



018530 - SWITCH

Sustainable Water Management in the City of the Future

Integrated Project
Global Change and Ecosystems

ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

Due date of deliverable: M60
Actual submission date: M60

Start date of project: 1 February 2006

Duration: 60 months

Lead partner: UNIVALLE

Revision: final

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	X
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	



ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

ARLYN VALVERDE SOLIS

Código: 0800024

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y
AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2010**

**ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN HUMEDALES
CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL**

ARLYN VALVERDE SOLIS
Código: 0800024

JUAN PABLO SILVA VINASCO, M.Sc
DIRECTOR

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - ÉNFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y
AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2010

GLOSARIO

<i>Término</i>	<i>Definición</i>
N ₂ O	Óxido nitroso
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
ORP	Potencial de Óxido-Reducción
T	Temperatura
P	Población
Q	Caudal
CF	Factor de conversión de Gramos a Teragramos
CEF	Factor de Emisión
TA	Fracción de Carga Orgánica Tratada Anaeróbicamente.
f	Flux
V	Volumen de la Cámara
A	Área de la Cámara
t	Intervalo de Tiempo
U	Factor de Conversión
C	Concentración de Gas en un Tiempo t.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
3 OBJETIVOS	8
3.1 OBJETIVO GENERAL	8
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	8
5 MARCO TEÓRICO	9
5.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO.	9
5.2 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	9
5.3 METANO (CH ₄)	9
5.4 ÓXIDO NITRÓSO (N ₂ O)	9
5.5 AGUA RESIDUAL.....	10
5.6 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.	11
5.7 HUMEDALES CONSTRUIDOS.....	11
5.7.1 <i>Humedales Construidos de flujo Superficial (HFS)</i>	11
5.7.2 <i>Humedales Construidos de flujo Subsuperficial Horizontal (HFSS)</i>	12
5.7.2.1 Principales Componentes de los HFSS	12
5.7.2.2 Medio de Soporte	13
5.7.2.3 Microorganismos	13
5.7.2.4 Vegetación	13
5.7.3 <i>Sinopsis de la Phragmites australis</i>	14
5.7.4 <i>Sinopsis de la Heliconia psittacorum</i>	15
5.7.5 <i>Procesos de Generación de GEI en Humedales Construidos</i>	15
5.8 METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN GEI.....	15
5.8.1 <i>Cámara Estática</i>	15
5.8.2 <i>Factores de Emisión</i>	16
5.8.3 <i>Balance de Materia</i>	16
6 METODOLOGÍA.....	17
6.1 LOCALIZACIÓN	17
6.2 UNIDADES EXPERIMENTALES	17
6.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	18
6.4 HIPÓTESIS ESTADÍSTICA.....	19
6.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	21
6.6 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	21
6.7 ESTIMACIÓN DE GEI.....	21
6.8 DETERMINACIÓN DEL FLUX DE GEI EN UNIDADES EXPERIMENTALES.....	22
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24

7.1	EFICIENCIA DE REDUCCIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	24
7.1.1	<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	24
7.1.2	<i>Temperatura</i>	24
7.1.3	<i>Potencial de Óxido Reducción-E_h (ORP)</i>	25
7.1.4	<i>Potencial de Hidrógeno (pH)</i>	25
7.1.5	<i>Correlación entre Parámetros físicoquímicos y GEI (CO_2, CH_4, N_2O)</i>	25
7.2	ESTIMACIÓN Y COMPARACIÓN GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O)	26
7.2.1	<i>Dióxido de Carbono (CO_2)</i>	26
7.2.2	<i>Metano (CH_4)</i>	30
7.2.3	<i>Óxido Nitróso (N_2O)</i>	32
8	CONCLUSIONES.....	35
9	RECOMENDACIONES.....	37
10	REFERENCIA.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 5.1. Ecuaciones simplificadas en la transformación microbiana de Nitrógeno en Humedales.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 5.2. Composición típica del agua residual doméstica cruda.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 5.3. Funciones de los principales componentes de los HFSS.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 5.4. Características usuales del medio para humedales HFSS.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 5.5. Propiedades de macrófitas utilizadas en HFSS.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 6.1 Características generales de las unidades experimentales..</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. 2. Principales características del diseño experimental.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. 3. Técnicas utilizadas para análisis físico-químicos.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 6. 4. Horario de mediciones</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 7. 1 Resultados de las concentraciones de los parámetros físicoquímicos</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 7. 2. Correlación entre parámetros físicoquímicos y GEI (CO₂, CH₄, N₂O)</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7. 3. Estadística descriptiva del flux CO₂.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7. 4. Prueba de ANOVA de los flux CO₂ en Humedales plantados y control</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7. 5. Emisión de flux CO₂ (g.m⁻²d⁻¹) por punto de muestreo</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7. 6. Prueba de ANOVA (flux de CO₂) por punto de muestreo entre sistemas</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7. 7. Prueba de ANOVA (flux de CO₂) por punto de muestreo en el mismo sistema</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 7. 8. Estadística descriptiva de las emisiones de flux CH₄</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. 9. Prueba de ANOVA de los flux CH₄ en Humedales plantados y control</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. 10. Emisión de flux CH₄ (g.m⁻²d⁻¹) por punto de muestreo.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 7. 11. Prueba de ANOVA ((flux de CH₄) por punto de muestreo.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 7. 12. Prueba de ANOVA ((flux de CH₄) por punto de muestreo en el mismo sistema</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 7. 13. Estadística descriptiva de las emisiones de flux N₂O.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 7. 14. Prueba de ANOVA de los flux N₂O en Humedales plantados y control</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 7. 15. Emisión de flux N₂O (g.m⁻²d⁻¹) por punto de muestreo</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7. 16. Prueba de ANOVA (flux de N₂O) por punto de muestreo</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7. 17. Prueba de ANOVA (flux de N₂O) por punto de muestreo en un mismo sistema</i>	<i>35</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 5.1. Humedal de flujo superficial</i>	12
<i>Figura 5.2. Humedal de flujo subsuperficial.....</i>	12
<i>Figura 5.3. Planta emergente y posibles interacciones en la rizósfera</i>	14
<i>Figura 5.4. Esquema Cámara estática</i>	15
<i>Figura 6.1. Ubicación zona del proyecto</i>	17
<i>Figura 6.2. Esquema de las unidades experimentales</i>	18
<i>Figura 6.3 Estimación total GEI por cada unidad Experimental.....</i>	19
<i>Figura 6.4 Comparación del mismo punto de medición entre unidades experimentales</i>	20
<i>Figura 6.5 Comparación GEI emitidos por cada punto en la misma unidad experimental.....</i>	21
<i>Gráfica 6.6 Tendencias de curvas modelo exponencial</i>	23
<i>Gráfica 7.1 Emisión promedio (flux CO₂ g.m⁻²d⁻¹) en cada Humedal</i>	26
<i>Gráfica 7.2 Comparación (flux CO₂ g.m⁻²d⁻¹) en Humedales plantados y control</i>	27
<i>Gráfica 7.3. Comparación del flux CO₂ entre puntos en los tratamientos.....</i>	28
<i>Gráfica 7.4. Emisión promedio del flux CH₄ (g.m⁻²d⁻¹) entre tratamientos</i>	30
<i>Gráfica 7.5 Comparación del flux CH₄ en Humedales plantados y control</i>	30
<i>Gráfica 7.6. Comparación del flux CH₄ entre puntos en los tratamientos.....</i>	31
<i>Gráfica 7.7 Emisión promedio (flux N₂O g.m⁻²d⁻¹) en cada Humedal.....</i>	33
<i>Gráfica 7.8 Comparación del flux N₂O en Humedales plantados y control.....</i>	33
<i>Gráfica 7.9. Comparación del flux N₂O entre puntos en los tratamientos</i>	34

RESUMEN

Los Humedales construidos son sistemas sencillos, de bajo costo de operación y mantenimiento, eficientes a la hora del tratamiento de las aguas residuales. Atractivos Para países envía de desarrollo. Sin embargo, al reducir los nutrientes y cargas contaminantes de las aguas residuales, estos pueden generar algunos subproductos como Metano, Dióxido de carbono y Óxido nitroso, Llamados gases de efecto invernadero, que a su vez generan problemas ambientales al contribuir al calentamiento global.

De este modo, partiendo de la reducción y transformación de materia orgánica y nutriente, por procesos físicos-químicos y biológicos del agua residual en Sistemas Naturales, se estimó la emisión de gases de efecto invernadero en Humedales construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal.

Para esto, se operaron tres unidades de *HFSS* a escala real, dos fueron sembrados con plantas ornamentales, uno con *Heliconia psittacorum*, otro con *Phragmites australis* y un tercero sin sembrar. Todos ellos sometidos a una carga hidráulica de $3.5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, que equivale a un tiempo nominal de retención hidráulico de 1.8 día. Caracterizaciones fisicoquímicas, fueron realizadas, al estimar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$). Utilizando la técnica de la cámara cerrada.

Los resultados obtenidos, indican que la eficiencia de eliminación de la DQO afluente estuvo entre el 66.2 y 87 %. En los sistemas sin plantar y plantados, respectivamente. La temperatura promedio de la cámara cerrada fue de 29 y 31°C, el Potencial de Óxido Reducción- E_h (ORP) oscilo entre -167 a -108 mV. En el sistemas control y plantados *respectivamente* mientras el pH fue casi neutro en todos los sistemas (6,3 a 7). La emisión promedio de gases para el sistema sin plantar (control) fue ($-0.002\text{CO}_2, 5\text{CH}_4$) $\text{g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y $0.013\text{N}_2\text{O}$ $\text{mg.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y los plantados con *Phragmites australis* ($0.052\text{CO}_2, 6.1\text{CH}_4, 0.016 \text{N}_2\text{O}$ $\text{mg.m}^{-2}\text{d}^{-1}$; *Heliconia psittacorum* ($-0.003\text{CO}_2, 3.3\text{CH}_4$) $\text{g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y $0.005 \text{N}_2\text{O}$ $\text{mg.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ respectiva mente.

Finalmente, los humedales construidos de este estudio, tuvieron tendencia de sumideros de Dióxido de Carbono (CO_2), emisores de metano (CH_4) y Óxido Nitróso (N_2O). Estas, no fueron estadísticamente significativa entre los tratamientos, Sin embargo, fueron eficientes en la reducción y transformación de contaminantes. Por tanto, siendo emisores y sumidero de GEI. Estos pueden ser una solución viable a problemas económicos y de contaminación al comercializar las plantas ornamentales y descontaminar las aguas residuales de muchas comunidades principalmente en los países en desarrollo.

1 INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la población mundial demanda altos consumos de recursos naturales, entre ellos el agua. Siendo este uno de los recursos más abundante en la naturaleza, a demás de ser un elemento esencial para la vida en el planeta. Sin embargo, su utilización, se determina por la disponibilidad en cuanto a calidad y cantidad, según el uso, que a su vez, generan aguas residuales que se vierten a fuentes receptoras y se convierten en potenciales riesgos para la salud Humana asociadas a enfermedades que son responsables del 80% de la morbilidad y mortalidad en los países en desarrollo(CEPIS/OPS., 2000).

De acuerdo con (CEPIS/OPS., 2000), menos del 6% de las aguas residuales domesticas producidas en América Latina son tratadas. Por lo anterior, surge la necesidad de reducir esta problemática. De ahí que, diferentes sistemas se utilicen para depurar las aguas residuales (Kiely, 1999), siendo los humedales construidos una tecnología eficaz y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, en países en desarrollo (Konnerup *et al.*, 2009). Sin embargo, faltan aspectos por estudiar de esta tecnología que despierta el interés científico y tecnológico que permitan comprender y entender los procesos de transformación que en su interior ocurren al generar subproductos como el dióxido de carbono(Johansson *et al.*, 2004), metano(Akratos and Tsihrintzis, 2007) y óxido nitroso(Johansson, 2003), los cuales están entre los llamados gases de efecto invernadero GEI (Baird, 2001).

Además, las emisiones de GEI han sido asociadas al calentamiento global y por ende al cambio climático, cuyas principales consecuencias son la elevación de la temperatura del planeta y el vapor de agua en la atmósfera, que afectan a millones de seres vivos, volviendo a comunidades enteras más vulnerables a diferentes enfermedades (Karki, 2007). Por tanto, se hace necesario cuantificar el aporte de las emisiones de estos gases desde las diferentes fuentes donde se producen y en el caso particular desde los humedales construidos utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

De acuerdo a lo anterior, y por la poca información que existe sobre el impacto de los humedales construidos plantados con *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* en países tropicales, este trabajo de investigación se enfocó en estimar las emisiones de gases de efecto invernadero en humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal. El cual permitió comparar las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O a escala real en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología para el tratamiento de Aguas Residuales Domesticas del Municipio de Ginebra- Valle del Cauca.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

El planeta enfrenta incrementos sucesivos de las concentraciones de gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen al calentamiento global (Jiang et al., 2009). Reportes de investigaciones recientes evidencian aumentos del 9-26%, 4-29% y 3-6% de las concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso respectivamente (Liikanen et al., 2006). Siendo ellos, los tres principales gases de efecto invernadero (Bani Shahabadi et al., 2010). El aumento de estos en la atmósfera se debe principalmente a la descomposición, reducción y transformación de la materia orgánica (Baird, 2001). De acuerdo con (Préndez and Lara-González, 2008), las fuentes emisoras causantes de los incrementos sucesivos de las concentraciones GEI en la atmósfera son de origen natural y antropogénico; de ahí que, la deforestación, agricultura, quemas, industriales, ganadería, rellenos sanitarios y sistemas de tratamiento de agua residuales, se consideren fuentes emisoras de GEI (Stadmark et al., 2009).

Se estima que las fuentes naturales aportan alrededor del 44% de óxido nitroso y 54% de metano, mientras, los suelos y humedales en zonas tropicales contribuyen aproximadamente con el 24% de metano CH_4 y 27% de N_2O (IPCC., 2001). Sin embargo, las aguas residuales dispuestas y tratadas en todo el mundo aportan menos del 3% de GEI (Bogner et al., 2007). Mientras las fuentes antropogénicas se asocian principalmente al desarrollo industrial, que involucra la quema de combustibles fósiles, actividades agroindustriales, manejo y disposición de residuos (IPCC, 2007).

Por otra parte, los estimados globales de GEI en los humedales construidos son inciertos, debido a la falta de mediciones de flujos y del entendimiento de los factores ambientales que los controlan (Mander et al., 2008). La mayoría de estudios reportados sobre producción de GEI en humedales se han centrado en los de tipo natural (Yi Lu et al., 1999). Aunque también se han reportado de sistemas agrícolas como los arrozales (Adhya et al., 2009) y lagos boreales (Huttunen et al., 2003).

En éste sentido, la cuantificación de gases traza es un tema de interés mundial por la tendencia creciente de las concentraciones de N_2O y CH_4 desde épocas industriales; pese a las bajas concentraciones de estos frente a las de dióxido de carbono, donde éstos representan un potencial de calentamiento equivalentes a 296 y 23 veces mayor que el CO_2 en una franja de 100 años (IPCC., 2001).

Un aspecto importante en la estimación de las emisiones de GEI, es el relacionado con el sector de tratamiento de aguas residuales (Liu et al., 2009). Debido, al potencial emisor que se genera al reducir y transformar los contaminantes por procesos físicos y biológicos, en humedales construidos (Chiemchaisri et al., 2009).

Los humedales construidos son utilizados cada vez más a nivel mundial para reducir nutrientes y materia orgánica contenida en los flujos de aguas residuales,(Pangala *et al.*, 2010), estos son plantados con diferentes especies entre las cuales la *Phragmites australis*, *Scirpus sp*, *Heliconia psittacorum* y *Typha sp*, son plantas ornamentales y de alta distribución biogeográfica (Brisson and Chazarenc, 2009). Sin embargo, los procesos microbianos convierten los nutrientes y materia orgánica en compuestos gaseosos (Johansson, 2003) que se emiten a la atmósfera en forma de gases de efecto invernadero y contribuyen al calentamiento global (Baird, 2001). Por tanto, el control de la contaminación del agua puede convertirse en un problema de contaminación atmosférica. que es motivo de investigación (Liikanen et al., 2006) como se detalla a continuación.

Así pues(Wang *et al.*, 2008a) en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales de Tsukuba, Japón, estudiaron la influencia de la vegetación y la emisión de metano en ocho Humedales construidos a escala laboratorio plantados con *Typha latifolia*, *Zizania latifolia*, *Phragmites australis*, sin vegetación empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con tiempos de retención y carga Hidráulica de 7 días y $0,42 \text{ L m}^{-2}\text{día}^{-1}$ respectiva mente. El gas se midió cada 15 días en doce meses por la técnica de la cámara cerrada y se analizaron por cromatografía de gases. Mientras los parámetros físico-químicos se analizaron una vez por semana. Los resultados obtenidos en los sistemas plantados y no plantados fueron de 432.6, 1620.6, 1062.8 ,267.1 $\text{mg m}^{-2}\text{día}^{-1}$ de CH_4 respectivamente lo cual indica una fuerte variación temporal y espacial en el sistema que van desde 0 hasta $16,76 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ de emisión total de CH_4 .

Igualmente(Wang *et al.*, 2008b) en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales de Tsukuba, Japón, evaluaron la emisión de óxido nitroso en cuatro Humedales construidos de flujo subsuperficial Plantados con *Typha latifolia* , *Latifolia Zizania* y *Phragmites Australia*, empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas sintética, con tiempos de retención hidráulico de 7días.Los gases se midieron dos veces al mes, tomando siete muestras cada 30 minutos por día de medición utilizando la técnica de la cámara cerrada analizados por cromatografía de gases. Las emisiones obtenidas variaron de-5,5 hasta $32,7 \text{ mg m}^{-2}\text{día}^{-1}$ de N_2O

También (Wu et al., 2009)cuantificaron en china el impacto de la relación de quince humedales construidos (microcosmos) de flujo subsuperficial plantados con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residual sintética compuesta de sacarosa, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KH_2PO_4 y KNO_3 . Ellos recolectaron, los gases en cuatro tiempos (0, 20, 40 y 60) minutos entre las 8:00 y 10 am. Estos se analizaron por cromatografía de gases. Los flujos estimados (N_2O) oscilaron entre $11,41 \pm 6,85 \text{ mg de N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

De igual manera (Ström et al., 2007) evaluaron el efecto de la vegetación en la emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O), en humedales construidos plantados con

Typha latifolia, *Phragmites australis* y *Juncus* para reducir el contenido de nutrientes en los flujos de aguas residuales domesticas de Suecia. Utilizando la técnica de cámara cerrada. Ellos encontraron variaciones de 1,39 a 77,5 g m⁻²día⁻¹ CO₂, -377 a 1387 y -13,9 a 31,5 mg. m⁻²día⁻¹ para el CH₄ y N₂O, respectivamente. Esto indica que las tasas de emisión de GEI son influenciadas por la presencia de vegetación con tendencias definidas en cada especie. Por lo tanto, los humedales construidos inciden en las emisiones anuales de gases de efecto invernadero. Además, el estudio recomienda que al proyectar estos sistemas se deben considerar los impactos causados.

Asimismo (Maltais-Landry *et al.*, 2009a) Estudiaron en el Jardín Botánico de Montreal, Québec, Canadá. El efecto de diferentes especies de macrófitas (*Phragmites australis* y *Typha angustifolia*) y la aireación artificial en las emisiones de Óxido nitroso. Utilizaron 12 mesocosmos, construidos y sembrados con vegetación madura, seis de los cuales les inyectaron continuamente aire difuso (2±1 min.L⁻¹) con una bomba de aire de membrana (hidroponía General Inc., modelo AP-0025B), de los seis restantes, dos fueron plantados con *P. australis*, dos con *T. angustifolia*, y se dejaron dos sin plantar (control). Las muestras recolectadas se analizaron por cromatografía de gases. Los resultados del estudio mostraron un rango de 0.97 a 1.07 g m⁻²d⁻¹ en la reducción de la carga (carga: 1,30 g m⁻²d⁻¹) de nitrógeno total para los sistemas diferentes del control. En los sistemas plantados y aireados la producción de Nitrógeno Amoniacal (NH₄⁺) y Metano (CH₄) fueron menores. Estos se correlacionaron negativamente con el potencial Oxido-reducción (redox) y la concentración de Oxígeno Disuelto (DO). Mientras la producción de N₂O se correlacionó positivamente con el potencial redox. Los flujos de dióxido de carbono, variaron notablemente entre los tratamientos, que van desde 0,077 hasta 1,86 g CO₂ m⁻²d⁻¹ para dióxido de carbono y 0,051 a 112 mg CH₄ m⁻²d⁻¹ para el metano. Siendo las emisiones mayores en las unidades plantadas y no aireadas. La vegetación *Typha angustifolia* mostró algunas emisiones mayores que *P. australis* sin gas en los tratamientos. Esto indica que la aireación artificial incide fuertemente en la fisiología de la vegetación, en la generación y emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera.

Igualmente (Maltais-Landry *et al.*, 2009b) investigaron en el jardín Botánico de Montreal, Québec, Canadá. El efecto de 3 diferentes especies de macrófitas y aireación artificial en las tasas de óxido nitroso (N₂O), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) producidos en humedales construidos de flujo subsuperficial Horizontal. Ellos utilizaron 14 mesocosmos de los cuales 6 fueron gasificados artificial mente, de estos, dos se plantaron con *phragmites australis*, dos con *T.angustifolia* y dos sin sembrar. De los ocho restantes se plantaron de a dos mesocosmos con cada especie de vegetación (*phragmites australis*, *T.angustifolia*, *phragmites arundinacea*) y dos sin vegetación (control). Las mediciones de los gases fueron realizadas entre las 9am y 12am, en diez muestreos, comprendidos entre julio y diciembre de 2006, analizados por cromatografía de gases. Donde se estimaron valores mínimos y máximos de emisiones. Estos oscilaron para los sistemas aireados sin

vegetación entre (0 a 0.07), (75 a 90), (0 a 13). Con vegetación *Phragmites* (0.03 a 0.11), (100 a 210), (0 a 10). *Typha* (0.02 a 0.06), (150 a 250), (0 a 13) N₂O, CO₂, y CH₄ mg m⁻²día⁻¹ respectiva mente. Y los no aireados, sin vegetación (0,02 a 0.06), (70 a 100), (60 a 110). Con vegetación, *Phragmites* (-0.01 a 0.014), (90 a 310), (20 a 80). *Typha* (-0.01 a 0.05), (110 a 330), (10 a 28). *Phalaris* (-0.01 a 0.03), (80 a 290), (29 a 55) mg N₂O, CO₂ y CH₄ m⁻²día⁻¹ respectiva mente. Esto indica que la aireación artificial reduce las emisiones de CH₄.

Para (Zhou et al., 2009) durante el año 2005 en la estación de Investigación de Ecosistemas de Humedales del Instituto de Medio Ambiente Atmosférico, Administración Meteorológica de China (CMA), utilizaron la técnica covarianza de Foucault (CE) y un sensor cuántico (LI-190Sb, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EE.UU.) cada 30 minutos para la medición directa de las emisiones de CO₂ y la radiación fotosintética activa, proveniente de un humedal plantado con *Phragmites australis*. Donde obtuvieron valores promedios de 7.48 ± 2.74 g m⁻²día⁻¹ de CO₂. La temporada de amplitud máxima diaria varió de -0,87 mg m⁻²s⁻¹ de CO₂ al medio día y 0,24 mg m⁻²s⁻¹ de CO₂ en la noche. Esto indica que la capacidad fotosintética y el intercambio gaseoso en los humedales se ven afectados no sólo por factores ambientales, sino también por las características de la vegetación.

Además (Pei-dong et al., 2002) entre junio de 1999 y agosto del 2000, cuantificaron los flujos de CH₄ y N₂O al tratar las aguas residuales municipales de China oriental en un sistema de humedal construido. Estos se midieron por el método de cámara cerrada donde los resultados fueron de 5.22 g CH₄ m⁻²día⁻¹ y 0.07 mg N₂O m⁻²día⁻¹.

Es más en Estonia (Mander et al., 2008) entre Marzo de 2001 a diciembre de 2002 emplearon dos humedales construidos plantado con *Phragmites australis* y *Scirpus sylvaticus* para el tratamiento de aguas residuales municipales domésticas. Ellos midieron las emisiones de N₂O, CH₄, CO₂ y N₂ por el método de la cámara cerrada. Reportaron los rangos mínimos y máximos de estos gases que oscilaron entre -0,07 a 62,2 N₂O mg m⁻²d⁻¹, -0,22 a 8924 CH₄ mg m⁻²d⁻¹, 0,06 a 28,8 CO₂ gm⁻²d⁻¹ y 0,07 a 0,71 N₂ gm⁻²d⁻¹ respectiva mente. Esto significa que los factores Ambientales son la causa principal de la variabilidad temporal y espacial de la generación y emisión de gases de efecto invernadero provenientes de humedales construidos.

Más aún en el experimento desarrollado por (Teiter and Mander, 2005) se estimaron las emisiones de N₂O, N₂, CH₄, y CO₂ de un humedal construido plantada con *Typha latifolia* y *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales al sur de Estonia. Estos utilizaron el método de la cámara cerrada de octubre 2001 a noviembre 2003. Donde encontraron variaciones de 0.33 a 119 mg CO₂ m⁻²h⁻¹, 30 a 770 mg CH₄ m⁻²h⁻¹, 2.4 a 8 mg N₂O m⁻²h⁻¹, 0.17 a 130 mg N₂ m⁻²h⁻¹ Adicionalmente, consideran que si todas las aguas residuales domésticas fueran tratadas por humedales construidos, al efectuar un balance de

Nitrógeno, el aporte de las emisiones trazas del gas N_2O al balance global podría ser menor del 1%.

También (García *et al.*, 2007) cuantificaron las emisiones provenientes de humedales contruidos a escala piloto para tratar las aguas residuales urbanas de Suquet, Barcelona (España) plantados con *Phragmites australis*, los sistemas se operaron con carga hidráulica de 36 mm/d tomaron muestras por un periodo de 4 a 7 horas continuas y se analizaron por cromatografía de gases, las tazas de emisión oscilaron entre 0.94 a 2.6 CH_4 mmol /m²día y 2.5 a 11 CO_2 mmol /m²día. Los resultados de este estudio indican el éxito de la biodegradación anaerobia en humedales contruidos, sin desconocer las ventajas y limitaciones propias de estos sistemas.

Al igual (Cheng *et al.*, 2007) estudiaron las emisiones de CH_4 y N_2O procedentes de un humedal contruido (mesocosmos) plantado con *Alterniflora S.* y *Phragmites australis*, el experimento se llevo a cabo en la universidad de Fudan, en Shanghai China, entre abril y octubre, 2004. Los gases se midieron en el mismo horario (8:00 a 10:00 am.), las muestras se recolectaron en cámara cerrada, en rangos de tiempo (0, 10, 20, 30 y 40) minutos. En este estudio se obtuvieron valores que van desde 0,16 a 1,12 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CH}_4$, 2.17 a 18.1 $\text{mg N}_2\text{O}$ para los sistemas plantados con *Alterniflora S.* y 0,21 a 0,66 $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 1.69 a 14.77 $\text{mg N}_2\text{O}$ plantados con *Phragmites*. Los autores resaltan la importancia de la vegetación como fuente de carbono disponible para los microorganismos al depurar las aguas residuales en humedales contruidos lo cual indica que los sistemas plantados con *Phragmites australis* generan menos emisiones de GEI a la atmósfera.

En adición, (Pícek *et al.*, 2007) a partir de junio a octubre de 2004 estimaron in situ las emisiones de CO_2 , CH_4 , N_2O en un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSS) plantado con *Phragmites australis* ubicado al sur de Bohemia, República Checa. Utilizando la técnica de la cámara cerrada y analizados por cromatografía de gases. Ellos encontraron variaciones de 4 a 309 $\text{mg CO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ y de 0 a 93 $\text{mg CH}_4 \text{ cm}^{-2} \text{h}^{-1}$. Los resultados de éste estudio indicaron que el Nitrogeno fue eliminado a una tasa de 1.16 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, siendo el N_2 el único subproducto de la desnitrificación, medido a una tasa de 1.0 $\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$, mientras que las emisiones de N_2O en humedales contruidos no fueron detectadas.

(Inamori *et al.*, 2007) evaluaron las emisiones de N_2O y CH_4 en microcosmos (humedales a escala de laboratorio), plantados con *Phragmites australis* y *Latifolia Zizania*, alimentados con aguas residuales sintética compuesta de dextrina, peptona BACT, extracto de levadura, extracto de carne, NaCl, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_2)_2\text{-CO}$, KH_2PO_4 , y KCl, con diferentes concentraciones de DBO (50, 100, y 200 mg L^{-1}). Las muestras de los gases se recolectaron por la técnica de la cámara cerrada y se analizaron por cromatografía de gases, estos se midieron mensualmente desde julio 2001 a diciembre de 2002 y las muestras de agua cada

10 días. En este orden de ideas la tasas de emisión vario de 0 a 0.14 mg N₂O m⁻² h⁻¹ y de 0 a 45 mg CH₄ m⁻² h⁻¹. Mientras la eliminación para la DBO fue del 95%.

Por otra parte, las anteriores investigaciones se caracterizaron por el uso de la *phragmites australis* como especie dominante de mayor estudio reportado en la generación de gases de efecto invernadero.

En este orden de ideas, al momento de hacer la revisión de literatura no se encontraron experiencias reportadas de emisiones de gases de efecto invernadero como subproducto de la utilización de la planta ornamental nativa del trópico (*Heliconia psittacorum*) al tratar las aguas residuales domesticas, sin embargo, algunos autores resaltan la eficacia de esta planta como agente activo en los procesos de tratamiento secundario o terciario de agua residuales domesticas(Sim *et al.*, 2008).

Aunque, las emisiones provenientes de los humedales construidos han sido estudiado por algunos autores (Johansson *et al.*, 2004; Gui *et al.*, 2007; Liikanen *et al.*, 2006; Whiting and Chanton, 2003). Aun son incipientes las experiencias reportadas en la literatura sobre la estimación de gases de efecto invernadero generados en la depuración de las aguas residuales, por tanto, se requiere de un mayor número de estudios apropiados para determinar el incremento de las concentraciones de estos en diferentes partes del mundo y principalmente en países tropicales.

Finalmente, dado que es poca la información documentada sobre la emisión y estimación de GEI en humedales construidos plantados con *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* para el trópico, esta investigación contribuye a nuevos conocimientos para entender y comprender los fenómenos que generan GEI.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero en humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal.

3.2 Objetivos Específicos

Comparar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en humedales construidos plantados con *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis*.

Explicar el comportamiento de las emisiones de GEI en un HFSS respecto a los parámetros fisicoquímicos de operación (pH, ORP, Temperatura).

4 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Los humedales construidos como sistemas depuradores de aguas residuales aportan apreciables beneficios sociales, económicos y ambientales, al reducir toxinas y exceso de nutrientes del agua residual, sin embargo durante la transformación de la materia orgánica generan gases de efecto invernadero que pueden ser emitidos a la atmósfera y contribuir de esta manera al calentamiento global; en consecuencia se plantea la siguiente hipótesis.

1. La vegetación presente en un humedal construido puede afectar la emisión de GEI.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Gases de efecto Invernadero.

Son aquellos que en la atmósfera regulan la radiación emitida por la superficie terrestre retienen calor y producen el efecto invernadero; siendo, el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) GEI (IPCC, 2007). A la vez, se registran, aumentos anuales de 0,5%, 0,3% y 1,1% de estos en la atmósfera, respectivamente (Guo and Zhou, 2007).

5.2 Dióxido de Carbono (CO_2)

Este gas de efecto invernadero (GEI) contribuye a mantener la temperatura en la tierra en condiciones habitable. La intensificación de la radiación solar provoca una mayor emisión del CO_2 que permanece disuelto en los océanos, adicional mente, se registran aumentos de las emisiones de este hacia la atmósfera que ha pasado de unas 280 ppm en la era preindustrial a unas 379 ppm en 2005 (aún cuando su concentración global en la atmósfera es de apenas 0,03%). Según el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2007), en oposición a otros científicos que dudan de la influencia de los GEI en los incrementos de temperatura registrados en la superficie terrestre (0.6 °C en los últimos 100 años).

5.3 Metano (CH_4)

Se caracteriza por ser el segundo compuesto que más contribuye al efecto invernadero siendo el potencial de calentamiento de este 23 veces mayor al del dióxido de carbono (CO_2) en una franja de 100 años (IPCC., 2001). Por otra parte, diferentes fuentes aportan metano a la atmósfera entre las cuales se encuentran los rellenos sanitarios (33%), estiércol (29,7%), petróleo y gas natural (17.9%), minería de carbón (4%), pantanos (23%) y las aguas residuales (2,6%). Recolectada del 70% de metano formado durante la mineralización de la materia orgánica bajo condiciones estrictamente anaeróbicas.

5.4 Óxido Nitróso (N_2O)

Gas traza de efecto invernadero, contribuye al calentamiento global, al cambio climático y a la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera (Tallec *et al.*, 2008). Dura aproximadamente 120 años, posee un potencial de calentamiento atmosférico de 296 en relación a las emisiones de CO_2 en horizonte temporal de 100 años (Wu *et al.*, 2009). la concentración atmosférica de este gas aumenta alrededor del 0,3% por año⁻¹ (Sovik and Klove, 2007). Además, se produce en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Kampschreur *et al.*, 2009), en Humedales construidos (Inamori *et al.*, 2008).

durante el tratamiento biológico del nitrógeno (Paredes et al., 2007), cuando el nitrato (NO_3^-) es reducido a nitrógeno molecular (N_2) (Tao and Wang, 2009), proceso conocido como desnitrificación siendo esta la principal fuente de óxido nitroso (N_2O) (Tallec *et al.*, 2006). Este proceso es complejo y fuertemente influenciado por factores ambientales para transformar a través de procesos microbianos los nutrientes del agua residual a compuestos gaseosos que se liberarán a la atmósfera (Paredes et al., 2007).

Tabla 5.1. Ecuaciones simplificadas en la transformación microbiana de Nitrógeno en Humedales.

No.	Proceso	Conversión bioquímica
1	Nitritificación	$\text{NH}_4^+ + 1.5^\circ_2 + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
2	Nitratación	$\text{NO}_2^- + 0.5^\circ_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$
1+2	Nitrificación	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3^- + 2 \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
3	Denitratación	$2\text{NO}_3^- + \text{C} \rightarrow 2\text{NO}_2^- + \text{CO}_2$
4	Denitrificación via nitrito (Denitritificación)	$4\text{NO}_2^- + 3\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 4 \text{HCO}_3^-$
3+4	Denitrificación	$4\text{NO}_3^- + 5\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{N}_2 + 4 \text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$
5	Nitrificación parcial (50% conversión)	$\text{NH}_4^+ + 0.75\text{O}_2 + \text{HCO}_3^- \rightarrow 0.5\text{NO}_2^- + 0.5\text{NH}_4^+ + \text{CO}_2 + 1.5\text{H}_2\text{O}$
6 ^a	Anamox	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
1+2+3+4	Tradicional Nitrificación – Denitrificación	$\text{NH}_4^+ + 8\text{O}_2 + 5\text{C} + 4 \text{HCO}_3^- \rightarrow 2\text{N}_2 + 9 \text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O}$

Fuente: (Paredes et al., 2007)

5.5 Agua Residual

Un agua residual doméstica es el líquido resultante de las actividades desarrolladas en los hogares de una comunidad, con características específicas que la hacen compleja en composición y variabilidad (Sandoval, 2003). En la tabla 5.2, se observa la composición típica de un agua residual doméstica.

Tabla 5.2. Composición típica del agua residual doméstica cruda.

CONTAMINANTES	Unidades	CONCENTRACIÓN		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos Totales (ST)	mg/l	390	720	1230
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	120	210	400
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	5	10	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/l	110	190	350
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	250	430	800
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	70
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	7	12
Coliformes Totales	UFC/100 ml	$10^6 - 10^8$	$10^7 - 10^9$	$10^7 - 10^{10}$

Fuente: (Metcalf y Eddy., 2003)

5.6 Sistemas de Tratamiento de Agua Residual.

Son llamados sistema de tratamiento de agua residual al conjunto de operaciones y procesos, físicos, químicos o biológicos necesarios para descontaminar las aguas residuales (Pokhrel and Viraraghavan, 2004); además, según las características de éstas los sistemas de tratamientos son físicos-químicos cuando se adicionan reactivos químicos para decantar los sólidos en suspensión presentes en el aguas residuales y biológicos cuando intervienen microorganismos que actúan en la reducción y transformación de la materia orgánica e inorgánica, presente en las aguas residuales (Medina and Hinojos, 2009).

Entre los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales se encuentran, los humedales construidos los cuales se constituyen en una solución eficiente y de bajo costo para comunidades dispersas y de escasos recursos económicos (Kadlec, 2009).

5.7 Humedales Construidos.

Los Humedales construidos son sistemas diseñados y construidos por el ser humano, se caracterizan por ser de medio saturado, complejos y plantados con vegetación sumergida, emergente o flotante que simulan un ambiente natural para tratar y transformar los contaminantes en las agua residuales (Odum, 2000). Además, estos se clasifican de acuerdo al tipo de flujo en superficiales y sub.-superficiales, horizontal o vertical (Verhoeven and Meuleman, 1999).

Por otra parte, en los humedales construidos crecen vegetales, animales y microorganismos adaptados al ambiente natural, asociados a procesos físico-químicos o biológicos, necesarios para reducir las cargas contaminantes de las aguas residuales (Mitsch and Gosselink, 2000).

5.7.1 Humedales Construidos de flujo Superficial (HFS)

Los humedales construidos de flujo superficial son estanques o canales abiertos, en ellos, la superficie del agua esta expuesta a la atmósfera, el medio de soporte sostiene la vegetación (Rodríguez, 2003). Además, se caracterizan por recibir aguas residuales pre-tratadas para ser depuradas a través de los microorganismos adheridos al medio de soporte y raíz de la planta (Crites and Tchobanoglous, 2000).

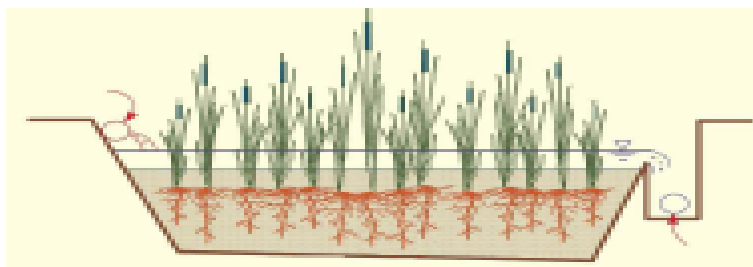


Figura 5.1. Humedal de flujo superficial

Fuente:(Polprasert, 2004)

5.7.2 Humedales Construidos de flujo Subsuperficial Horizontal (HFSS)

Son sistemas contruidos de fondo impermeable para tratar diversos tipo de aguas residuales domésticas, industriales o municipales (Vymazal, 2009). Las aguas residuales no están expuestas a la atmósfera y se diferencian de otros sistemas por la circulación del flujo, en estos el agua fluye entre el medio poroso de forma horizontal, además emiten poco olor y son plantados con macrofitas emergentes (U. S. EPA., 2004).

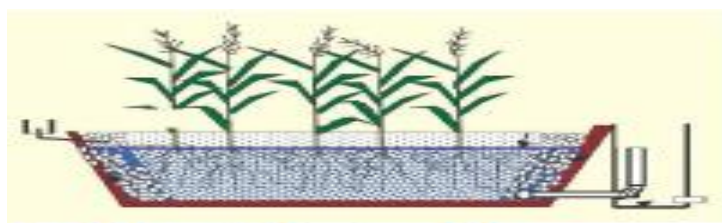


Figura 5.2. Humedal de flujo subsuperficial

Fuente:(Polprasert, 2004)

5.7.2.1 Principales Componentes de los HFSS

Los principales componentes de los HFSS lo conforman el medio de soporte, microorganismos y vegetación. En la tabla 5.3 se muestran las principales funciones de los componentes en los HFSS.

Tabla 5.3. Funciones de los principales componentes de los HFSS

Elementos del Proceso	Principales Funciones	Notas
PLANTAS	Mantener la capacidad hidráulica del suelo.	Para el desarrollo de raíces y rizomas.
	Suministrar oxígeno al suelo.	Solamente durante el día y cerca de las raíces.
	Mantener bacterias	Alrededor de las raíces o de las espigas.
MICROORGANISMOS	Nitrificación/desmitificación	Si se acierta en crear condiciones secuéciales aerobia y anaerobias.
MEDIO DE SOPORTE	Remoción de nutrientes (fósforo) y de ciertos metales por adsorción.	Es posible si el medio contiene parcialmente iones ferrosos, de aluminio u otros que puedan favorecer la adsorción.
	Remoción de nutrientes (fósforo) y de ciertos metales por adsorción.	Es posible si el medio contiene parcialmente iones ferrosos, de aluminio u otros que puedan favorecer la adsorción.

Fuente: (OPS/OMS, 1999)

5.7.2.2 Medio de Soporte

El medio en los sistemas HFSS puede ser suelo, arena o grava. Los poros del medio sirven de canales para el transporte del agua. Además, el medio granular utiliza mecanismos directos (interacciones físicas y químicas) e indirectos (soporte para el crecimiento de las plantas y desarrollo de colonias de microorganismos) para la eliminación de agentes contaminantes del agua residual que circula por su interior(Del Canto, 2004).

Los tamaños del medio granular pueden afectar el régimen hidráulico del humedal, afectan la conductividad hidráulica, al disminuir con el tiempo debido al desarrollo de raíces, biopelícula adherida, acumulación de sólidos en los poros que dan paso a la formación de precipitados. (Manios *et al.*, 2003). Estos pueden causar problemas de obstrucción, asociados al mal funcionamiento que reducen la eficiencia del tratamiento (Francia, 2002). En la tabla 5.4 se presentan las características típicas del medio de soporte utilizados en HFSS.

Tabla 5.4. Características usuales del medio para humedales HFSS.

Tipo de Medio	Tamaño Efectivo D ₁₀ (Huttunen et al.)	Porosidad n (%)	Conductividad Hidráulica k_s (m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	28 – 32	100 – 1000
Arena con grava	8	30 – 35	500 – 5000
Grava fina	16	35 – 38	1000 – 7500
Grava mediana	32	36 – 40	10000 – 100000
Roca triturada	128	38 – 45	50000 – 100000

Fuente: (EPA, 1993)

5.7.2.3 Microorganismos

Los procesos de transformación que ocurren en los sistemas de HFSS están ampliamente regulados por los microorganismos (bacterias, levaduras, hongos y protozoarios) y su metabolismo, siendo las bacterias el grupo fundamental en el tratamiento de las aguas residuales (Kaseva, 2004);(Lee et al., 2004) Durante la actividad microbiana las sustancias orgánicas e inorgánicas son transformadas en sustancias inocuas o insolubles, éstos procesos también alteran las condiciones del potencial redox del sustrato y consecuentemente la producción y consumo de GEI en el suelo (Dusek *et al.*, 2008).

5.7.2.4 Vegetación

La vegetación desempeña un papel integral al transferir Oxígeno a la raíz de la planta, actúa como inyector natural de este, el cual es liberado por difusión. Al igual esta, proporciona un medio para el soporte de los microorganismos responsables del tratamiento biológico (Metcalf y Eddy., 2003). Así, puede favorecer las condiciones aeróbicas o anaeróbicas para metabolizar los contaminantes presentes en las aguas residuales teniendo en cuenta la profundidad de penetración de las raíces en el medio.

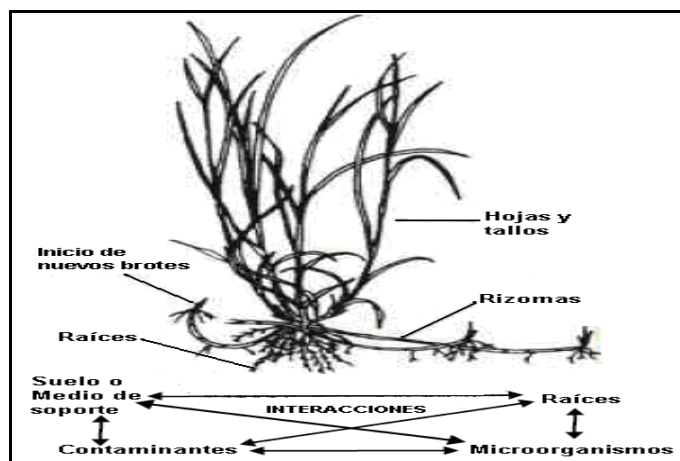


Figura 5.3. Planta emergente y posibles interacciones en la rizósfera
Fuente: (Stottmeister *et al.*, 2003)

Por otra parte, para (Stottmeister *et al.*, 2003) la vegetación en su zona radicular provee un área superficial para el crecimiento de la película fija de microorganismos y el desarrollo de la ecología microbial típica de estos ecosistemas (Peña, 2003). Además, las raíces de las plantas liberan al medio circundante pequeñas cantidades de compuestos orgánicos (azúcares, aminoácidos) que favorecen a ciertos microorganismos que viven a su alrededor, generando una especie de esfera conocida como rizósfera (Duan *et al.*, 2009).

Tabla 5.5. Propiedades de macrófitas utilizadas en HFSS

Especies	Nombre común	Nombre Científico	Penetración raíces(m)	Tasa de Transferencia de O ₂ (g/m ² -d)	plantas/m ²
Reed	Cáñamo	<i>Phragmites sp.</i>	0.6 – 0.76	4.8	2 – 4
Bulrush	Papiro	<i>Scirpus sp.</i>	0.76	5.7	2 – 4
Rushes	Junco	<i>Juncus sp.</i>	0.3	Nd	Nd
Bamboo	Guadua	<i>Bambusa sp.</i>	1.0 -2.0	Nd	Nd

Fuente: (Peña, 2003)

5.7.3 Sinopsis de la *Phragmites australis*

Es una planta herbácea, perenne, erecta, muy robusta y de crecimiento acelerado, ella puede alcanzar más de 3 metros de altura. Mientras, en su zona radicular se desarrollan rizomas leñosos, escamosos, nudosos. El tallo aéreo es generalmente simple, y está formado por una sucesión de nudos y entrenudos que están cubiertos por las vainas de las hojas. Las hojas son enteras, largas (20-70 cm.), estrechas (1-5cm.), agudas y de color verde grisáceo durante la época de desarrollo vegetativo. La phragmites Australis por su rusticidad y su amplia distribución (está presente en todo el mundo menos en la antartidad). Se puede plantar a una profundidad comprendida entre los 0 y 0.8 metros. Debido a la penetración profunda y vertical de sus rizomas que a su vez favorece el intercambio de oxígeno desde los rizomas.

5.7.4 Sinopsis de la *Heliconia psittacorum*

Las *Heliconias* son plantas perennes, pertenecen a la familia *Heliconiaceae*, del orden *Zingiberales*. Son nativas de la América Tropical, desde el Trópico de Cáncer en el centro de México, hasta el Trópico de Capricornio en América del Sur. Ellas se explotan comercialmente en países como Colombia, Costa Rica y Brasil, donde son utilizadas como flores de corte, debido a la exuberante belleza de sus flores, cuyos colores varían principalmente entre tonalidades de rojo y amarillo.

Las *Heliconias* crecen en áreas húmedas, sub-húmedas, entre 0 y 963 msnm, a temperatura promedio de 28°C, Ellas no producen flores a temperaturas mayores de los 35°C. Los suelos para el cultivo de este vegetal, es rico en materia orgánica, bien drenados, planos o con pendientes suaves, con buena proporción entre arena y arcilla. El pH óptimo del suelo para el desarrollo de estas plantas tropicales varía de 5 a 7 (Akratos and Tsihrantzis, 2007).

5.7.5 Procesos de Generación de GEI en Humedales Construidos

En un sistema de humedal construido los GEI son generados cuando a través de la interacción suelo-vegetación-microorganismos se transforma la materia orgánica, mediante la acción microbiana en presencia o ausencia de la disponibilidad de Oxígeno que gobiernan la liberación de CO₂ o CH₄, respectivamente (Wang et al., 2008a). Asimismo, el N₂O se forma por procesos de nitrificación y desnitrificación del nitrógeno contenido en las aguas residuales.

5.8 Metodologías de Estimación GEI

Algunas metodologías son utilizadas para estimar gases de efecto invernadero. Cámara estáticas (mediciones en sitio), balance de materia y factores de emisión.

5.8.1 Cámara Estática

Es un método simple y de bajo costo para estimar los cambios de concentración de gases provenientes del suelo en tiempo y volumen definido. Este no permite intercambio de gases entre el interior y exterior de la cámara, ni contempla los fenómenos de difusión pero si la inclusión de dispositivos mecánicos (ventilador) para homogenizar el gas



Figura 5.4. Esquema Cámara estática

5.8.2 Factores de Emisión

Los factores de emisión permiten obtener valores representativos de la generación (actividad) y emisión de contaminante a la atmósfera. Para estimar metano (CH₄) y Óxido nítrico (N₂O) proveniente de las aguas residuales domésticas por este método el IPCC propone las siguientes fórmulas:

$$CH_4 (Tg / año) = CF * CEF * P * Q * COD * TA \text{ y } N_2O (kg/año) = N * FE * (44/28)$$

Donde:

CF: Factor de conversión de gramos a teragramos (10¹²).

CEF: Factor de emisión (g CH₄/g DQO).

P: población

Q: Caudal (m³/hab-año)

COD: Carga orgánica removida (g/m³).

TA: Fracción de carga orgánica tratada anaeróbicamente.

N: nitrógeno del efluente descargado.

FE: factor de emisión Una de las ventajas de este método de evaluación incluye la posibilidad de elaborar inventarios de emisiones en poco tiempo.

5.8.3 Balance de Materia.

Es un método fundamentado en la conservación de la materia, contempla las entradas, salidas, generación y transformación de contaminantes y materia orgánica en los sistemas de tratamiento de aguas residuales para estimar la producción de gases de efecto invernadero por medio de relaciones estequiométricas.

6 METODOLOGÍA

6.1 Localización

El trabajo de investigación se realizó en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología en tratamiento de Aguas Residuales Domesticas de ACUAVALLE S.A E.S.P. Ubicada a 1.1 Km. del casco urbano del Municipio de Ginebra- Valle del Cauca ($3^{\circ}43'50''$ latitud norte y $76^{\circ}16'20''$ latitud oeste). Se encuentra a 1040 msnm, con temperatura promedio de 23°C y precipitación media anual de 1280 mm. Ver Figura 6.1.

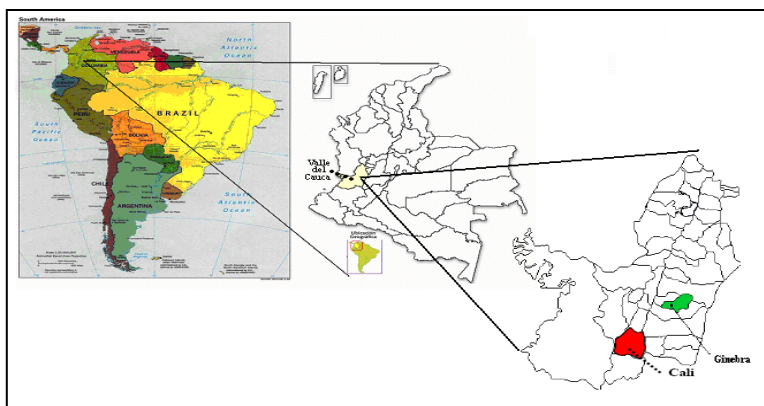


Figura 6.1. Ubicación zona del proyecto

6.2 Unidades experimentales

La unidad experimental (UE) del estudio fue el modulo de Humedales de Flujo Subsuperficial (HFSS) a escala real conformado por tres unidades, dos fueron plantados, uno con *Heliconia psittacorum*, otro con *Phragmites australis* y un tercero sin plantar (control). El medio de soporte empleado estuvo compuesto por 3 capas, una inferior (grava de $3/4''$), media (gravilla de $3/8''$) y superior (carbonilla) con profundidades de 0.5, 0.05 y 0.05m respectiva mente. Cada unidad fue dividida en tres zonas o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03). Cada punto provistos de 4 plantas de igual altura y tamaño en las unidades sembradas (ver figura 6.2).

Las unidades sembradas se plantaron con vegetación de crecimiento acelerado(*Heliconia psittacorum*, *Phragmites australis*), estas, responden de diferentes formas de bio-acumulación y transformación de sustancias contaminantes, varían en la absorción y transporte de nutrientes de raíces a tallos(Hsu, 2007). Por tanto, en periodos prolongados perturban el aparato fotosintético que altera la fisiología vegetal (Xu *et al.*, 2010). Al igual, la producción de biomasa, crecimiento y desarrollo de la vegetación. Sin embargo, en periodos cortos (8días) no presentan diferencias significativas en la eficiencia fotosintética, aún con variación de cargas contaminantes (Herrera, 2007). Por eso, algunos autores estimaron GEI en periodos inferiores a ocho días. (Thomas *et al.*, 1996; Koelbener *et al.*, 2010) para equiparar la eficiencia fotosintética y garantizar la comparación estadística de

las unidades experimentales, como en éste estudio. Los parámetros de diseño y demás características de las UE se describen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Características generales de las unidades experimentales..

Humedal	Caudal M ³ .d ⁻¹	TRH días	Largo	Ancho	Porosidad %	Profundidad del agua	Volumen efectivo(M ³)
Phragmites	3,5	1,8	9	3	47	0,5	6,4
Control	3,5	1,8	9	3	47	0,5	6,4
Heliconia	3,5	1,8	9	3	47	0,5	6,4

El Afluente del sistema (HFSS) recibe un Tratamiento Preliminar, luego un Primario (laguna anaerobia) con el fin de reducir los residuos sólidos gruesos, arenas, grasas, materia orgánica y sólidos suspendidos.

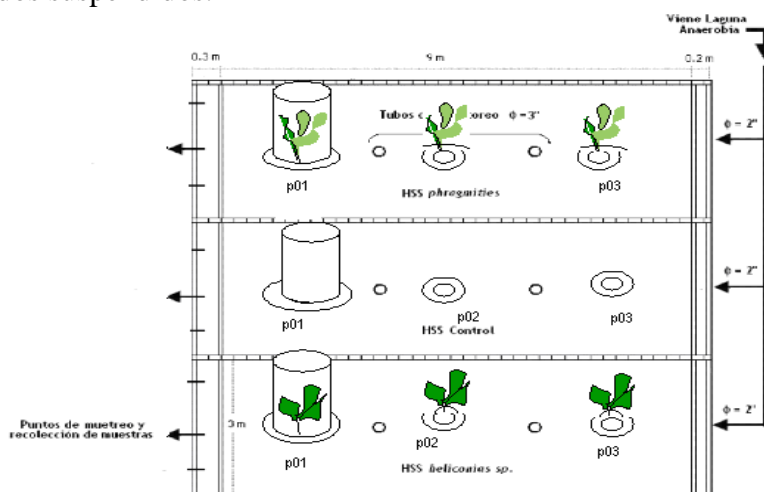


Figura 6.2.esquema de las unidades experimentales

6.3 Diseño Experimental

Se utilizaron 3 unidades, un control (SV) y dos plantados, uno con *Heliconia psittacorum* y otro con *Phragmites. Australis*. La vegetación utilizada fue seleccionada de acuerdo con sus características fisiológicas (e.g. altura de la planta, grosor del tallo). Los valores seleccionados para α y $1 - \alpha$ son de 0.05 y 0.95 respectivamente. Donde: α = Nivel de significancia, y $1 - \alpha$ = Nivel de confianza. Estos valores garantizaron la confiabilidad y la validez estadística de los resultados. En la Tabla 6.2. Se presentan las principales características del diseño experimental.

Tabla 6. 2. Principales características del diseño experimental

FACTOR	NIVEL	TOTAL	TRATAMIENTO
Vegetación	<i>Phragmites</i> ; <i>Heliconia</i> ; Control	3 Niveles	3

Para evaluar la generación de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) en los HFSS plantados con *Heliconia psittacorum*, *Phragmites australis* y sin vegetación. En cada tratamiento, se utilizará un diseño factorial. De acuerdo a (Montgomery and Runger, 2002) el modelo estadístico correspondiente a este diseño se representa por la ecuación (Ec.1).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. (1).}$$

Donde:

- Y_i = Variable de respuesta del i-ésimo tratamiento.
- μ = Promedio general de la variable de respuesta.
- τ_i = Efecto debido a la presencia o ausencia de vegetación.
- ε_{ij} = Error a factores no controlables.

6.4 Hipótesis estadística

Supuesto1: Comparación de las emisiones totales de GEI de cada Unidad Experimental (*Heliconia psittacorum*, Control, *Phragmites australis*) ver fig. 6.3

H₀₁: No existen diferencias significativas en la emisión de gases de efecto invernadero Relacionada con la Presencia o ausencia de vegetación

H_{a1}: Al menos un factor vegetación es diferente en la emisión de gases de efecto Invernadero relacionado con la presencia o ausencia de vegetación.

$$H_0: \mu_P = \mu_C = \mu_H \quad \text{VS} \quad H_a: \mu_i \neq \mu_j \quad \exists i \neq j$$

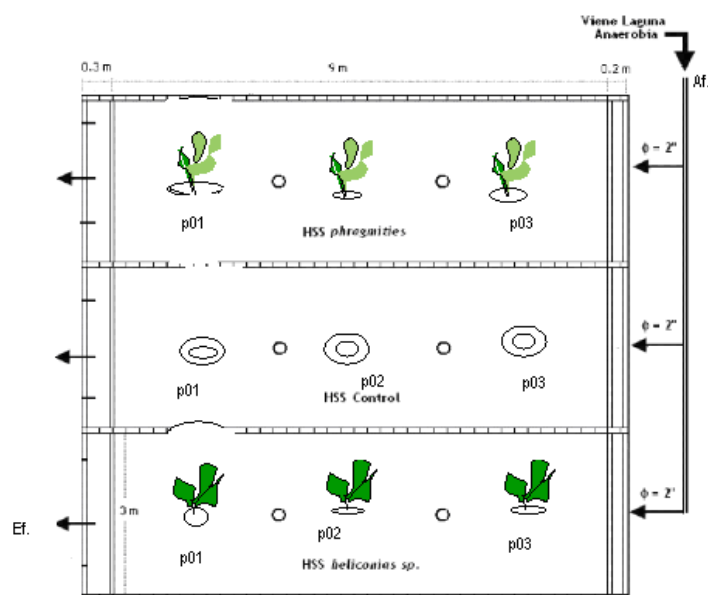


Figura 6.3 Estimación total GEI por cada unidad Experimental

Supuesto 2: Comparación de las emisiones de GEI del punto (p01) en el sistema plantado con *Helicón psittacorum*, con el punto (p01) del sistema plantado con *Phragmites australis* y con el punto (p01) del sistema sin plantar (control). Es decir, el mismo punto en cada unidad experimental. Lo mismo ocurre con el punto 2 y 3 respectivamente (ver fig.6.4).

H02: No hay diferencias significativas en la emisión de gases de efecto invernadero de igual punto entre los sistemas.

Ha2: al menos hay una diferencia significativa en la emisión de gases de efecto invernadero en igual punto entre los sistemas.

$$H_0: \mu_{pi} = \mu_{ci} = \mu_{Hi} \quad VS \quad H_a: \mu_i \neq \mu_j \quad \exists i \neq j$$

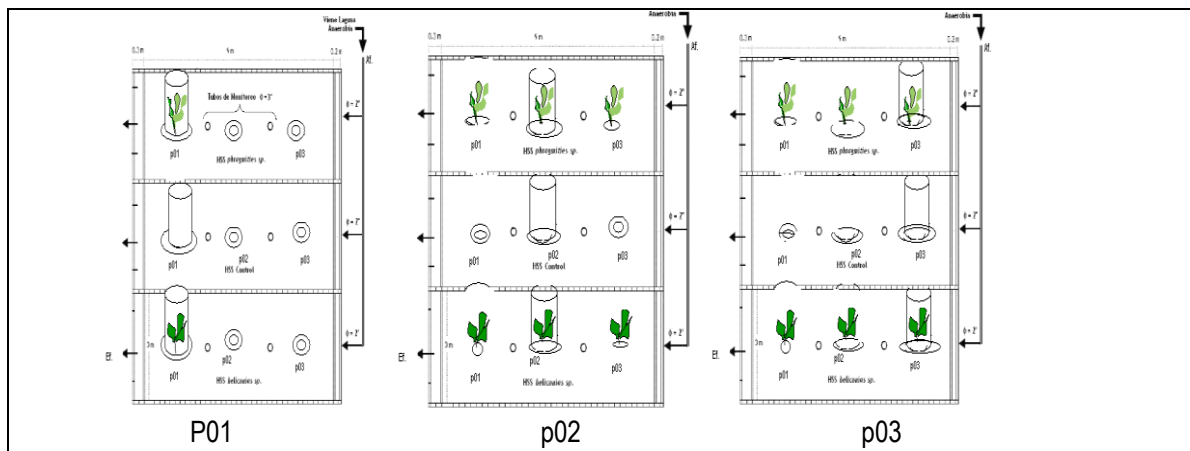


Figura 6.4 Comparación del mismo punto de medición entre unidades experimentales

Supuesto 3: Comparación de las emisiones estimadas entre los puntos (p01, p02, p03) en el sistema plantado con *Helicón psittacorum* para su respectivo análisis. Lo mismo ocurre para el sistema plantado con *Phragmites australis* y sin plantar (Control). Cada unidad se analiza independientemente como se muestra (ver fig.6.5)

H03: No existen diferencias significativas en la emisión de gases de efecto invernadero Entre puntos dentro del mismo sistema.

Ha3: Al menos un punto es diferente en la emisión de gases de efecto invernadero entre Puntos dentro del mismo sistema.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad VS \quad H_a: \mu_i \neq \mu_j \quad \exists i \neq j$$

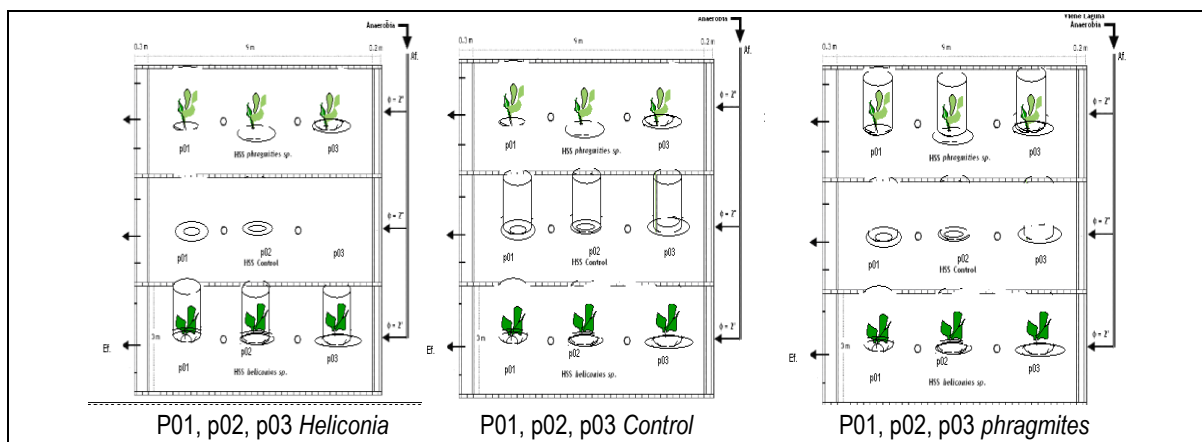


Figura 6.5 Comparación GEI emitidos por cada punto en la misma unidad experimental

6.5 Análisis estadístico

Un análisis de varianza ANOVA se aplicó para determinar la significancia y la eficiencia de los parámetros físico-químicos en la emisión de gases de efecto invernadero. Para esto, la normalidad de los datos fue chequeada utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software SPSS Versión 17.

6.6 Determinación de parámetros físico-químicos

El agua residual fue monitoreada en cada humedal con las técnicas descritas en los Métodos Estándar para Análisis de Agua y Agua Residual (APHA, 2005). Un número de variables físicoquímicas en el agua residual fueron medidas (Tabla 6.3) con base en muestras compuestas de 1,5 horas tomadas a la entrada y salida de cada unidad.

Tabla 6. 3. Técnicas utilizadas para análisis físico-químicos

Parámetros	Técnicas	Código de Standard Methods
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado	5220-D
Potencial de óxido reducción (ORP)	Potenciométrico	2580-B
Potencial de Hidrógeno (pH)	Potenciómetro	
Temperatura (°C)	Termómetro	

6.7 Estimación de GEI

Para estimar los GEI en los Humedales construidos se utilizó la metodología de cámaras estáticas (CE)(Wu et al., 2009). Esta permitió determinar la variación de la concentración de los gases emitidos en cada punto de muestreo. De esta manera, se construyeron 3 (CE), en acrílico de forma cilíndrica (0.40 M) de diámetro y 1,7M de altura. En su interior se ubicó un ventilador a 0.30 M de altura, del medio de soporte y sello hidráulico del humedal, éste para favorecer la mezcla y homogenización del gas. Y en la parte superior un termómetro y

una manguera de plástico con una llave de paso de 3 vías, formaron el puerto de medición. Las cámaras se ubicaron de forma vertical y en simultáneo en los puntos (p01) de muestreo de cada unidad experimental. Una vez fijas, se procedió a las mediciones.

Estas se realizaron del 18 al 25 marzo del 2009, entre las 7am y 11 p.m. bajo características similares de las condiciones ambientales. Las muestras se recolectaron, en rangos de tiempos (0, 30, 60, 90) minutos por cada punto de muestreo (ver tabla 6.4). Esto, para permitir la acumulación de los gases al interior de la cámara y luego extraer manualmente por medio de una jeringa, muestras del gas e inyectar a un vial para luego ser analizado (cualificado y cuantificado) por cromatografía de gases (Shimadzu GC-14A) equipado con un detector de captura de electrones (ECD), fase móvil (gas de arrastre) N₂ de alta pureza con flujo de 22mL/min, temperatura 320°C y 10⁰C de sensibilidad. En el laboratorio de Isótopos Estables del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ubicado en el municipio de Palmira-Valle del Cauca. Esto se repite sucesiva mente para los otros puntos de muestreo (ver figura 6.2).

Tabla 6. 4. Horario de mediciones
muestreo en unidades experimentales

periodo	punto de medicion	Horario	
		Inicio	Finaliza
Diario	p01	7a.m.	9a.m
	p02	9:20a.m	11:20 a.m
	p03	11:40a.m	1:40p.m
	p01	2p.m	4p.m
	p02	4:20p.m.	6:20p.m.
	p03	8:40p.m.	10:40p.m.

6.8 Determinación del flux de GEI en Unidades Experimentales

Para determinar el flux en cada unidad experimental se define la tendencia de ellos. Esto se logró al graficar los datos de concentración vs tiempo de cada muestreo. Siendo lineales los que se generaron a una tasa constante y no lineales aquellos donde la tasa de concentración dentro de la cámara con respecto al tiempo, varia debido a posibles fenómenos de difusión.

La tendencia lineal es considerada ampliamente por diferentes autores (Wu et al., 2009), para estimar el flux bajo la siguiente ecuación (Ec. 2).

$$f = \frac{M * P_c * V_c}{A_c * T_c * R} * \frac{\Delta C}{\Delta t} * \frac{1440 \text{ min}}{d} \quad (\text{Ec. 2}).$$

Donde:

f = flux ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), M el peso molecular ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

P_c : la Presión en la cámara (atm)

V_c : volumen en la cámara (L)

A_c : Área transversal de la cámara (m^2)

T_c : Temperatura al interior de la cámara en (K)

R : Es la constante universal de los gases ideales ($0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} / \text{g} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$)

$\frac{\Delta C}{\Delta t}$ es el gradiente de concentración con respecto al tiempo ($\text{ppmv} \cdot \text{min}^{-1}$).

Mientras, el flux de los no lineales se determina cuando el cambio de la concentración es medido en intervalos de tiempos iguales por medio del modelo exponencial (Anthony *et al.*, 1995) donde se pueden obtener tendencias de seis tipos de graficas, según la expresión.

$$f = \frac{V \cdot U \cdot (C_1 - C_0)^2}{A \times t \cdot (C_1 - C_2 - C_0)} \ln \left[\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} \right] \quad \text{Donde} \quad \left[\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} \right] > 1 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde

f = Flux ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

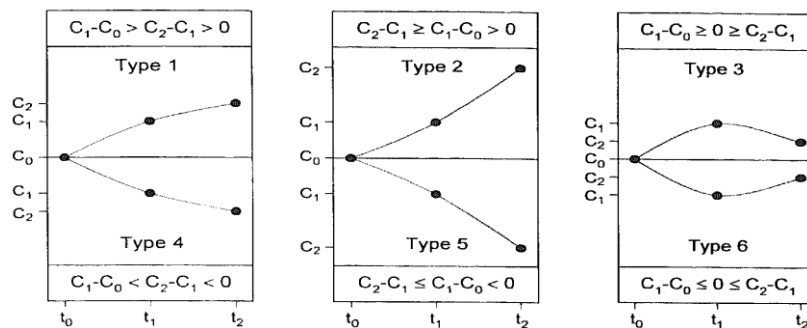
V = Volumen de la cámara (L)

A = Área de la cámara (m^2)

t = intervalo de tiempo (15 min)

U =Factor de conversión 1,44 ($\text{m}^3 \cdot \text{min} / \text{L} \cdot \text{d}$)

$C_{(t)}$ =Concentración de gas en un tiempo t .



Gráfica 6.6 Tendencias de curvas modelo exponencial

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Eficiencia de Reducción de Parámetros Fisicoquímicos

Tabla 7. 1 Resultados de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos

DQO	Afluente	Efluente		
		H.Control	H.Heliconia	H. Phragmites
Promedio	208	70,3	41	25
Desviación	16	4	3,6	4
Minimo	191	65	34	18
Maximo	235	77	46	30
Parametro		H.Control	Media \pm SD H.Heliconia	H.Phragmites
T.Cámara		29 \pm 5	31 \pm 6	31 \pm 6
ORP		-167 \pm 78	-108 \pm 93	-126 \pm 71
pH	Máximo	6, 8	6, 9	7
	Minimo	6, 4	6, 3	6, 3

7.1.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Las concentraciones promedio de la DQO en el afluente fue de 208 \pm 16 mg/L. Sin embargo, los efluentes de los humedales plantados con *Phragmites australis*, *Heliconia psittacorum*, y sin plantar (Control) redujeron las concentraciones de la DQO, a valores promedio de 25 \pm 4, 41 \pm 3.6, y 70,3 \pm 4 mg/L. Equivalentes a una eficiencia de eliminación de la carga afluente del 87.8, 80.3, y 66.2 % *respectiva mente*. Estos, resultados obtenidos, estuvieron acordes con los resultados reportados en la literatura, (Gutierrez, 2009).

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se evidencia el papel determinante de la vegetación (*Phragmites australis* y *Heliconia psittacorum*) en la eliminación de la materia orgánica (DQO), donde los sistemas plantados con *Phragmites* superaron a los sembrados con *Heliconia* lo cual indica que la reducción de materia orgánica esta asociada a la especie vegetativa. Sin embargo, Estos, a su vez superaron a los no plantados (controles) posiblemente por la estimulación de la actividad y densidad microbianas en la zona radicular.

7.1.2 Temperatura

La temperatura promedio en las cámaras estáticas fue de 29 y 31°C para los sistemas sin y con vegetación respectivamente. Estas diferencias no fueron significativas ($P > 0.05$). Pese a que no se encontraron diferencias significativas. Esta fue levemente mayor en los sistemas plantados, debido, probablemente a la translocación y acumulación de gases en el

interior de las cámaras generados en el proceso fotosintético. situaciones similares son reportadas por (Huang *et al.*, 2010).

7.1.3 Potencial de Óxido Reducción- E_h (ORP)

De acuerdo con la tabla 7.1, el potencial redox (E_h) presentó valores promedio en las unidades plantadas con *Heliconia psittacorum*, *Phragmites australis* y sin plantar de -108,-126 y -167 mV. Estos valores indican la prevaecía de condiciones anóxicas en el lecho del humedal construido. Sin embargo, los mayores valores de E_h en los sistemas plantados evidencian la influencia de la actividad fotosintética de la *Heliconia psittacorum*, y *Phragmites australis* en la translocacion de Oxigeno desde la atmósfera a su sistema de radicular, lo que proporciona ambientes óxicos o microaerofílicos en la rizósfera.

7.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

Como lo indica la Tabla 7.1, el pH en las unidades plantadas y sin plantar fueron casi neutros, con valores de 6.3 – 7.0.Situándose en rangos Óptimos para el crecimiento microbiano(Metcalf y Eddy., 2003).El cambio de pH puede asociarse a la fotosíntesis de la planta. Esta, consume CO_2 durante el día lo que se traduce en aumento del pH en los sistemas plantados.

7.1.5 Correlación entre Parámetros fisicoquímicos y GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O)

Tabla 7. 2. Correlación entre parámetros fisicoquímicos y GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O)

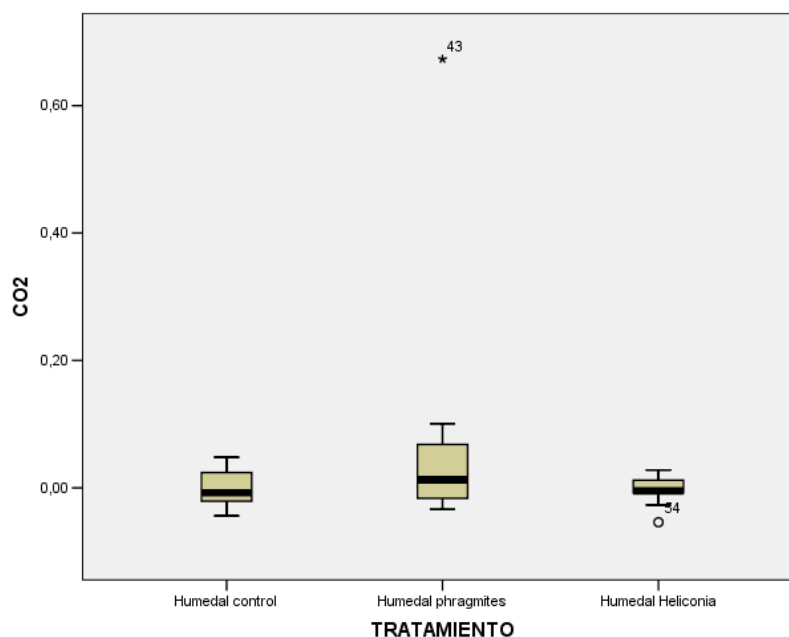
		CO_2	pH	TEMPERATURA	ORP
CO_2	Pearson Correlation	1	0,111	-0,132	0,220
	N	55	55	55	55
pH	Pearson Correlation		1	0,019	0,433
	N		55	55	55
TEMPERATURA	Pearson Correlation			1	0
	N			55	55
		CH_4	pH	TEMPERATURA	ORP
CH_4	Pearson Correlation	1	0,229	0,198	0,013
	N	42	42	42	42
pH	Pearson Correlation		1	0,188	0,518
	N		42	42	42
TEMPERATURA	Pearson Correlation			1	0
	N			42	42
		N_2O	pH	TEMPERATURA	ORP
N_2O	Pearson Correlation	1	0,025	0,091	-0,032
	N	53	53	53	53
pH	Pearson Correlation		1	0,074	0,384
	N		53	53	53
TEMPERATURA	Pearson Correlation			1	-0,026
	N			53	53

De acuerdo con la tabla 7.2 se encontró correlación entre el Potencial de Hidrógeno (pH) y Potencial de óxido reducción (ORP) del 38.4, 43.3 y 51,8 % en la emisión de gases de efecto invernadero en los humedales construidos (N_2O , CO_2 y CH_4) respectivamente. Siendo mayor la emisión de metano, siguiendo el dióxido de carbono y por último el óxido nitroso. Estas correlaciones de pH y ORP podrían interpretarse como variaciones en los procesos de transformación y eliminación de los nutrientes y la materia orgánica en condiciones anaerobias realizadas por microorganismos metanogénicos que favorecen la emisión de estos compuestos (Triguero, 2004).

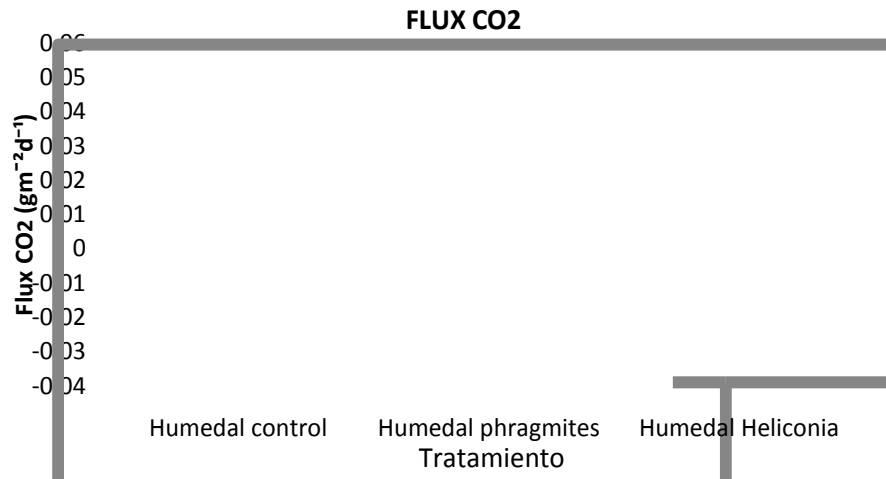
7.2 Estimación y Comparación GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O)

Se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O) y se compararon entre los tratamientos plantados (Heliconia, Phragmites) y sin plantar (Control) como se de tallan a continuación.

7.2.1 Dióxido de Carbono (CO_2)



Gráfica 7.1 Emisión promedio (flux CO_2 g.m⁻².d⁻¹) en cada Humedal



Gráfica 7.2 Comparación (flux $\text{CO}_2 \text{ g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$) en Humedales plantados y control

Tabla 7. 3. Estadística descriptiva del flux CO_2

flux $\text{CO}_2 \text{ (g.m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{)}$	TRATAMIENTO		
	Humedal control	Humedal phragmites	Humedal Heliconia
Media	-0,002	0,052	-0,003
Mediana	-0,008	0,013	-0,005
StdD	0,029	0,153	0,020
Mínimo	-0,044	-0,034	-0,054
Máximo	0,048	0,673	0,028
n	18	20	17

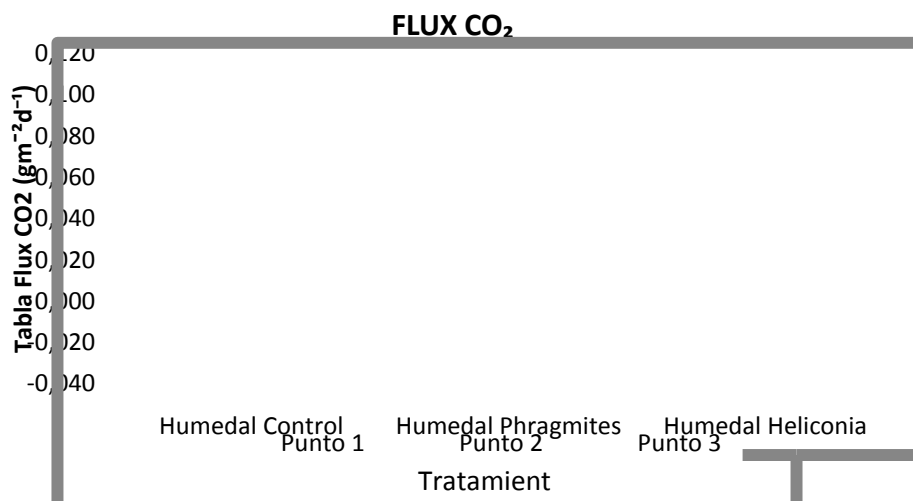
Tabla 7. 4. Prueba de ANOVA de los flux CO_2 en Humedales plantados y control

	Suma de cuadrados	df	Media Cuadrática	F	Sig.
Entre Grupos	0,037	2	0,018	2,063	0,137
En Grupos	0,463	52	0,009		
Total	0,499	54			

Las emisiones de dióxido de carbono fueron estimados y comparados. En la grafica 7.1 se observa el diagrama de caja con los resultados obtenidos de Emisión promedio (flux $\text{CO}_2 \text{ g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$) en cada tratamiento del Humedal. En la grafica 7.2 estos se comparan. Mientras la Estadística descriptiva y la Prueba de ANOVA, se muestran en la tabla 7.3 y 7.4 respectivamente.

La variación promedio de los flux de dióxido de carbono estimado fue de -0.003, -0.002 0.052, $\text{g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para el Humedal *Heliconia*, *Control* y *Phragmites* respectivamente. Valores similares fueron encontrados por (Maltais-Landry *et al.*, 2009b). Se obtuvo un $P = 0.137$ en el test de ANOVA en el cual no se encontraron diferencias estadísticas significativas de los flux obtenidos.

Pese a que no se encontraron diferencias significativas de dióxido de carbono entre los tratamientos, la emisión del flux CO₂ fue levemente mayor en el sistema plantado con *Phragmites australis*. Esto indica que esta vegetación *tuvo* comportamientos de fuente emisora de CO₂, mientras los sembrados con *Heliconia psittacorum* y el sistema control, tiende hacer sumidero aunque, la *Phragmites* mostrara la mayor dispersión de los flux estimados.



Gráfica 7.3. Comparación del flux CO₂ entre puntos en los tratamientos

Tabla 7. 5. Emisión de flux CO₂ (g.m⁻²d⁻¹) por punto de muestreo

Humedal	Punto de Muestreo		
	p01	p02	p03
Humedal Control	0,004	-0,011	0,002
Humedal Phragmites	0,010	0,024	0,115
Humedal Heliconia	-0,005	0,012	-0,015

Tabla 7. 6. Prueba de ANOVA (flux de CO₂) por punto de muestreo entre sistemas

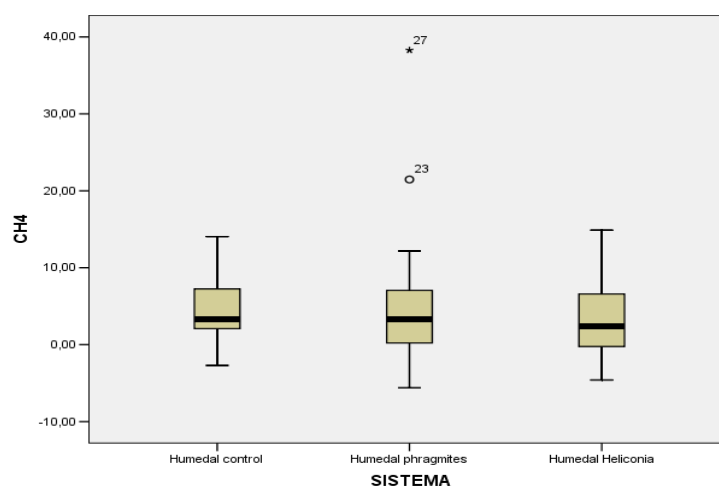
p01	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,001	2	0,000	0,286	0,755
En Grupos	0,014	14	0,001		
Total	0,015	16			
P02	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,004	2	0,002	1,417	0,271
En Grupos	0,023	16	0,001		
Total	0,027	18			
p03	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,066	2	0,033	1,394	0,277
En Grupos	0,379	16	0,024		
Total	0,445	18			

Tabla 7. 7. Prueba de ANOVA (flux de CO_2) por punto de muestreo en el mismo sistema

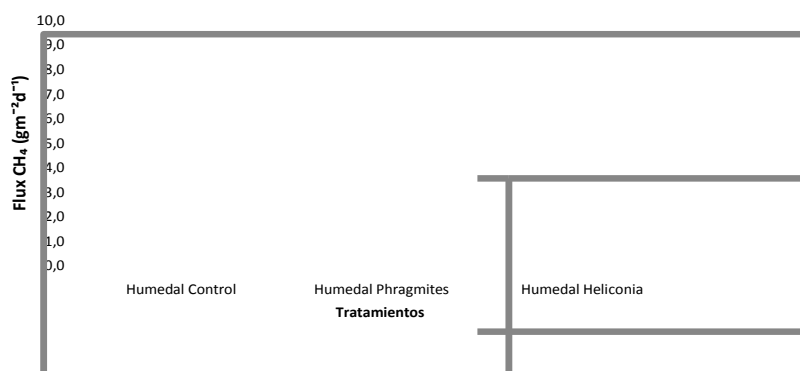
Humeal Control	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,001	2	0,000	0,439	0,653
En Grupos	0,013	15	0,001		
Total	0,014	17			
Humedal Phragmites	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,044	2	0,022	0,933	0,413
En Grupos	0,398	17	0,023		
Total	0,442	19			
Humedal Heliconia	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,002	2	0,001	3,628	0,054
En Grupos	0,004	14	0,000		
Total	0,006	16			

En la grafica 7.3 se presentan las estimaciones y variaciones de los flux de dióxido de carbono obtenidos en las zonas o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) en cada unidad de tratamiento. En este orden de ideas, la estimación promedio Para la zona de entrada (p01) fue de 0,004 -0.010, -0.005. En la zona media (p0 2) de -0.011, -0.024, 0.012 y en la salida o final (p03) de 0.002, 0.115, -0.015, de $CO_2 \text{ g.m}^{-2}d^{-1}$ para los tratamientos (Control, *Phragmites*, *Heliconia*) respectiva mente (ver tabla 7.5). Esto indica, que en la zona de entrada como en la media y salida el humedal plantado con *Phragmites* tuvo tendencia de emisores de dióxido de carbono. Igual, al sistema control en los puntos (p01, p03), y punto (p02) de los sembrados con *Heliconias*. Sin embargo, en la zona media del sistema control la tendencia fue de sumidero de CO_2 , similar, al (p01 y p03) de los plantado con *Heliconia*. Estas, tendencia Probablemente están asociadas a la radiación solar, lo cual incide en el proceso de fotosíntesis de la vegetación. Adicionalmente, el test ANOVA indicó que no existen diferencias significativas (ver tabla 7.6) entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por (Teiter and Mander, 2005) (Maltais-Landry *et al.*, 2009b)

7.2.2 Metano (CH₄)



Gráfica 7.4. Emisión promedio del flux CH₄ (g.m⁻².d⁻¹) entre tratamientos



Gráfica 7.5 Comparación del flux CH₄ en Humedales plantados y control

Tabla 7. 8. Estadística descriptiva de las emisiones de flux CH₄

flux CH ₄ (g.m ⁻² .d ⁻¹)	SISTEMA		
	Humedal control	Humedal phragmites	Humedal Heliconia
Media	5,0	6,1	3,3
Mediana	3,3	3,3	2,4
StdD	4,6	11,1	5,4
Mínimo	-2,7	-5,6	-4,6
Máximo	14,1	38,3	14,9
N	15	15	12

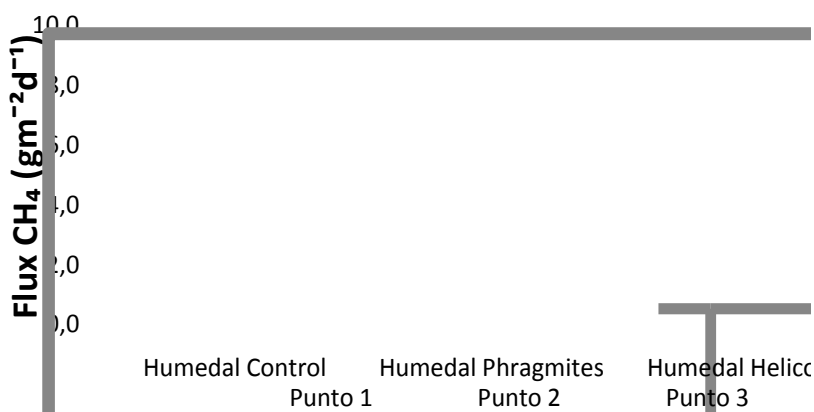
Tabla 7. 9. Prueba de ANOVA de los flux CH₄ en Humedales plantados y control

	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	53,5	2	26,7	0,443	0,645
En grupos	2354,6	39	60,4		
Total	2408,1	41			

De igual manera las emisiones de metano se estimaron y compararon. En la grafica 7.4 se observa el diagrama de caja con los resultados obtenidos de Emisión promedio ($\text{flux CH}_4 \text{ g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$) en cada tratamiento del Humedal. En la grafica 7.5 se comparan los flux estimados. Mientras la Estadística descriptiva y la Prueba de ANOVA, se muestran en la tabla 7.7 y 7.8 respectivamente.

La variación promedio de los flux de metano fueron 5, 6.1, 3.3 $\text{g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para el Humedal control, *Phragmites* y *heliconia* respectiva mente. Valores similares fueron encontrados por (Cheng *et al.*, 2007 ; Picek *et al.*, 2007).En adición se evaluó la significancia de estos y se obtuvo un $P = 0.645$ en el test de ANOVA en la cual no se encontraron diferencias estadísticas significativas de los flux obtenidos por los tratamientos.

Pese a que no se encontraron diferencias significativas de metano entre los tratamientos, la emisión del flux CH_4 fue mayor en el sistema plantado con *Phragmites australis*. Posiblemente por los procesos microbianos en la zona radicular. Aunque los tres sistemas tuvieron comportamientos de fuente emisora de metano.



Gráfica 7.6. Comparación del flux CH_4 entre puntos en los tratamientos

Tabla 7. 10. Emisión de flux CH_4 ($\text{g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$) por punto de muestreo

Humedal	Punto de muestreo		
	p01	p02	p03
Control	4,7	9,0	3,5
Phragmites	5,5	9,7	2,2
Heliconia	7,2	3,4	0,8

Tabla 7. 11. Prueba de ANOVA ((flux de CH_4) por punto de muestreo

p01	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	11,4	2	5,7	0,077	0,927

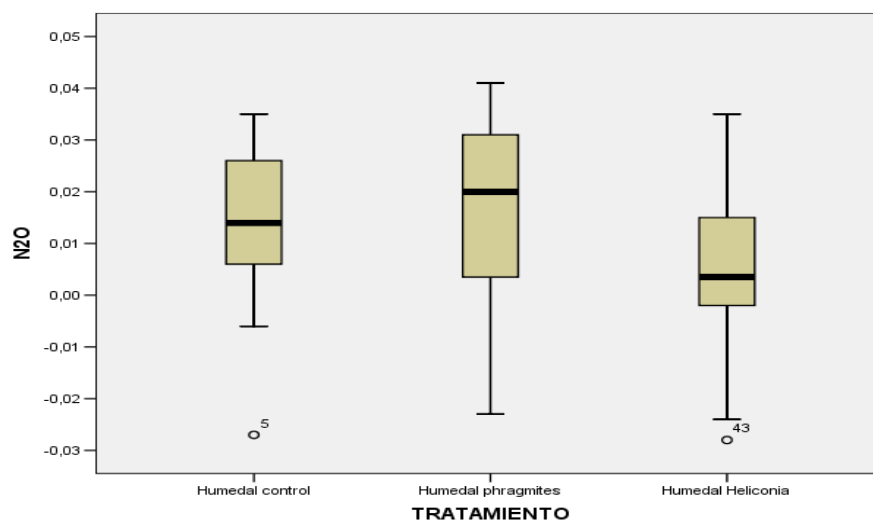
En grupos	667,6	9	74,2		
Total	679,0	11			
p02	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	103,1	2	51,5	0,412	0,673
En grupos	1249,7	10	125,0		
Total	1352,8	12			
p03	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	20,7	2	10,4	0,984	0,398
En grupos	147,6	14	10,5		
Total	168,3	16			

Tabla 7. 12. Prueba de ANOVA (flux de CH₄) por punto de muestreo en el mismo sistema

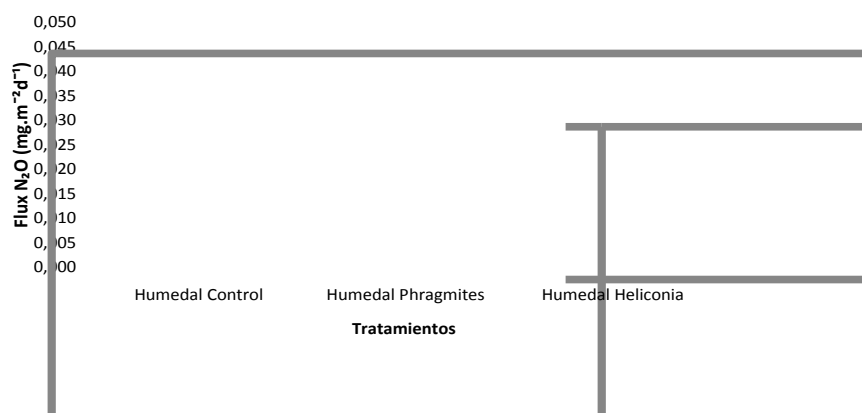
Humedal Control	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	63,2	2	31,6	1,591	0,244
En Grupos	238,5	12	19,9		
Total	301,8	14			
Humedal Phragmites	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	151,7	2	75,9	0,577	0,577
En Grupos	1578,4	12	131,5		
Total	1730,1	14			
Humedal Heliconia	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	74,7	2	37,4	1,356	0,306
En Grupos	248,0	9	27,6		
Total	322,8	11			

Por otra parte, en la *gráfica 7.6* se presentan las estimaciones y variaciones de los flux de metano obtenidos en cada zona o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) de cada unidad de tratamiento. En la zona de entrada (p01) la estimación promedio fue de 4.7, 5.5, 7.2. En la media (p0 2) de 9, 9.7, 3.4 y en la salida (p03) de 3.5, 2.2, 0.8, de CH₄ g.m⁻²d⁻¹ para los tratamientos (Control, Phragmites, Heliconia) respectivamente (ver tabla 7.9). Estos resultados indican que los sistemas tuvieron tendencias de fuente emisora de metano. En adición el tes ANOVA muestra que no existen diferencias significativas (ver table 7.10) entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por (Inamori *et al.*, 2007); (Maltais-Landry *et al.*, 2009a) (Wang *et al.*, 2008a)

7.2.3 Óxido Nitrroso (N₂O)



Gráfica 7.7 Emisión promedio (flux N_2O m g.m⁻².d⁻¹) en cada Humedal



Gráfica 7.8 Comparación del flux N_2O en Humedales plantados y control

Tabla 7. 13. Estadística descriptiva de las emisiones de flux N_2O

flux N_2O (g.m ⁻² .d ⁻¹)	TRATAMIENTO		
	Humedal control	Humedal phragmites	Humedal Heliconia
Media	0,01294	0,01575	0,00475
Mediana	0,01400	0,02000	0,00350
StdD	0,01600	0,01944	0,01747
Mínimo	-0,02700	-0,02300	-0,02800
Máximo	0,03500	0,04100	0,03500
N	17	20	16

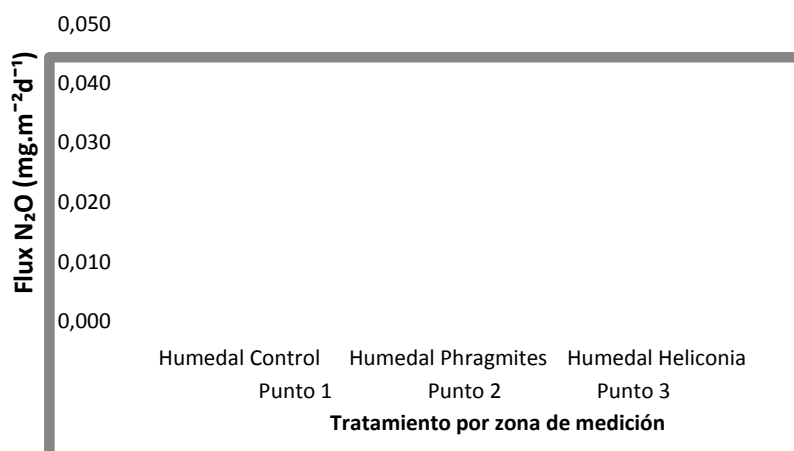
Tabla 7. 14. Prueba de ANOVA de los flux N_2O en Humedales plantados y control

Suma de	df	Media	F	Sig.
---------	----	-------	---	------

	Cuadrados		Cuadratica		
Entre grupos	0,001	2	0,001	1,775	0,180
En grupos	0,016	50	0,000		
Total	0,017	52			

De acuerdo a la grafica 7.8, las emisiones de Óxido nitroso, fueron estimadas. En la grafica 7.7, se observa un diagrama de caja con la distribución de los resultados obtenidos de la Emisión promedio del *flux* ($N_2O\text{ mg.m}^{-2}d^{-1}$) en cada tratamiento del Humedal. En la grafica 7.9 estos se comparan. Mientras la *Estadística descriptiva* y la *Prueba de ANOVA*, se muestran en la tabla 7.11 y 7.12 respectivamente.

En consecuencia la variación promedio de los flux de *óxido nitroso* estimados fueron de 0.013, 0.016, 0.005 $mg.m^{-2}d^{-1}$ para el Humedal control, *Phragmites* y *Heliconia* respectivamente. Valores similares fueron encontrados por (Wang *et al.*, 2008b; Inamori *et al.*, 2007). Además, se obtuvo un $P = 0.180$ en el test de ANOVA en el cual no se encontraron diferencias estadísticas significativas de los flux obtenidos. Estas emisiones de óxido nitroso a la atmósfera son muy bajas. Por tanto, son consecuentes con los reportes de literatura. Sin embargo algunos autores no detectaron óxido nitroso en humedales construidos. (Picek *et al.*, 2007).



Gráfica 7.9. Comparación del *flux* N_2O entre puntos en los tratamientos

Tabla 7. 15. Emisión de *flux* N_2O ($g.m^{-2}d^{-1}$) por punto de muestreo

Humedal	Punto de muestreo		
	p01	p02	p03
Control	0,023	0,006	0,008
Phragmites	0,015	0,019	0,013
Heliconia	0,008	0,007	0,000

Tabla 7. 16. Prueba de ANOVA (*flux* de N_2O) por punto de muestreo

p01	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	0,001	2	0,000	0,717	0,506
En grupos	0,005	13	0,000		
Total	0,006	15			
p02	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	0,001	2	0,000	0,745	0,491
En grupos	0,007	15	0,000		
Total	0,007	17			
p03	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre grupos	0,001	2	0,000	1,542	0,244
En grupos	0,003	16	0,000		
Total	0,003	18			

Tabla 7. 17. Prueba de ANOVA (*flux* de N₂O) por punto de muestreo en un mismo sistema

Humedal Control	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,001	2	0,000	2,110	0,158
En Grupos	0,003	14	0,000		
Total	0,004	16			
Humedal Phragmites	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,000	2	0,000	0,176	0,840
En Grupos	0,007	17	0,000		
Total	0,007	19			
Humedal Heliconia	Suma de Cuadrados	df	Media Cuadratica	F	Sig.
Entre Grupos	0,000	2	0,000	0,324	0,729
En Grupos	0,004	13	0,000		
Total	0,005	15			

De igual manera en la grafica 7.9 se presentan las estimaciones y variaciones de los flux de óxido nitroso obtenidos en las zonas o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) de cada unidad de tratamiento. En la zona de entrada (p01) la estimación promedio fue de 0.023, 0.015, 0.008. En la media (p0 2) de 0.006, 0.019, 0.007 y en la salida (p03) de 0.08, 0.013, de N₂O mg.m⁻²d⁻¹ para los tratamientos (Control, Phragmites, Heliconia) respectiva mente (ver tabla 7.13) Esto indica que tanto en la zona de entrada como en la salida la tendencia del sistema fue de emisor de óxido nitroso, Adicionalmente, el test ANOVA indico que no existen diferencias significativas (ver tabla 7.14) entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por (Maltais-Landry *et al.*, 2009b) (Wang *et al.*, 2008b).

8 CONCLUSIONES

El modulo de Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal a escala real, tiende claramente a comportarse como Sumidero de CO_2 y emisor de CH_4 y N_2O . Lo anterior se confirma al comparar las emisiones de estos gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) entre las unidades plantadas y sin plantar.

Se encontró una estrecha relación entre los parámetros Físico-Químicos (pH, ORP) y GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O).

No se encontró relación alguna entre la temperatura al interior de la cámara estática con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O).

No se encontraron diferencias estadísticas significativas en la emisión de GEI entre los puntos de medición en los sistemas.

Los sistema de humedales contruidos dependen de la simbiosis entre los componentes microorganismos, vegetación y medio de soporte, que a su vez dependen de las condiciones fisico-químicas (pH, ORP, T) influyentes en la generación y emisión de los gases de efecto invernadero.

Es riesgoso predecir la generacion de GEI en los humedales contruidos debido a la compleja interacción de los ciclos Biogeoquímicos en el interior del sistema

Se obtuvo eficiencia del 66.2, 80.3 y 87.8 % en la reducción de la DQO en las unidades sin plantar (Control) y plantados con *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis*, respectivamente. Demostrando además la influencia de la vegetación en la emisión de GEI.

9 RECOMENDACIONES

Los Humedales construidos a escala real actúan como fuente y/o sumidero de Gases de Efecto Invernadero. Por tanto, se recomienda más estudios para obtener la dinámica global de la generación de GEI en Humedales Construidos plantados con *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* asociados a la fotoíntesis y fisiología vegetal.

El sistema real utilizado presenta limitación, debido a la exposición de la vegetación a diferentes condiciones físicas, químicas y biológicas presentes en ellos (e.g. lluvia, plagas, radicación solar, variedad de nutrientes en el agua residual), propias de controlar. Lo anterior, hace necesario verificar los resultados obtenidos durante este estudio en sistemas de humedales a escala laboratorio, con el fin de tener mayor control de las variables de confusión y reducir posibles errores en la estimación de gases de efecto invernadero en sistemas de humedales construidos a escala real.

La metodología de la cámara estática utilizada para la estimación de gases de efecto invernadero requiere de mayores estudios en cuanto a la influencia interna y externa de la presión temperatura y volumen de la cámara. Por cuanto estos factores pueden alterar la emisión y estimación de gases de efecto invernadero.

Hacer estudios de viabilidad para la explotación comercial de las plantas ornamentales *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* como fuente alterna de ingresos económicos en países en vías de desarrollo.

10 REFERENCIA

- Adhya, T. K., Sharma, P. D. and Gogoi, A. K. (2009) Mitigating Greenhouse Gas Emission from Agriculture. *Climate Change and Crops*, 329-329.
- Akratos, C. S. and Tsihrintzis, V. A. (2007) Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29, 173-191.
- Anthony, W. H., Hutchinson, G. L. and Livingston, G. P. (1995) Chamber measurement of soil-atmosphere gas exchange: linear vs. diffusion-based flux models. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1308-1308.
- Baird, C. (2001) *Química Ambiental*. 2ª Ed. editorial. Reverte, 185-206.
- Bani Shahabadi, M., Yerushalmi, L. and Haghighat, F. (2010) Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants-Model development and application. *Chemosphere*.
- Bogner, J., Abdelrafie, M., Daiz, A., Faaij, Q., Gao, S., Hashimoto, K., Mareckova, R. and Pipatti, T. (2007). Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University, New York, USA.
- Brisson, J. and Chazarenc, F. (2009) Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of the Total Environment*, 407, 3923-3930.
- CEPIS/OPS. (2000) Evaluación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en las Américas. Centro panamericano de Ingeniería Saneamiento y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú.
- Crites, R. and Tchobanoglous, G. (2000) Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. In Editorial McGRAW HILL. Bogotá.
- Cheng, X., Peng, R., Chen, J., Luo, Y., Zhang, Q., An, S. and Li, B. (2007) CH₄ and N₂O emissions from *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in experimental mesocosms. *Chemosphere*, 68, 420-427.
- Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Junsod, J., Threedeach, S. and Wicranarachchi, P. N. (2009) Leachate treatment and greenhouse gas emission in subsurface horizontal flow constructed wetland. *Bioresource Technology*, 100, 3808-3814.
- Del Canto, J. Z. (2004) Influencia del Soporte y Tipo de Macrófita en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal.
- Duan, X., Wang, X. and Ouyang, Z. (2009) Influence of Common Reed (*Phragmites australis*) on CH₄ Production and Transport in Wetlands: Results from Single-Plant Laboratory Experiments. *Water, Air, & Soil Pollution*, 197, 185-191.
- Dusek, J., Picek, T. and Cozkovo, H. (2008) Redox potential dynamics in a horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment: Diel, seasonal and spatial fluctuations. *Ecological Engineering*, 34, 223-232.
- EPA, U. S. (1993) Subsurface Flow Constructed Wetlands For waste water Treatment: a Technology Assessment. Municipal Technology Branch, Office Of water, Washington, DC. USA.
- Francia, P. D., Camarena, E. A., Guzmán, A. J. (2002) Análisis de ecuaciones para la predicción de la reducción de la DBO₅ en el tratamiento de aguas residuales mediante pantanos artificiales de flujo subsuperficial. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; AIDIS. Memorias. México, DF, FEMISCA, p. Ilus., tab, 1-11.
- García, J., Capel, V., Castro, A., Ruiz, I. and Soto, M. (2007) Anaerobic biodegradation tests and gas emissions from subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 98, 3044-3052.

- Gui, P., Inamori, R., Matsumura, M. and Inamori, Y. (2007) Evaluation of constructed wetlands by wastewater purification ability and greenhouse gas emissions. *Water science and technology*, 56, 49-55.
- Guo, J. and Zhou, C. (2007) Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142, 270-277.
- Gutierrez, C. f. (2009) Respuesta Fisiologica de Macrofitas emergentes y su relación con la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales construidos. Universidad del Valle-Cali
- Herrera, A. (2007) Evaluación de la Respuesta Fisiológica de *Heliconia psittacorum* A Diferentes Cargas de Nitrógeno Bajo Condiciones Experimentales. In *Biología. Universidad del Valle, Cali - Valle del Cauca*, pp. 89.
- Hsu, B.-D. (2007) On the possibility of using a chlorophyll fluorescence parameter as an indirect indicator for the growth of *Phalaenopsis* seedlings. *Plant Science*, 172, 604-608.
- Huang, J., Wang, S., Yan, L. and Zhong, Q. (2010) Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands. *Ecological Engineering*.
- Huttunen, J. T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., Silvola, J. and Martikainen, P. J. (2003) Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 52, 609-621.
- Inamori, R., Gui, P., Dass, P., Matsumura, M., Xu, K. Q., Kondo, T., Ebie, Y. and Inamori, Y. (2007) Investigating CH₄ and N₂O emissions from eco-engineering wastewater treatment processes using constructed wetland microcosms. *Process Biochemistry*, 42, 363-373.
- Inamori, R., Wang, Y., Yamamoto, T., Zhang, J., Kong, H., Xu, K. and Inamori, Y. (2008) Seasonal effect on N₂O formation in nitrification in constructed wetlands. *Chemosphere*, 73, 1071-1077.
- IPCC (2007) The Scientific Basis. Contribution of Working Group I, II y III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, USA, Cambridge University Press, 104.
- IPCC. (2001) Intergovernmental Panel on Climate Change. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I, to the Third Assessment Report of the Cambridge, United Kingdom, New York, USA, .
- Jiang, C., Wang, Y., Hao, Q. and Song, C. (2009) Effect of land-use change on CH₄ and N₂O emissions from freshwater marsh in Northeast China. *Atmospheric Environment*.
- Johansson, A. E., Gustavsson, A. M., ♦quist, M. G. and Svensson, B. H. (2004) Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater--seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors. *Water Research*, 38, 3960-3970.
- Johansson, A. E., Kasimir, A., Klemetsson, L. , Svensson, B. H. (2003) Nitrous oxide exchanges with the atmosphere of a constructed wetland treating wastewater. *Tellus B*, 55, 737-750.
- Kadlec, R. H. (2009) Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 159-174.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M. and van Loosdrecht, M. C. M. (2009) Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43, 4093-4103.
- Karki, K. B. (2007) Greenhouse gases, global warming and glacier ice melt in Nepal. *Journal of Agriculture and Environment*, 8, 1-1.
- Kaseva, M. E. (2004) Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater—a tropical case study. *Water Research*, 38, 681-687.
- Kiely, G. (1999) Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw - Hill. Vol 3. Madrid - España, 241-251.

- Koelbener, A., Ström, L., Edwards, P. J. and Olde Venterink, H. (2010) Plant species from mesotrophic wetlands cause relatively high methane emissions from peat soil. *Plant and soil*, 326, 147-158.
- Konnerup, D., Koottatep, T. and Brix, H. (2009) Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological Engineering*, 35, 248-257.
- Lee, C. Y., Lee, C. C., Lee, F. Y., Tseng, S. K. and Liao, C. J. (2004) Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. *Bioresource Technology*, 92, 173-179.
- Liikanen, A., Huttunen, J. T., Karjalainen, S. M., Heikkinen, K., Väisänen, T. S., Nykänen, H. and Martikainen, P. J. (2006) Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering*, 26, 241-251.
- Liu, C., Xu, K., Inamori, R., Ebie, Y., Liao, J. and Inamori, Y. (2009) Pilot-scale studies of domestic wastewater treatment by typical constructed wetlands and their greenhouse gas emissions. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 3, 477-482.
- Maltais-Landry, G., Maranger, R. and Brisson, J. (2009a) Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 221-229.
- Maltais-Landry, G., Maranger, R., Brisson, J. and Chazarenc, F. (2009b) Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 157, 748-754.
- Mander, U., Lohmus, K., Teiter, S., Mäuring, T. n., Nurk, K. and Augustin, J. r. (2008) Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 404, 343-353.
- Manios, T., Stentiford, E. I. and Millner, P. (2003) The removal of chemical oxygen demand from primary-treated domestic wastewater in subsurface-flow reed beds using different substrates. *Water Environment Research*, 75, 336-341.
- Medina, E. C. and Hinojos, A. M. G. (2009) TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE IRRADIACIÓN GAMMA. *QUIVERA*, 12-12.
- Metcalf y Eddy., G. T., Franklin Louis Burton. , H. David Stensel. (2003) *Wastewater engineering treatment.*, 4 ed. McGraw - Hill, Estados Unidos.
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands* 3 ed, Wiley John and Sons Inc. New York.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. (2002) *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería*, Compañía Editorial Continental.
- Odum, H. T., Wojcik, W., Pritchard, L. J., Ton, S., Delfino, J.J., Wojcik, M., Patel, J.D., Doherty, S.J. (2000) *Heavy metals in the environment using wetlands for their removal*, Boca Raton Florida. 236.
- OPS/OMS (1999) *Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas por Medio de Humedales Artificiales.*"Sociedad Quebequense de tratamiento de Aguas Residuales, Canada, Centro Nacional de Agua " CENAGUA" Bogota, Colombia.
- Pangala, S. R., Reay, D. S. and Heal, K. V. (2010) Mitigation of methane emissions from constructed farm wetlands. *Chemosphere*, 78, 493-499.
- Paredes, D., Kuschik, P., Mbwette, T. S., Stange, F., Muller, R. A. and Koser, H. (2007) New Aspects of Microbial Nitrogen Transformations in the Context of Wastewater Treatment- A Review. *Engineering in Life Sciences*, 7, 13-25.
- Pei-dong, T. A. I., Pei-jun, L. I., Tie-heng, S. U. N., Yao-wu, H. E., Qi-xing, Z., Zong-qiang, G., Mizuochi, M. and Tnamori, Y. (2002) Greenhouse gas emissions from a constructed wetland for municipal sewage treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 14, 27-33.
- Peña, M. R., Van Ginneken, M., Madera, C. A. (2003) *Humedales de Flujo Subsuperficial. Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas*

- Tropicales. Revista Ingenieria y Competitividad, Volumen 5, 27-35. Universidad del Valle, Colombia.
- Picek, T., Cozkovo, H. and Dusek, J. (2007) Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-Plants as important sources of carbon. *Ecological Engineering*, 31, 98-106.
- Pokhrel, D. and Viraraghavan, T. (2004) Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. *Science of the Total Environment*, The, 333, 37-58.
- Polprasert, C. (2004) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Principles and Practices. *Wetlands ecosystems in Asia: function and management*, 285-285.
- Préndez, M. and Lara-González, S. (2008) Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control/reduce greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 88, 658-664.
- Rodríguez, P. C. (2003) Humedales construidos. Estado del arte.(I y II). *Ingeniería hidráulica y ambiental*, Vol 24 N^o 3, pp 35 - 52 ciudad de la Habana Cuba.
- Sandoval, V. H. (2003) Evaluación del coportamiento Hidrodinamico de lagunas anaerobias modificadas a escala piloto. Trabajo de grado en Ingenieria Sanitaria. Facultad de Ingenieria Universidaddel Valle. Colombia.
- Sim, C. H., Yusoff, M. K., Shutes, B., Ho, S. C. and Mansor, M. (2008) Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. *Journal of Environmental Management*, 88, 307-317.
- Sovik, A. K. and Klove, B. (2007) Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway. *Science of The Total Environment*, 380, 28-37.
- Stadmark, J., Seifert, A.-G. and Leonardson, L. (2009) Transforming meadows into free surface water wetlands: Impact of increased nitrate and carbon loading on greenhouse gas production. *Atmospheric Environment*, 43, 1182-1188.
- Stottmeister, U., WieBner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kastner, M., Bederski, O., Muller, R. A. and Moormann, H. (2003) Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22, 93-117.
- Ström, L., Lamppa, A. and Christensen, T. (2007) Greenhouse gas emissions from a constructed wetland in southern Sweden. *Wetlands Ecology and Management*, 15, 43-50.
- Tallec, G. I., Garnier, J., Billen, G. and Gossailles, M. (2006) Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: Effect of oxygenation level. *Water Research*, 40, 2972-2980.
- Tallec, G. I., Garnier, J., Billen, G. and Gossailles, M. (2008) Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation. *Bioresource Technology*, 99, 2200-2209.
- Tao, W. and Wang, J. (2009) Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems. *Ecological Engineering*, 35, 836-842.
- Teiter, S. and Mander, I. (2005) Emission of N₂O, N₂, CH₄, and CO₂ from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Ecological Engineering*, 25, 528-541.
- Thomas, K. L., Benstead, J., Davies, K. L. and Lloyd, D. (1996) Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 17-23.
- Triguero, A. (2004) Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial.
- U. S. EPA. (2004) Construted Wetland Treatmen of Municipal Wastewaters Mnual. In *National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development*, Cincinnati, Ohio. USA., pp. 104.
- Verhoeven, J. T. A. and Meuleman, A. F. M. (1999) Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, 12, 5-12.
- Vymazal, J. (2009) The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35, 1-17.

- Wang, Y., Inamori, R., Kong, H., Xu, K., Inamori, Y., Kondo, T. and Zhang, J. (2008a) Influence of plant species and wastewater strength on constructed wetland methane emissions and associated microbial populations. *Ecological Engineering*, 32, 22-29.
- Wang, Y., Inamori, R., Kong, H., Xu, K., Inamori, Y., Kondo, T. and Zhang, J. (2008b) Nitrous oxide emission from polyculture constructed wetlands: Effect of plant species. *Environmental Pollution*, 152, 351-360.
- Whiting, G. J. and Chanton, J. P. (2003) Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*, 53, 521-528.
- Wu, J., Zhang, J., Jia, W., Xie, H., Gu, R. R., Li, C. and Gao, B. (2009) Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresource Technology*, 100, 2910-2917.
- Xu, J., Zhang, J., Xie, H., Li, C., Bao, N., Zhang, C. and Shi, Q. (2010) Physiological responses of *Phragmites australis* to wastewater with different chemical oxygen demands. *Ecological Engineering*, 36, 1341-1347.
- Yi Lu, C., Wong, Y. S., Tam, N. F. Y., Ye, Y. and Lin, P. (1999) Methane flux and production from sediments of a mangrove wetland on Hainan Island, China. *Mangroves and Salt Marshes*, 3, 41-49.
- Zhou, L., Zhou, G. and Jia, Q. (2009) Annual cycle of CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China. *Aquatic Botany*, 91, 91-98.