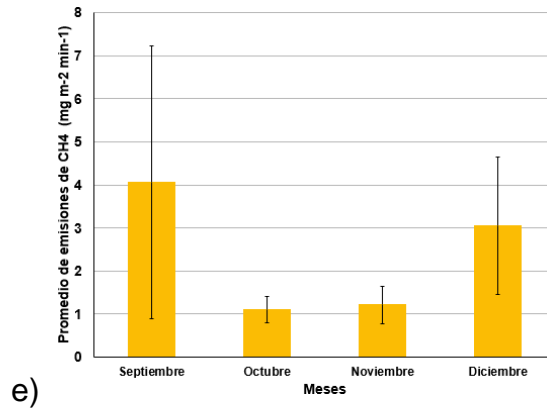
### VARIACIONES TEMPORALES POR MES ENTRE CADA HUMEDAL

El estudio de las emisiones de gases de CH<sub>4</sub> en los humedales tanto de estudio como de referencia, se realizaron durante los meses de septiembre a diciembre, por lo que en la Figura 4.2 se presentan los promedios de las emisiones de acuerdo al mes de estudio, por cada humedal.

De acuerdo a los datos obtenidos, el humedal a) presentó emisiones que variaron de  $0.03 - 0.16 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  siendo diciembre el mes con la emisión de  $\text{CH}_4$  más alta y septiembre con la más baja. En el caso de b), este humedal de referencia presentó mayores emisiones en noviembre y diciembre con  $0.88 - 2.52 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , mientras que en los meses de lluvia que son septiembre y octubre, las emisiones presentadas fueron de  $0.03 - 0.13 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

En cuanto al humedal c) presentó emisiones altas en los meses de octubre – noviembre de  $2.07 - 3.73 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , mientras que en septiembre fueron de  $1.91 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y  $1.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  en diciembre, para el humedal d) se notó que el rango de emisiones altas varió entre  $2.48 - 2.96 - 2.68 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , abarcando los meses de septiembre a noviembre, diciembre mostró una disminución de la emisión, dando un valor de  $0.46 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . En el humedal e) el promedio de emisiones para septiembre y diciembre fueron de  $4.05 - 3.04 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , siendo las más altas durante los cuatro meses, y presentando emisiones de  $1.10 - 1.21 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  en octubre y noviembre.

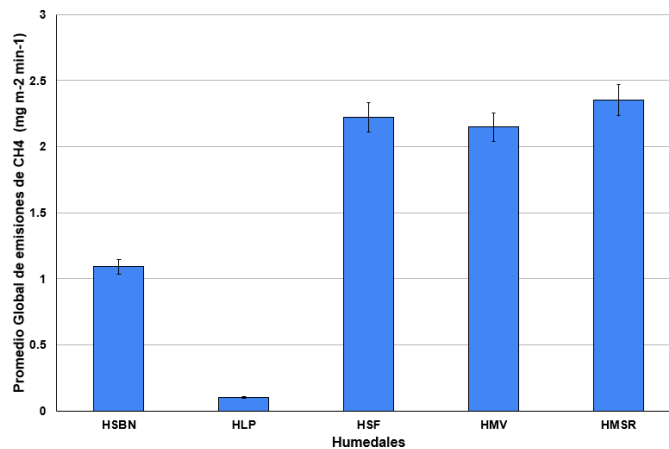




**Fig. 4.2 Gráficas de los promedios por meses de las emisiones de CH<sub>4</sub> de cada humedal: a) HSBN, b) HLP, c) HSF, d) HMV y e) HMSR.**

### COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES ENTRE LOS HUMEDALES

Como se observa en la Figura 4.3, los humedales de referencia demostraron que su nivel de emisiones fue menor a diferencia de los humedales de estudio, mostrando emisiones de 0.1 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> en el HLP y de 1.09 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> en el HSBN. Mientras que para los humedales de estudio, sus emisiones variaron entre los 2.21 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> en HSF, 2.14 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> en HMV y 2.35 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> en HMSR, teniendo las emisiones más altas.



**Fig. 4.3 Gráfica de los promedios totales de emisiones de CH<sub>4</sub> por cada humedal.**

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De acuerdo al análisis de varianza de una vía, no hubo diferencias significativas por cámara de los humedales ( $P = 0.3214 / P = 0.8026$ ), a diferencia de las variaciones

temporales por mes, donde se obtuvo que los meses de septiembre y diciembre son significativamente diferentes ( $P = 0.05916$ ) con una  $P$  menor a 0.1. De la misma forma el análisis de varianza de una vía también se realizó para las comparaciones de los promedios de emisiones de  $\text{CH}_4$  por humedal, donde se obtuvo que HLP es significativamente diferente (más bajo) a HSF, HMV y HMSR, con una  $P = 0.05803$ , a un nivel de confianza del 90 %.

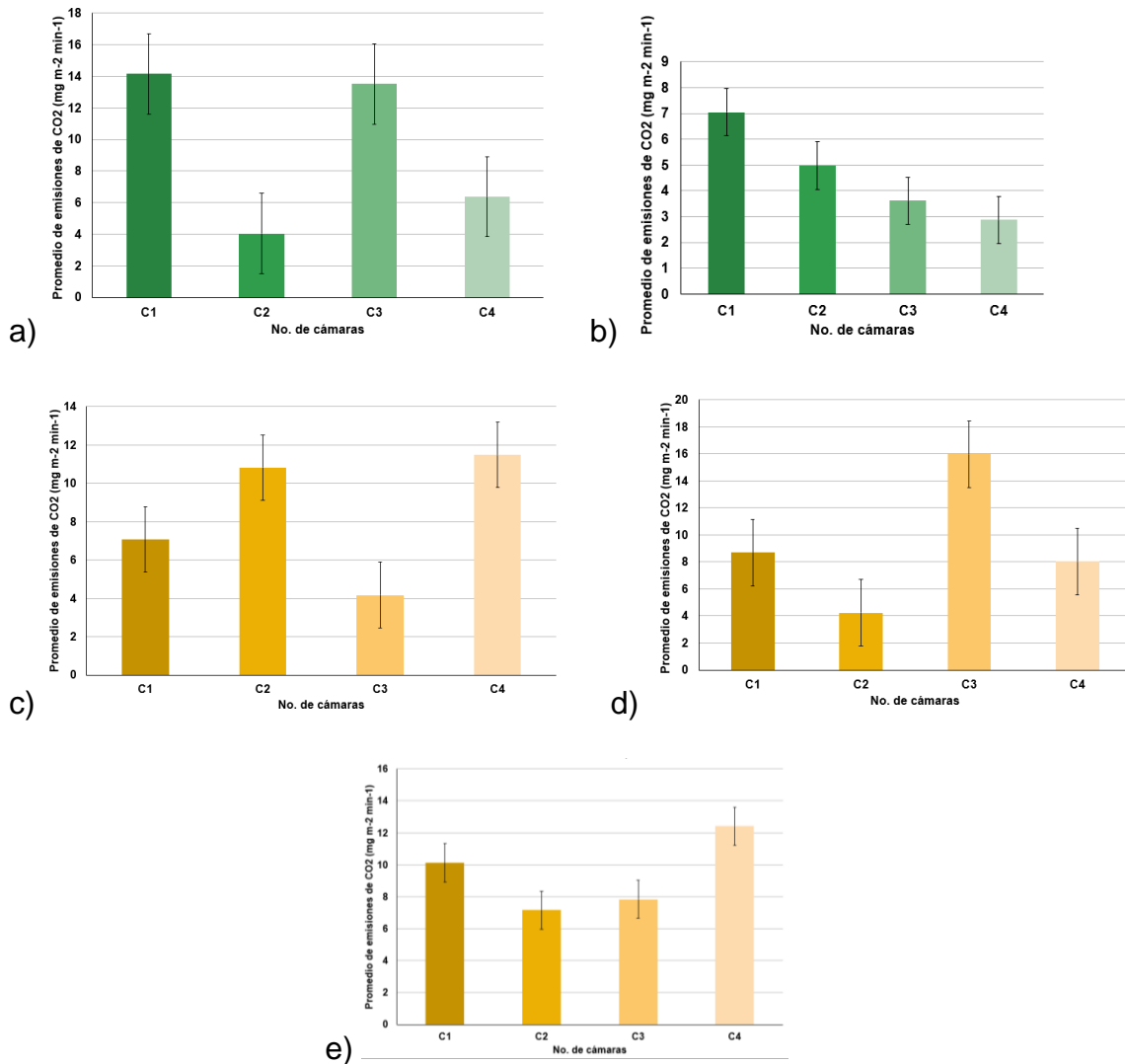
## 4.2 EMISIONES DE $\text{CO}_2$

### VARIACIONES ESPACIALES DENTRO DE CADA HUMEDAL

En la Figura 4.4 se presentan los promedios de cada cámara por humedal, de referencia y los de estudio, de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , siendo a) Humedal Santuario Bosque de Niebla (HSBN), b) Humedal Los Patos (HLP), c) Humedal Santa Fe (HSF), d) Humedal Maver (HMV) y e) Humedal Molino de San Roque.

En la gráfica del humedal a) se tienen emisiones altas de  $\text{CO}_2$  en las cámaras 1 y 3 de  $14.15 - 13.51 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , mientras que en las cámaras 2 y 4, las emisiones fueron menores ( $4.03 - 6.36 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ), donde se esperaba obtener emisiones menores al ser un humedal de referencia, para el humedal b) las emisiones más altas se presentaron en las primeras dos cámaras ( $7.03 - 4.97 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) y menores emisiones en las cámaras 3 y 4 ( $3.61 - 2.87 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ).

En cuanto al humedal de estudio c) las emisiones de las cámaras 1, 2 y 4 variaron entre los  $7.06 - 10.87$  y  $11.47 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  a diferencia de la cámara 3, que presentó una emisión de  $4.17 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Para el humedal d) se obtuvo una emisión alta de  $15.98 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , que entre los cinco humedales fue la cámara con mayor emisión de  $\text{CO}_2$ , sin embargo, las cámaras 1, 2 y 4 presentaron menores emisiones de entre  $8.68 - 4.24$  y  $8.03 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Por último, el humedal e) tuvo mayores emisiones en las cámaras 1 y 4 con  $10.12 - 12.42 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , y emisiones que variaron entre los  $7.16 - 7.84 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$  en las cámaras 2 y 3.



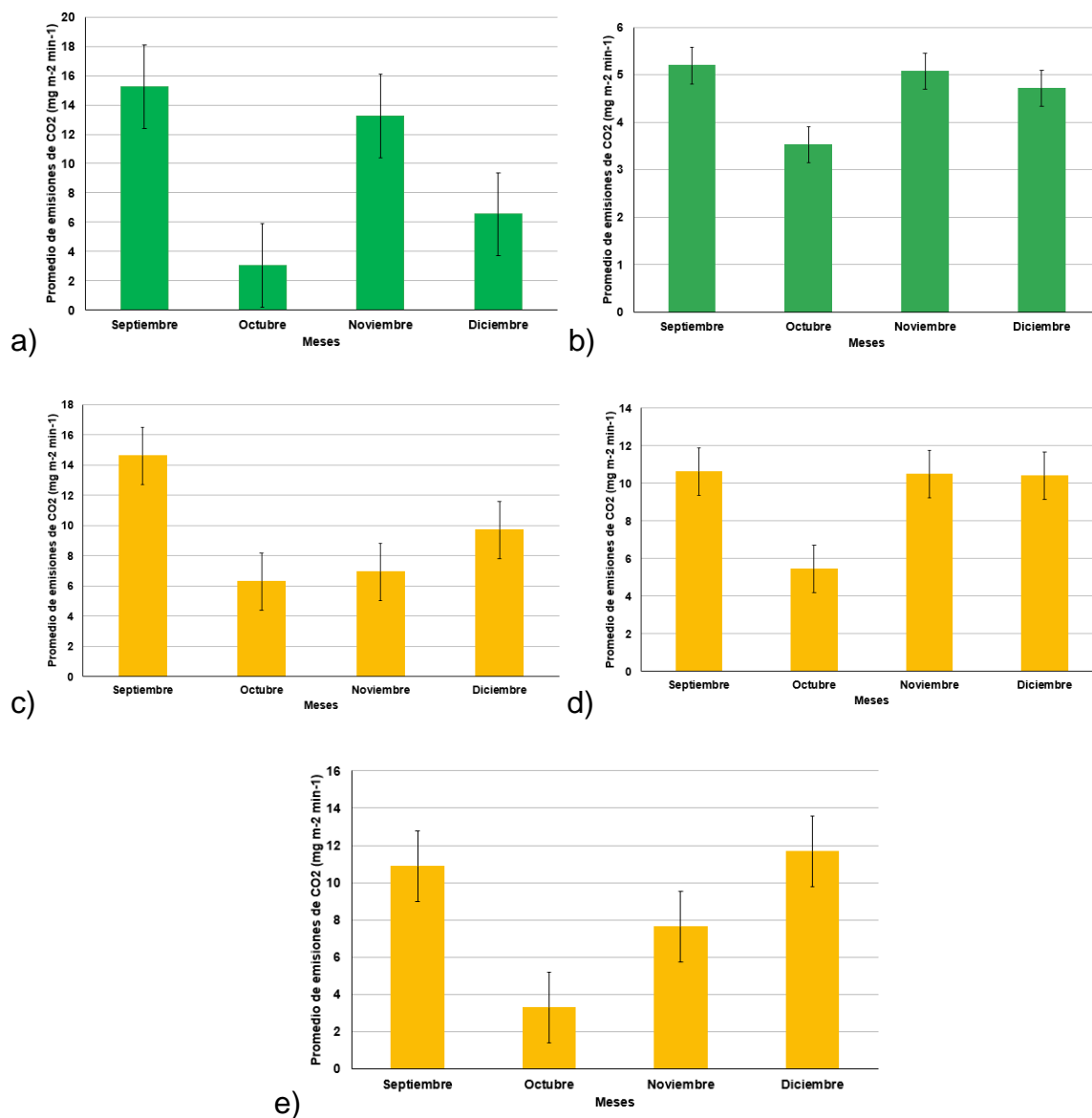
**Fig. 4.4** Gráfica de los promedios de emisiones de CO<sub>2</sub> de cada cámara durante los cuatro meses por cada humedal: a)HSNB, b)HLP, c) HSF, d) HMV y e) HMSR.

#### VARIACIONES TEMPORALES POR MES ENTRE CADA HUMEDAL

El estudio de las emisiones de CO<sub>2</sub>, tuvo como duración cuatro meses, los cuales fueron de septiembre a diciembre, en la siguiente Figura 4.5 se presentan los promedios de las emisiones de este gas por cada mes de cada humedal.

Una similitud que se obtuvo en los humedales a) y b) es que en ambos el mes de octubre presentaron menor emisiones de CO<sub>2</sub> (3.04 – 3.52 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), mientras que a) en los meses de septiembre, noviembre y diciembre fueron de 15.24 – 13.24 y 6.54 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>, y para b) de 5.19 – 5.07 y 4.71 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>.

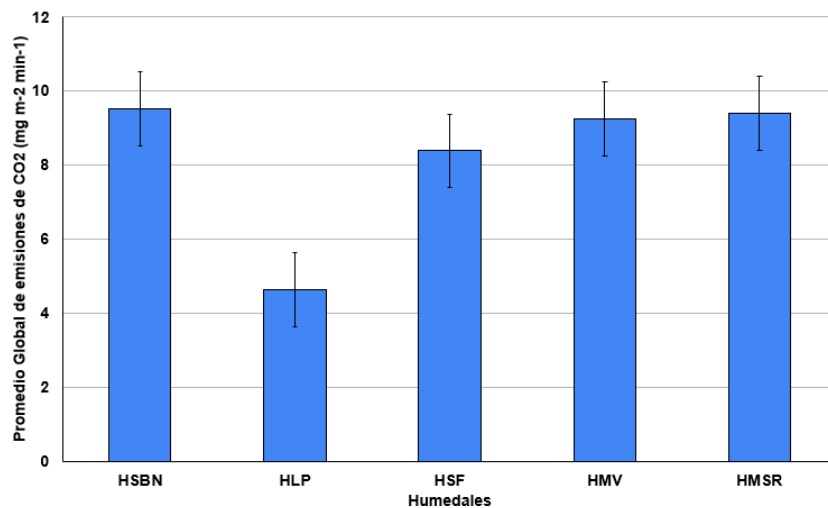
El humedal c presentó una alta emisión ( $10.89 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) en septiembre, sin embargo, se notó una bajada y subida, para los meses de octubre a diciembre ( $3.31 - 7.65$  y  $11.67 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ). Mientras que el humedal d) solo tuvo una disminución de las emisiones en el mes de octubre ( $5.43 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) y altas emisiones en los tres meses restantes ( $10.61 - 10.49$  y  $10.39 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ). El humedal e), al igual que el c) mostró mayor emisión en septiembre ( $14.62 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) y una bajada y subida en los otros meses ( $6.3 - 6.92$  y  $9.69 \text{ mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ).



**Fig. 4.5 Gráficas de los promedios por meses de las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada humedal: a) HSBN, b) HLP, c) HSF, d) HMV y e) HMSR.**

### COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES ENTRE LOS HUMEDALES

Tal como se observa en la Figura 4.6, el humedal de referencia HLP (4.62 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>) muestra las emisiones mas bajas de CO<sub>2</sub>, al contrario de HSBN (9.51 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), el cual contaba con problemas de perturbación en el momento que se llevó a cabo el estudio. En cuanto a los humedales restantes, mostraron emisiones que variaron entre los 8.38 – 9.38 mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>.



**Fig. 4.6 Gráfica de los promedios totales de emisiones de CO<sub>2</sub> por cada humedal.**

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De acuerdo al análisis de varianza de una vía, las cámaras 2 y 3 de HMV mostraron una diferencia significativa ( $P = 0.05358$ ), a un nivel de confianza del 90%, pero no hay diferencia entre las cámaras 3 y 4, o entre la 1 y 3.

En el caso del promedio de las emisiones por meses y el promedio de emisiones entre los humedales urbanos, no hay diferencias significativas ya que se obtuvo una  $P$  mayor a 0.1.

### 4.3 NIVEL DE AGUA Y TEMPERATURA DEL SUELO

De acuerdo a la investigación realizada para el conocimiento de las variaciones de la temperatura del suelo y nivel del agua en humedales, en todos los estudios se demostró que la presencia de agua superficial en los humedales tiende a beneficiar las emisiones de CH<sub>4</sub> debido a que en estas condiciones, se da un mejor proceso de la metanogénesis, en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> se llegó a la conclusión que las emisiones más altas de este gas se dan en suelos con bajos niveles de agua y suelos secos de humedal. En este estudio se presentaron niveles de agua que oscilaron entre los 5 – 100 cm, presentándose los más altos en los meses de septiembre y octubre, debido a la temporada de lluvias. Y menores niveles de agua en los meses de noviembre y diciembre.

En cuanto a las temperaturas del suelo según los trabajos de investigación del punto 3.6 del capítulo 3, no se obtuvo una relación específica entre las temperaturas y las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.



## DISCUSIÓN

Este proyecto fue realizado con el objetivo de estudiar si existía alguna relación entre la perturbación presente en los humedales urbanos de Xalapa Ver, y las emisiones de los gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), así como también los niveles de agua superficial y las temperaturas del suelo.

Haciendo una comparación entre los humedales de referencia y los humedales de estudio, los humedales HSBN y HLP contenían un nivel bajo de perturbación debido a que ambos humedales están restringidos como áreas verdes, sin embargo, en los últimos meses en HSBN se encontró una fuga de drenaje que se descargaba directo al humedal, por lo que su nivel de perturbación aumentó, provocando una afectación en las emisiones de los GEI, mientras que los humedales de estudio; HSF y HMSR se encuentran afectados mayormente por las personas aledañas a estos humedales, mientras que el HMV se encuentra en pérdida total debido a que actualmente las calles a su alrededor están siendo pavimentadas, por lo que el humedal termina siendo un lugar para desechar escombros.

En un estudio previo [58], mostró que la perturbación por actividades humanas presente en los humedales afecta el patrón de distribución de los contenidos de C y N del suelo y en las comunidades bacterianas, actuando sobre las emisiones de GEI, las cuales difirieron significativamente entre estaciones y tipos de humedales debido a la diferencia hidrológica, el cambio de uso y condiciones del suelo.

De la misma forma en este proyecto se demostró que las emisiones resultaron más altas en los tres humedales que presentaron mayor perturbación y altos niveles de agua superficial durante los cuatro meses de estudio, como se observa en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Promedios de emisiones de CH<sub>4</sub> por humedal en orden de menor a mayor.**

<b>Humedal</b>	<b>Promedio de emisión de CH<sub>4</sub> (mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>)</b>
Humedal Los Patos	0.1090
Humedal Santuario Bosque de Niebla	1.0903
Humedal Maver	2.1487
Humedal Santa Fe	2.2195
Humedal Molino de San Roque	2.3545

La investigación realizada en 2018 [14] mostró que a pesar de que los humedales son grandes sumideros de C, la ausencia de conciencia y educación ambiental, han determinado la pérdida de estos ecosistemas, olvidando así los niveles de captura de C, convirtiéndose en fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En comparación con el estudio anterior, se demostró que efectivamente el factor principal influyente en las emisiones de este gas, fue el alto nivel de perturbación presente, causante de la desecación y la aparición de plantas invasoras dadas en aguas contaminadas. Tal como observamos en la Tabla 4.2, donde el Humedal Santuario Bosque de Niebla resultó tener las emisiones más altas, debido a la presencia de aguas negras en los últimos dos meses de estudio, sin embargo, según el análisis de estadístico no se encontraron diferencias significativas.

**Tabla 4.2 Promedios de emisiones de CO<sub>2</sub> por humedal en orden de menor a mayor.**

<b>Humedales</b>	<b>Promedio de emisiones de CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>)</b>
Humedal Los patos	4.6256
Humedal Santa Fe	8.3841
Humedal Maver	9.2356
Humedal Molino de San Roque	9.3885
Humedal Santuario Bosque de Niebla	9.5199

Los humedales forman una importante reserva de carbono terrestre y desempeñan un papel crucial en el ciclo del carbono, almacenan aproximadamente el 30% del carbono del suelo mundial. En el estudio elaborado en 2022 [10] se mostró que las sequías y el consiguiente descenso del nivel freático pueden estimular la respiración heterótrofa al mejorar la actividad del encima fenol oxidasa, aumentando así las emisiones de CO<sub>2</sub>. De la misma forma, las emisiones obtenidas durante este proyecto resultaron más altas debido a la relación con los bajos niveles de agua superficial presente en los humedales urbanos, durante la temporada seca.

## CONCLUSIONES

Con el objetivo de evaluar la relación de tres importantes factores influyentes en las emisiones de los gases de efecto invernadero presentes en los humedales urbanos de la ciudad de Xalapa, Ver., finalmente se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La presencia de perturbación en los humedales urbanos es un factor influyente en las emisiones de los gases de efecto invernadero.
2. Los niveles altos de agua superficial en los humedales urbanos es un factor que influye en las emisiones de CH<sub>4</sub>, ya que las condiciones permiten con mayor facilidad que se lleve a cabo el proceso de la metanogénesis.
3. Los bajos niveles de agua superficial en los humedales urbanos tiene influencia en las emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a que se presenta una degradación aeróbica.
4. Las estaciones influyen en los niveles de agua de los humedales urbanos.
5. Al comparar los humedales de referencia y los de estudio se demuestra cómo afecta el cuidado y la protección de los humedales urbanos en las emisiones de los GEI.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar la relación entre factores físicos presentes en los humedales urbanos y las emisiones de gases de efecto invernadero, en este estudio solo se tomaron el nivel de agua y perturbación, sin embargo, pueden verse afectados por especies vegetales invasoras o animales externos al humedal.
- Identificar las especies vegetales presentes en los humedales urbanos y evaluar su influencia en las emisiones de GEI, ya que los tipos de macrófitas que existentes en los humedales nos pueden indicar la presencia de contaminantes, un ejemplo de esta situación es la especie Lemna Gibba, presente en humedales afectados por la presencia de aguas negras.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones útiles en la toma de muestras para gases:

- La técnica de la cámara cerrada, es la más práctica y funcional en la toma de emisiones.
- Precaución en la toma de muestras, cargar material extra, evitar la presencia de agua en los viales y jeringas.
- Las medidas de las cámaras utilizadas para la recolección de los gases servirán en el análisis para la obtención de las emisiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M.E. Hernández, "Humedales de Xalapa: tesoro desconocido," El portal veracruzano, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/tica-conflictos-intereses/17-ciencia-hoy/1261-humedales-de-xalapa-tesoro>.
2. J.L. Marín-Muñiz, M.E. Hernández y P. Moreno-Casasola, "Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz, Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics," *Atmospheric Environment*, vol. 107, pp. 107-117, 2015.
3. I. Olmsted, "Wetlands of Mexico," in *Wetlands of the world I: Inventory, ecology and management. Handbook of Vegetation Science*, D. F. Whigham, D. Dykyjová, y S. Hejný, Eds. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 637-678.
4. F. Contreras-Espinosa y B. G. Warner, "Ecosystem characteristics and management considerations from coastal wetlands in Mexico," *Hydrobiologia*, vol. 511, pp. 233-245, 2004. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000014097.74263.54.
5. G. De la Lanza-Espino y J. L. García-Calderón, Eds., *Lagos y presas de México*. México: Centro de Ecología y Desarrollo, A. C., 1995.
6. P. Moreno-Casasola, D. M. Infante-Mata y H. López-Rosas, "Tropical freshwater swamps and marshes," en *Wetland habitats of North America: Ecology and conservation concerns*, D. P. Batzer y A. H. Baldwin, Eds. University of California Press, 2012, pp. 267-282.
7. Peters, C. *Economic botany and management potential of seasonally dry tropical forests*, 2011.
8. Suárez Duque, C. Acurio, S. Chimbolema y X. Aguirre, "Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador," *Ecología Aplicada*, vol. 15, no. 2, pp. 171-177, 2016. [Online]. DOI: 10.21704/rea.v15i2.756.
9. M.E. Hernández, "Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano," *Tierra latinoamericana*, vol. 28, no. 2, 2010. [Online]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792010000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000200005).
10. Y. Zhang, D. B. Naafs, X. Huang, Q. Song, J. Xue, R. Wang, M. Zhao, R. P. Evershed, R. D. Pancost y S. Xie, "Variations in wetland hydrology drive rapid changes in the microbial community, carbon metabolic activity, and greenhouse gas fluxes," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 317, pp. 269-285, 2022. DOI: 10.1016/j.gca.2021.11.014.
11. G. Bonetti, S. M. Trevathan-Tackett, P. E. Carnell y P. I. Macreadie, "The potential of viruses to influence the magnitude of greenhouse gas emissions in an inland wetland," *Water Res.*, vol. 193, pp. 1-13, 2021. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116875>.
12. R. Ondiek, D. S. Hayes, N. D. Kinyua, N. Kitaka, E. Lautsch, P. Mutuo y T. Hein, "Influence of land-use change and season on soil greenhouse gas

- emissions from a tropical wetland: A stepwise explorative assessment," *Sci. Total Environ.*, vol. 787, pp. 1-12, 2021. [Online]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147701.
13. Q. Lin, S. Wang, Y. Li, L. Riaz, F. Yu, Q. Yang, S. Han, y J. Ma, "Effects and mechanisms of land-types conversion on greenhouse gas emissions in the Yellow River floodplain wetland," *Sci. Total Environ.*, vol. 813, pp. 1-12, 2022. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152406>.
  14. M.E. Hernández, M. Galindo-Zetina y J.C. Hernández-Hernández, "Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions," *Ecological Engineering*, vol. 114, pp. 88-95, 2018.
  15. M.E. Hernández y D. Junca-Gómez, "Carbon stocks and greenhouse gas emissions (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) in mangroves with different vegetation assemblies in the central coastal plain of Veracruz Mexico," *Science of the Total Environment*, vol. 741, 2020.
  16. M. E. Hernández, J. L. Marín-Muñiz, P. Moreno-Casasola, y V. Vázquez, "Comparing soil carbon pools and carbon gas fluxes in coastal forested wetlands and flooded grasslands in Veracruz, Mexico," *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manage.*, pp. 5-16, 2014. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/21513732.2014.925977>.
  17. Inbushi
  18. P. Keddy, "Wetland Ecology: Principles and Conservation," *Cambridge Studies in Ecology*, Australia, pp. 3-80, 2000.
  19. Convención de Ramsar. Funciones de los humedales. 2017. Disponible en: <http://bcn.cl/20bct>
  20. National Groundwater Association, "Facts about global groundwater usage," United States of America, 2015, 2 pp.
  21. M. Fariña y A. Camaño, "Humedales costeros de Chile. Aportes científicos a su gestión sustentable," Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 2012.
  22. Malvárez, F. Kalesnik y C. Kandel, "El Delta del Río Paraná como un mosaico de humedales," en F. Kalesnik y C. Kandel, Eds., "Reserva de Biosfera Delta del Paraná. Formación en educación para el ambiente y el desarrollo," Municipalidad de San Fernando, Buenos Aires, 1a. ed., 2004, pp. 255.
  23. T. Betancur-Vargas, D. A. García-Giraldo, A. J. Vélez-Duque, A. M. Gómez, C. Flórez-Ayala, P. J. E. Ortiz-Tamayo y J. Álvaro, "Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia," *Biota Colombiana*, vol. 18, pp. 1-28, 2017.
  24. J. Mitsch y J. G. Gosselink, "Wetlands," 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 2000.
  25. Custodio, "Las aguas subterráneas como elemento básico de la existencia de numerosos humedales," *Ingeniería del Agua*, vol. 17, pp. 119-135, 2010.
  26. A. Shiklomanov, "Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world," World Meteorological Organization, 1997, 88 pp.
  27. D. A. Hammer, "Creating Freshwater Wetlands," Lewis Publishers, Chelsea, MI, USA, 1992.

28. USDA, NRCS (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service), "Field indicators of hydric soils in the United States. Version 6.0," G. W. Hurt y L. M. Vasilas (eds.), USDA, NRCS in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils, Washington, DC, USA, 2006.
29. M. E. Collins y R. J. Kuehl, "Organic matter accumulation and organic soils," in J. L. Richardson and M. J. Vepraskas (eds.), "Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes and classification," Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, 2000, pp. 137-162.
30. J. K. Cronk y M. S. Fennessy, "Wetland Plants: Biology and Ecology," Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, 2001.
31. Millenium Ecosytem Assesment, 2005
32. Ramsar, "Notas informativas sobre los valores y las funciones de los humedales. Mitigación del cambio climático. Hoja informativa N°5," 2000. [Online]. Disponible en: [www.ramsar.org/values\\_climate\\_s.htm](http://www.ramsar.org/values_climate_s.htm).
33. Elderfield, "Biogeoquímica: Un análisis del cambio global," Revista Geológica, vol. 135, no. 6, pp. 819-842, 1998.
34. IPCC, "Climate change 2001: the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
35. B.V. Moya, A.E. Hernández y E. Borrell, "Los humedales ante el cambio climático," Investigaciones Geográficas (Esp), Universidad de Alicante, España, núm. 37, pp. 127-132, 2005.
36. H. U. Neue, J. L. Gaunt, Z. P. Wang, P. Becker-Heidmann y C. Quijano, "Carbon in tropical wetlands," Geoderma, vol. 79, pp. 163-185, 1997.
37. R. Torres-Alvarado, F. Ramírez V., F. J. Fernández y I. Barriga S., "Methanogenesis and methane oxidation in wetlands. Implications in the global carbon cycle," Hydrobiologia, vol. 15, pp. 327-349, 2005.
38. R. D. Jones y R. Y. Morita, "Methane oxidation by Nitrosococcus oceanus and Nitrosomonas europea," Appl. Environ. Microbiol., vol. 45, pp. 401-410, 1983.
39. C. G. Laing, T. G. Shreeve y D. M. E. Pearce, "Methane bubbles in surface peat cores: in situ measurements," Global Change Biol., vol. 14, pp. 916-924, 2008.
40. E. Altor y W. J. Mitsch, "Methane flux from created riparian marshes: relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes," Ecol. Eng., vol. 28, pp. 224-234, 2006.
41. N. Zhu, P. An, B. Krishnakumar, L. Zhao, L. Sun, M. Mizuochi y Y. Inamori, "Effect of plant harvest on methane emission from two constructed wetlands designed for the treatment of wastewater," Journal of Environmental Management, vol. 85, pp. 936-943, 2007.
42. Bergman, M. Klarquist y M. Nilsson, "Seasonal variation in rates of methane production from peat of various botanical origins: effects of temperature and substrate quality," FEMS Microbiol. Ecol., vol. 33, pp. 181-189, 2000.
43. J. Smialek, V. Bouchard, B. Lippman, M. Quigley, T. Granata, J. Martin y L.



- Brown, "Effect of a woody (*Salix nigra*) and an herbaceous (*Juncus effusus*) macrophyte species on methane dynamics and denitrification," *Wetlands*, vol. 26, pp. 509-517, 2006.
44. B. Samraoui y F. Samraoui, "An ornithological survey of Algerian wetlands: Important Bird Areas, Ramsar sites and threatened species," *Wildfowl*, vol. 58, no. 58, pp. 71-96, 2013.
  45. A. Kusch, J. Cárcamo y H. Gómez, "Aves acuáticas en el humedal urbano de tres puentes, Punta Arenas (53 S), Chile austral," in *Anales del Instituto de la Patagonia*, vol. 36, no. 2, pp. 45-51, Universidad de Magallanes, 2008.
  46. Schön, A. Domínguez y M. Achkar, "Distribución territorial de áreas urbanas en zonas de humedales en Uruguay," *Geo UERJ*, vol. 33, e.36322, 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/22406>.
  47. J.J.R. U., G. Pinilla A., y D.L. Camacho P., "Grupos tróficos de macroinvertebrados acuáticos en un humedal andino de Colombia," *Acta Biolo Colom*, vol. 18, pp. 279-292, 2013. [Online]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120548X2013000200006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120548X2013000200006&script=sci_arttext).
  48. C.E. Rodríguez-Arias y A.M. Silva Benavides, "Los humedales de la Quebrada Estéreo en San Ramón, Costa Rica: su importancia y estado actual," *Revista*, vol. 15, pp. 13-26, 2017. [Online]. Disponible en: <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/posgrado/article/view/1822>.
  49. Guo and C. Zhou, "Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 142, pp. 270-277, 2007.
  50. Robinson, N. E. Robinson y W. Soon, "Environmental effects of atmospheric increases in carbon dioxide," *OISM*, 12. [Online]. Disponible en: [http://www.petitionproject.org/gw\\_article/spanish.pdf](http://www.petitionproject.org/gw_article/spanish.pdf).
  51. IPCC, "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty," 2018. [Online]. Disponible en: [www.ohchr.org/EN/Issues/Environment/SREnvironment/Pages/Annualreports.aspx](http://www.ohchr.org/EN/Issues/Environment/SREnvironment/Pages/Annualreports.aspx).
  52. L. Tallec, J. Garnier, G. Billen y M. Gossiaux, "Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation," *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 2200-2209, 2008.
  53. J. Wu, J. Zhang, W. Jia, H. Xie, R. R. Gu, C. Li y B. Gao, "Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 2910-2917, 2009.
  54. A. K. Sovik y B. Klove, "Emission of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from a constructed wetland in southeastern Norway," *Science of the Total Environment*, vol. 380, no. 1-3, pp. 28-37, 2007.

55. M.J. Kampschreur, H. Temmink, R. Kleerebezem, M.S.M. Jetten y M.C.M. van Loosdrecht, "Nitrous oxide emission during wastewater treatment," *Water Research*, vol. 43, pp. 4093-4103, 2009.
56. W. Tao y J. Wang, "Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems," *Ecological Engineering*, vol. 35, pp. 836-842, 2009.
57. D.S. Paredes Denis, "Determinación de amenazas en humedales urbanos: Estudio de tres humedales de Valdivia, Chile," Tesis de licenciatura, Universidad Austral de Chile, 2010.
58. Q. Lin, S. Wang, Y. Li, L. Riaz, F. Yu, Q. Yang, S. Han, y J. Ma, "Effects and mechanisms of land-types conversion on greenhouse gas emissions in the Yellow River floodplain wetland," *Sci. Total Environ.*, vol. 813, pp. 1-12, 2022. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152406>.
59. S. Zamora, I. Zitácuaro-Contreras, E. A. Betanzo-Torres, L. C. Sandoval Herazo, M. Sandoval-Herazo, M. Vidal-Álvarez, J. L. Marin-Muñiz, "Carbon pool in Mexican Wetland Soils: Importance of the Environmental Service", *Life*, vol. 12, 2022. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/life12071032>.
60. Google LLC. <https://earth.google.com/>. [Fecha de acceso: 16 sep.]