

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA, EN LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL
MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA MEDIANTE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL SEMBRADOS CON POLICULTIVOS**



**GIZELA ANDREA GUZMAN LUGO
JEICOB MAURICIO VERNAZA CARDENAS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA**

2017

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA, EN LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO “EL OJITO” DEL
MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA MEDIANTE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL SEMBRADOS CON POLICULTIVOS**

**GIZELA ANDREA GUZMAN LUGO
Cod. 14912020930
JEICOB MAURICIO VERNAZA CARDENAS
Cod.49102010**

**Informe final trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título
de Ingenieros Ambientales**

**DIRECTOR
PhD. JUAN CARLOS CASAS ZAPATA
CODIRECTOR
Ing. FABIAN ALBERTO RUIZ GUZMAN**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN CIENCIA E INGENIERIA EN SISTEMAS
AMBIENTALES -GCISA-**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA**

2017

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayan, 25 de Septiembre de 2017

DEDICATORIA

A Dios por iluminarme en cada momento y llenarme de sabiduría y fortaleza para enfrentar cada obstáculo con la mayor tranquilidad.

A mis padres por darme la vida y formar en mi una gran persona, llena de principios y valores, los cuales se vieron reflejados en el transcurso de este camino, por ser mi fuerza y mi mayor motivación para lograr cada meta que me propongo.

A mi hermana por su amor y apoyo; y ser un gran ejemplo para mi vida como profesional.

A mis familiares, amigos y cada persona que creyó en mí y brindo su apoyo durante todo mi proceso de formación.

Gizela Andrea Guzmán Lugo

A Dios...

Por ser mi refugio en la tormenta, mi guía, mi impulso. Tu mi alfarero que me has enseñado que, en el camino emprendido, por difícil que sea, puedo en Ti confiar...

A mis Padres y hermanos, por ser mi inspiración, por su confianza y apoyo incondicional, a ellos que son mi pilar más importante y motor de vida.

A mi familia y amigos por su apoyo, por las lecciones, consejos y palabras de aliento.

Jeicob M. Vernaza Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones y su infinita misericordia.

A nuestras familias por su amor, sacrificio y apoyo, y por ser nuestra fuerza e inspiración.

A la Universidad del Cauca por brindarnos todas las herramientas para formarnos como profesionales, y a cada uno de los docentes que hicieron parte de ese proceso.

A nuestro director el Doctor Juan Carlos Casas Zapata, por brindarnos esta oportunidad de investigación en pro de nuestra formación profesional y por su dedicación y constante apoyo.

A nuestro Codirector el Ingeniero Fabián Alberto Ruiz por su acompañamiento y apoyo durante el proceso de investigación.

Al Doctor Carlos Madera por su colaboración y compartir sus conocimientos en el área.

A los profesores Edwin Rengifo y Yilton Riascos por su colaboración, aportes y conocimientos en esta investigación.

Al Ingeniero Fernando Tobar del Departamento de Infraestructura de la Alcaldía de Popayan por su gestión y colaboración para el ingreso al relleno sanitario “El Ojito”.

A SERVIASEO por permitirnos hacer uso de las instalaciones del relleno sanitario “El Ojito” y a todos sus trabajadores que nos colaboraron durante el proceso de investigación en campo.

Y a todas las personas que de una u otra manera aportaron a la realización de este proyecto de investigación.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	6
3. OBJETIVOS	8
3.1 OBJETIVO GENERAL	8
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1 LIXIVIADOS.....	9
4.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES	10
4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	10
4.2.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	10
4.2.3 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	10
4.2.4 Nitrato (NO ₃ ⁻)	11
4.2.5 Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃ ⁻).....	11
4.2.6 Potencial de Hidrógeno (pH).....	11
4.2.7 Temperatura.....	11
4.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS	12
4.3.1 De flujo superficial	13
4.3.2 De flujo subsuperficial.....	13
4.3.3 De flujo subsuperficial horizontal	14
4.4 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES.....	14
4.4.1 Plantas.....	14
4.4.2 Sustrato o medio de soporte.....	15
4.4.3 Microorganismos	16
4.5 VEGETACIÓN ESTUDIADA	16
4.5.1 <i>Heliconia Psittacorum</i>	16
4.5.2 <i>Cyperus Haspan</i>	17
4.6 MECANISMOS DE REMOCIÓN.....	17

4.6.1 Remoción de materia orgánica	18
4.6.2 Remoción de sólidos suspendidos	18
4.6.3 Remoción de Nitrógeno.....	19
5. METODOLOGÍA	20
5.1 LOCALIZACIÓN	20
5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	20
5.3 ADECUACIÓN, REPARACIÓN Y LIMPIEZA DE LOS SISTEMAS	22
5.4 SIEMBRA Y ACLIMATACIÓN DE LAS PLANTAS	23
5.5 ARRANQUE DEL SISTEMA.....	25
5.6 TOMA DE MUESTRAS.	27
5.7 MONTAJE DE SISTEMAS DE HUMEDALES	30
5.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	31
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
6.1 EFICIENCIA REMOCIÓN MATERIA ORGANICA.....	33
6.1.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	33
6.1.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	35
6.1.3 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	37
6.2 EFICIENCIA REMOCIÓN NITRÓGENO	39
6.2.1 Nitratos (NO ₃ ⁻).....	39
6.2.2 Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃ ⁻).....	41
6.3 CO-VARIABLES DE CAMPO	43
6.3.1 Potencial de Hidrógeno (pH).....	43
6.3.2 Temperatura.....	45
6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS	47
7. CONCLUSIONES	50
8. RECOMENDACIONES.....	51
9. BIBLIOGRAFIA	53
ANEXOS	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pag.
Ilustración 1. Humedal Construido subsuperficial de flujo horizontal sembrado	13
Ilustración 2. Ubicación relleno sanitario “El Ojito” Popayán, Cauca	20
Ilustración 3. Estado del montaje de las unidades a escala piloto	21
Ilustración 4. Limpieza de los sistemas	22
Ilustración 5. Aclimatación y siembra de las plantas.....	23
Ilustración 6. Configuraciones de siembra.....	24
Ilustración 7. Alimentación del sistema.....	26
Ilustración 8. Aforo del caudal.....	27
Ilustración 9. Toma de muestras	28
Ilustración 10. Configuración de siembra (vista en planta)	30
Ilustración 11. Humedal construido (vista en perfil).....	31
Ilustración 12. Montaje final del sistema de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial a escala piloto.	30
Ilustración 13. Muestra de afluente y efluentes primer muestreo (02 de abril)	32

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación y características de los lixiviados acorde a la edad del relleno sanitario. ...	9
Tabla 2. Variables de respuesta.....	29
Tabla 3. Co -variables de respuesta.	29
Tabla 4. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk.....	48
Tabla 5. Pruebas estadísticas de comparación múltiple.....	48

ÍNDICE DE GRAFICAS

	Pag.
Grafica 1. Comportamiento del porcentaje de remoción de DBO_5 (mg/L)	33
Grafica 2. Comportamiento del porcentaje de remoción de DQO (mg/L)	35
Grafica 3. Comportamiento del porcentaje de remoción de SST (mg/L)	37
Grafica 4. Comportamiento del porcentaje de remoción de NO_3^- (mg/L)	39
Grafica 5. Comportamiento del porcentaje de remoción de N-NH_3^- (mg/L)	41
Grafica 6. Comportamiento del pH para el afluente y efluentes de cada configuración de siembra	43
Grafica 7. Comportamiento de la temperatura para el afluente y efluentes de cada configuración de siembra	45

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1. Tabla resumen de los resultados del análisis fisicoquímico	63
Anexo 2.Eficiencias de remoción de los sistemas	64
Anexo 3. Resumen estadístico descriptivo de las variables de estudio	65
Anexo 4.Comportamiento de la remoción de los parámetros en los humedales con su respectiva replica	66
Anexo 5. Climograma	67

LISTA DE ACRÓNIMOS

DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
HC	Humedal Construido
H_P	Configuración <i>Heliconia psittacorum</i> , <i>Cyperus haspan</i>
HCFSS	Humedal construido de flujo subsuperficial
HCFSSH	Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal
N-NH₃⁻	Nitrógeno amoniacal
NH₄⁺	Ion amonio
NO₃⁻	Nitrato
NTK	Nitrógeno Total Kendal
pH	Potencial de hidrogeno
P_H	Configuración <i>Cyperus haspan</i> , <i>Heliconia psittacorum</i>
PHPH	Configuración Aleatoria <i>Cyperus haspan</i> , <i>Heliconia psittacorum</i>
SST	Sólidos Suspendidos Totales

INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios son alternativas diseñadas para la disposición y manejo final de residuos sólidos donde se pretende reducir el impacto ambiental generado por los botaderos de basura a cielo abierto, no obstante esta alternativa presenta una gran problemática ambiental debido a la producción de lixiviados, los cuales se generan como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los desechos, procesos bioquímicos al interior de las células de los residuos y el contenido de agua de los propios desechos (Renou *et al.*, 2008).

Las características de los lixiviados son muy variables, lo que puede atribuirse a la interacción de muchos factores, como son la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, el diseño y la operación del vertedero, la tasa de precipitaciones, la hidrología del lugar, la compactación, el diseño de la cobertura, los procedimientos de muestreo y la interacción entre los lixiviados y el medio ambiente (Di Iaconi *et al.* 2011, Cortes *et al.*, 2013).

Se han establecido alternativas naturales para el tratamiento de lixiviados como los humedales construidos (HC), donde a partir de la emulación de procesos físicos, químicos, y biológicos, mejoran la calidad del agua residual que fluye a través de estos (Wittgreen & Maehlum, 1997). Además, esta tecnología presenta múltiples ventajas económicas debido a su bajo costo y operación en comparación con los tratamientos de tipo convencional. Los humedales artificiales son sistemas con bajo o nulo consumo energético, que producen pocos residuos durante su operación, con bajo impacto ambiental sonoro y con una buena integración en el medio ambiente natural (García *et al.*, 2006).

En sistemas de humedales artificiales operados en flujo subsuperficial horizontal aplicados al tratamiento de lixiviados se han reportado remociones aproximadamente del 26,7-98%, 51,67-64% y 17,3-88% para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), respectivamente (Yalcuk & Ugurlu, 2009; Delgado & Pino, (2015), Wojciechowska *et al.*,2010). Sin embargo presenta algunas desventajas: requiere grandes áreas para su construcción; los humedales de flujo horizontal tienen mayor riesgo de colmatación, por lo tanto, el agua a tratar debe tener poco material en suspensión. (Delgadillo, 2010)

En el presente trabajo de investigación se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DBO₅, DQO, SST, y Nitratos (NO₃⁻) en lixiviados del Relleno Sanitario “El Ojito” del municipio de Popayán, Cauca utilizando seis humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, a escala piloto, mediante tres configuraciones de siembras distintas utilizando las macrófitas; *Heliconia psittacorum* y *Cyperus haspan*.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disposición de residuos sólidos es un problema en constante crecimiento (Jha *et al*, 2011) causando daños a la salud humana y el ambiente (Vergara & Tchobanoglous, 2012). Es un tema de preocupación mundial debido al incremento poblacional y a los cambios de patrones de consumo (Marshall & Farahbakhsh, 2013). A nivel global en el 2001 se generaron 680 millones de toneladas de residuos sólidos en áreas urbanas (0.64 kg/hab/d), para el 2011 aumentó a 1300 millones (1.2 kg/hab/d) y se estima que al 2025 se generarán 2200 millones (1.42 kg/hab/d) (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

El manejo y la eliminación de residuos sólidos domésticos son problemas críticos en las áreas urbanas de América Latina. En Colombia se disponen 26.726 toneladas diarias de residuos sólidos, de los cuales el 71,6% es dispuesto en rellenos sanitarios y el resto de manera inadecuada en botaderos a cielo abierto, celdas, cuerpos de agua y quema; y en el departamento del Cauca menos del 60% de los municipios disponen sus residuos sólidos en sitios autorizados (SSPD, 2013).

En el municipio de Popayan desde 1986 se destino un lote para la disposición de los residuos sólidos y con el transcurso del tiempo, no se realizó con el estricto cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas en el diseño respectivo. La principal consecuencia de la no aplicación del Manual de Operación del Relleno Sanitario, fue convertir el lote en un sitio de botadero a cielo abierto sin ningún manejo técnico de control (SERVIASEO POPAYÁN S.A. E.S.P, 2014).

Dentro de los rellenos sanitarios se generan subproductos líquidos, consecuencia de la filtración del agua lluvia, de la descomposición de la materia orgánica y el agua que poseen los desechos (Campos, 2000). La presencia de agua permite una combinación de procesos físicos, químicos y microbianos para transferir contaminantes de los residuos sólidos en el líquido, resultando la formación de lixiviados (Lei *et al.*, 2007). Los líquidos circulan dentro del relleno, por lo que arrastran materiales suspendidos y disueltos, lo que hace que los lixiviados sean aguas residuales de alto valor contaminante (Campos, 2000).

La cantidad de lixiviado producida en un relleno sanitario está entre el 10% y 25% de la precipitación media anual del lugar. Desde el punto de vista de calidad los lixiviados presentan altas cargas de DQO (4000-10000 mg/L), DBO₅, Carbón Orgánico Total (COT) y ácidos grasos volátiles (AGV), cantidades considerables de materia orgánica y sustancias inorgánicas que tiene además gran variabilidad; entre ellos se encuentran metales pesados con su potencial efecto sobre los ecosistemas acuáticos, gran variabilidad de pH, alto contenido de sólidos totales (ST) y disueltos (SD), presencia de nitrógeno, como N-NH₄⁺ y alta concentración de cloruros (Álvarez, 2005).

Los lixiviados de residuos sólidos son considerados uno de los contaminantes líquidos de mayor impacto ambiental y dificultad de tratamiento, debido a la variabilidad de su composición, toxicidad y facilidad de percolación hacia aguas superficiales e incluso subsuperficiales. (Mosquera & Lara, 2012). En Colombia, un buen número de rellenos sanitarios presenta problemas recurrentes asociados con el tratamiento de lixiviados. (Noguera & Olivero, 2010). Puesto que es un líquido que contienen todos los mayores grupos de contaminación conocidos como son la contaminación por patógenos, por materia orgánica,

contaminación por nutrientes, y por sustancias tóxicas lo que hace dispendioso el tratamiento; todas las tecnologías conocidas para el tratamiento de aguas residuales se han probado para el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios, pero no se ha podido llegar a generalizaciones sobre la existencia de una tecnología óptima en todos los casos, pues las condiciones de cada sitio pueden variar e influenciar significativamente la selección. Se puede citar, por ejemplo, la disponibilidad de terrenos, de energía eléctrica, de suministros de químicos, de partes de repuesto, o de personal calificado para la operación (Giraldo, 2001).

2. JUSTIFICACIÓN

Para el tratamiento de lixiviados se ha hecho uso de diferentes técnicas y tecnologías convencionales mediante procesos anaerobios, aerobios y sistemas de membrana, que suelen ser costosos tanto en su etapa constructiva como operativa; por contrario los sistemas de humedales construidos, son considerados como alternativas de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (Yalcuk & Ugurlu, 2009), además de presentar buenos desempeños en la eliminación global de contaminantes como lo demuestran varios estudios (Mæhlum, 1995; Yalcuk & Ugurlu, 2009; Akinbile *et al.*, 2012). Los humedales construidos han sido considerados, desde la década de los años noventa, como una opción tecnológica apropiada para implementar en países en vía de desarrollo (Vymazal 2007); estos sistemas se han venido implementando como método de biorremediación en el tratamiento de lixiviados cuyo líquido contaminante genera mayor impacto que el de otros efluentes debido a la variabilidad de su composición, a su toxicidad y a la facilidad de percolación (Mosquera & Lara, 2012).

Los humedales construidos presentan tiempo de retención hidráulica elevado y grandes volúmenes de proceso, una de las características que los hace una tecnología viable para el tratamiento de lixiviados, pues están en la capacidad de amortiguar las fluctuaciones de caudal y evitan la acumulación de precipitados (Giraldo, 2001). La principal ventaja de los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, comparada con los otros tipos de humedales, es que presentan alto nivel de eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión, coliformes totales y fecales, Nitrógeno, y Fósforo (Vymazal 2009).

Los humedales construidos no han sido investigados con las suficientes experiencias en regiones tropicales y con especies vegetales autóctonas para determinar la incidencia de las condiciones de nuestras regiones y las características de los lixiviados, la mayoría de investigaciones se han realizado con plantas foráneas dejando así una oportunidad de aportar nuevo conocimiento sobre los humedales construidos con especies nativas de la región. (Ruiz, 2017)

La vegetación cumple un papel clave en el desempeño de los humedales, ya que contribuye a la reducción de carga contaminante a partir de procesos de fitoextracción, fitoestabilización, transpiración y rizofiltración (Kadlec, 1999). Por otra parte, el uso potencial de los humedales construidos con policultivos de plantas, ha indicado que factores tales como una adecuada selección, diversidad y relación entre las especies vegetales, juegan un papel importante en la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales (Akratos& Tsihrintzis, 2007) y lixiviados de rellenos sanitarios, a causa de la compensación temporal y espacial en crecimiento de la planta, la distribución de la raíz y la preferencia de nutrientes. (Mæhlum, 1995; Bulc, 2006).

Estudios recientes indican que los humedales sembrados con policultivos han demostrado diferencias significativas entre las muestras de agua de flujo de entrada y las muestras de agua en la salida (Madera *et al.*, 2015). Los resultados de la investigación ayudarán a indicar la influencia o no que tienen la configuración de siembra de dos especies para la remoción de materia orgánica en un humedal construido de flujo subsuperficial a escala piloto para el tratamiento de lixiviado, además de fortalecer los estudios sobre los humedales construidos para el tratamiento de una matriz líquida tan compleja como son los lixiviados.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica en un sistema de humedales construidos de flujos subsuperficial con policultivos de especies nativas en el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario “El Ojito” Popayán Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar la capacidad de remoción de DBO₅, DQO, SST, y NO₃⁻ en un sistema de humedales a escala piloto de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH).
- Comparar la eficiencia de remoción de materia orgánica según la configuración de siembra en los humedales plantados con policultivos de *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus*.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 LIXIVIADOS.

La presencia de agua permite una combinación de procesos físicos, químicos y microbiológicos para transferir contaminantes del residuo sólido en descomposición al líquido, resultando la formación del lixiviado (Renou *et al.* 2008). Los líquidos circulan dentro del relleno, por lo que arrastran materiales suspendidos y disueltos, ocasionando que los lixiviados sean aguas residuales de alto valor contaminante (Campos, 2000).

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen características contaminantes principales, es decir alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados, compuestos recalcitrantes y xenobióticos (Giraldo, 2001).

Tabla 1. Clasificación y características de los lixiviados acorde a la edad del relleno sanitario.

Característica	Joven/reciente	Intermedio	Viejo/maduro
Edad (años)	<5	5-10	>10
pH (Unidades)	<6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg.L-1)	>10000	4000-10000	<4000
DBO ₅ /DQO	0.5-1.0	0.1-0.5	<0.1
Compuestos Orgánicos	80% AGV	5-30% AGV+Ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
N-NH ₃ ⁻ (mg.L-1)	<400	N.A.	>400
TOC/DQO	<0.3	0.3-0.5	>0.5
NTK (g.L-1)	0.1-0.2	N.A.	N.A.
Metales Pesados(mg.L-1) ¹	>2 (bajo-medio)	<2 (bajo)	<2 (bajo)
Biodegradabilidad	Alta	Media	Baja
Color ²	Café-pardo-grisáceo	-	Negro-viscoso
Potencial redox ³	Bajo	-	Alto

Fuente: adaptado de: ¹(Kurniawan *et al.*, 2006), ²(Mendez *et al.*, 2009), ³(Renou *et al.*, 2008).

4.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES

4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia (Ramalho, 1993).

4.2.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se usa para medir el oxígeno equivalente para oxidar químicamente la materia orgánica mediante un agente oxidante fuerte, por lo general se usa dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura (Romero, 2002).

4.2.3 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Son la porción de sólidos que son retenidos por un filtro, de los cuales se desprenden los Sólidos Suspendidos Fijos SSF y los Sólidos Suspendidos Volátiles SSV, los primeros corresponden al residuo de los SST después de someterse a ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura específica; los SSV corresponden a la pérdida de peso por ignición (APHA 1992). La fracción volátil del total de sólidos biológicos en suspensión se usa como una aproximación de la masa biológica activa (Metcalf & Eddy, 1991).

4.2.4 Nitrato (NO_3^-)

El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. El predominio de la forma de nitrato en un agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno (EPA, 2000).

4.2.5 Nitrógeno amoniacal (N-NH_3^-)

Nitrógeno combinado en forma de amoníaco (NH_3^-) o amonio (NH_4^+), es uno de los componentes transitorios en el agua, debido a que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influido por la actividad biológica. Es un producto natural de la descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados (EPA, 2000).

4.2.6 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es un indicador de la acidez o basicidad del agua. Influye en la actividad microbiológica y en las tasas de reacción (Sperling, M & Chernicharo, 2003).

4.2.7 Temperatura

Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales debido a que muchos procesos biológicos dependen de ella, puesto que es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Crites, 2000).

4.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS.

Son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales artificiales también se denominan humedales construidos (García & Corzo, 2008). Estos sistemas tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar (Lahora, 2002).

Los humedales artificiales, tienen como función principal el tratamiento de las aguas residuales, en donde los contaminantes presentes son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural, entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana (Watson *et al*, 1989; Brix, 1993).

También han sido utilizados para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales como son aguas domésticas y urbanas, aguas industriales, lixiviados de rellenos sanitarios, aguas de drenaje en extracción minera, aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana, y tratamiento de fangos de depuradora. En la mayoría de los casos se utilizan como una etapa posterior al tratamiento convencional aplicado (Reed *et al.*, 1995; Kadlec *et al.*, 2000).

Los HC de acuerdo a su flujo se clasifican en:

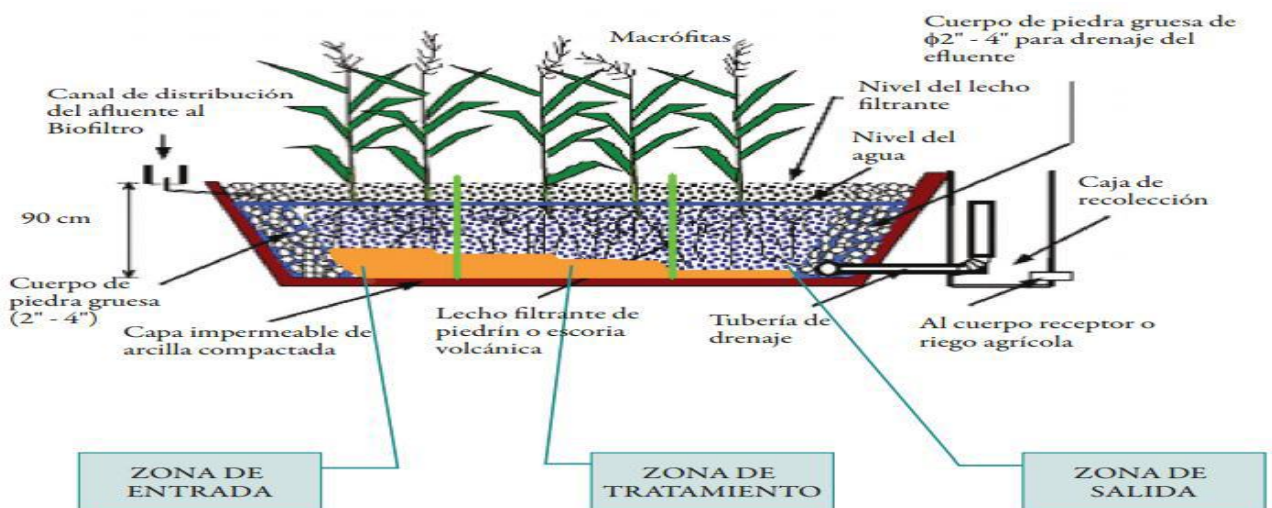
4.3.1 De flujo superficial

Son sistemas en los cuales el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las macrófitas. Este tipo de humedales se puede entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no mayor de 0,4m) (García, 2007).

4.3.2 De flujo subsuperficial

Los humedales con flujo subsuperficial (ilustración 1) estanques o canales con el fondo generalmente impermeable que disponen de una zona de entrada, salida y de tratamiento, sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembran las plantas emergentes. Las aguas residuales aplicadas a estos sistemas son generalmente pre-tratadas. (Vymazal & Masa, 2003).

Ilustración 1. Humedal Construido subsuperficial de flujo horizontal sembrado



Fuente: Madera *et al.*, 2013

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales (Vymazal & Masa, 2003).

4.3.3 De flujo subsuperficial horizontal

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. El agua ingresa al sistema por la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo de drenaje en la parte inferior opuesta. La profundidad del agua es de entre 0.3 y 0.9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO₅/m²/día (García & Corzo, 2008).

4.4 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES

4.4.1 Plantas

El tipo de vegetación más utilizada en los humedales artificiales son las macrófitas, y entre ellas un tipo en especial; los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra área emergente. Los helófitos más usados en esta depuración son: aneas (*Thypha*), carrizos, (*Phragmites*), juncos (*Juncus*), *Scirpus*, *Carex*, etc. Estas plantas son capaces de transportar oxígeno desde los tallos y hojas hacia sus raíces y rizomas, pero en los humedales de flujo subsuperficial la cantidad de oxígeno aportada es muy pequeña en comparación con la demanda de las aguas residuales, por lo que los procesos de eliminación de materia orgánica son básicamente anaerobios, afectando procesos de nitrificación-desnitrificación (Lahora, 2002).

Las macrófitas estabilizan la superficie del lecho, proporcionando buenas condiciones para la filtración, y en el caso de los sistemas con flujo vertical previniendo las obstrucciones, además de proporcionar área superficial para el crecimiento de los microorganismos adheridos. Contrariamente a lo que al principio se creía, el crecimiento de las macrofitas en los sistemas con flujo subsuperficial, no incrementa la conductividad hidráulica del medio en los sistemas que utilizan suelo (Brix, 1994).

4.4.2 Sustrato o medio de soporte

El medio filtrante de los humedales de flujo subsuperficial horizontal puede ser cascajo de piedra, grava, diferentes tipos de suelo o sustratos enriquecidos, que soportan el crecimiento de vegetación emergente. El agua fluye horizontalmente a través de las raíces de las plantas y el medio filtrante, luego el efluente tratado es recolectado en un canal de salida o tubería (Peña *et al.*, 2003).

El medio granular es importante debido a que ocurren procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. El medio granular debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula, donde los diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, debido a que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él, por lo cual durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo (García & Corzo, 2008).

4.4.3 Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal donde predomina la presencia del oxígeno liberado por las raíces de las plantas y del oxígeno llegado por difusión atmosférica, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominara la presencia de organismos anaerobios y anóxicos. Los principales procesos que realizan los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y la desinfección (Arias, 2004).

4.5 VEGETACIÓN ESTUDIADA

4.5.1 *Heliconia Psittacorum*

La *Heliconia* es un género monotípico de la familia Heliconiaceae monocotiledónea. Las especies de *Heliconia* se distribuyen en los bosques húmedos de tierras bajas de Centro y Sur América, así como en las islas del Caribe. Un pequeño grupo también se encuentra en algunas islas del Océano Pacífico. Cerca de 180 especies del género se han descrito (Cárdenas 2012).

Se utilizará este tipo de macrófita, por ser una especie eminentemente nativa del trópico con una alta abundancia de especies en Colombia (Maza, 2006), por la respuesta que dicha especie ha mostrado en trabajos sobre tratamiento de aguas residuales y lixiviados (Mosquera, 2010; Torres & Vásquez, 2010). Esta especie presenta condiciones agronómicas interesantes, como su alta resistencia a las características climáticas del país y al ataque de plagas y enfermedades, así como su amplia rusticidad; además presenta fácil propagación, largos periodos de floración y carácter permanente (Jerez, 2007).

4.5.2 *Cyperus Haspan*

Este tipo de planta pertenece a la familia Cyperaceae y al género *Cyperus*, tiene su origen en la cuenca del Rio Nilo en África tropical y se extiende hasta Egipto; entre sus características morfológicas se destaca su rápido crecimiento, hojas basales pequeñas y flores agrupadas en inflorescencias (Pérez, 2009).

Esta especie crece bien en el clima tropical y se encuentra entre las plantas más productivas de los humedales en procesos de biorremediación (Akinbile *et al.*, 2012). Por esta razón principalmente se experimentará con este tipo planta. Además, en estudios previos como el realizado por Akinbile *et al.* (2012) han reportado altas eficiencias de remoción en cuanto a varios parámetros fisicoquímicos como: turbiedad (39.3 a 86.6%), color (59.7 – 98.8%), SST (39.2 – 91.8%), DQO (60.8-78.7%), DBO₅ (29.8-53.8%), N-NH₃⁻ (59.8 – 99.7%), PT (33.8-67.0%) tratando lixiviados en el Relleno Sanitario Pulau Burung en Malasia con un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

4.6 MECANISMOS DE REMOCIÓN

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja (Delgadillo *et al.*, 2010).

4.6.1 Remoción de materia orgánica

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Delgadillo *et al.*, 2010).

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad en los sistemas de humedales de flujo superficial y a la deposición y filtración en los humedales de flujo subsuperficial, donde cerca del 50% de la DBO₅ aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible; el resto de la DBO₅ se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema (Lara, 1999).

4.6.2 Remoción de sólidos suspendidos

La remoción de los sólidos suspendidos y sedimentables presentes en las aguas residuales ocurre fundamentalmente en las unidades de pre-tratamiento, las cuales se instalan previamente de los humedales. Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual después del pre-tratamiento son removidos por sedimentación y filtración.

Estos procesos que son puramente físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes presentes en las aguas residuales (DBO₅, nutrientes, patógenos). La

remoción de los sólidos suspendidos es muy efectiva, tanto en los humedales con flujo libre como con flujo subsuperficial (Rodríguez, 2003). El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal (Delgadillo *et al.*, 2010).

4.6.3 Remoción de Nitrógeno

El nitrógeno influente en los humedales se encuentra básicamente como nitrógeno orgánico o amoniacal, con escasas cantidades de nitratos (Lahora, 2002). La remoción del nitrógeno puede ser muy efectiva en ambos tipos de humedales artificiales y los principales mecanismos de eliminación son similares para los dos casos. Aunque ocurre la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminada por esta vía (Lara, 1999). El cosechado frecuente de la vegetación incrementa el rendimiento en eliminación de nitrógeno, sin embargo, esta operación aumenta los costos de mantenimiento (Lahora, 2002).

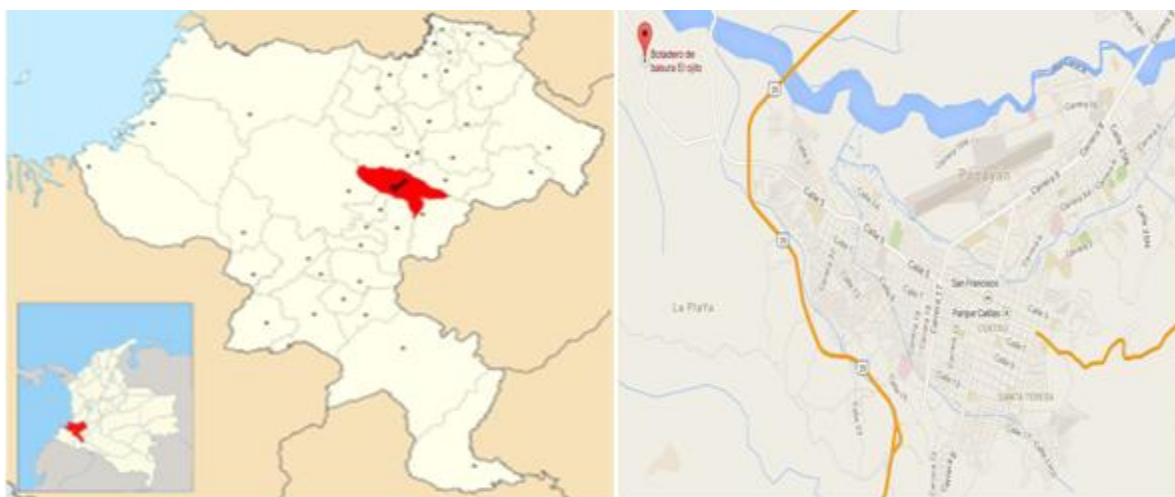
La mejor forma para remover nitrógeno en los humedales de flujo subsuperficial es la nitrificación biológica seguida por desnitrificación. La oportunidad de nitrificar existe cuando se tienen condiciones aeróbicas, se tiene la suficiente alcalinidad y la temperatura adecuada, y después de que la mayoría de la DBO₅ ha sido removida, para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible (García & Leal, 2006). La reacción de la desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gas. Esta reacción sólo ocurre en condiciones de anoxia y en presencia de materia orgánica, debido a que es realizada por bacterias heterotróficas (García & Corzo, 2008).

5. METODOLOGÍA

5.1 LOCALIZACIÓN

El relleno sanitario “El Ojito” está ubicado al occidente del municipio de Popayán vía a El Tambo en el departamento del Cauca, en las coordenadas 2°46’65”N 76°65’26”O. Posee un área aproximada de 13 hectáreas y se encuentra clausurado desde el mes de septiembre del 2014 el cual fue operado por la alcaldía municipal desde 1986 y por la empresa ServiAseo S.A E.S.P. desde el año 2011.

Ilustración 2. Ubicación relleno sanitario “El Ojito” Popayán, Cauca.



Fuente: Google maps

5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El montaje de las unidades a escala se realizó en las instalaciones de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” bajo condiciones ambientales del lugar, en este sitio se tiene una temperatura promedio 19°C, una humedad relativa de 81%, Radiación Solar 246.76) cal/cm².día. En la ilustración 3 se puede observar cómo se encontró el área de estudio.

Ilustración 3. Estado del montaje de las unidades a escala piloto



Fuente:Propia

En el lugar se encontraron seis sistemas de humedales de flujo horizontal subsuperficial (HCFSSH) a escala piloto los cuales pertenecen al GRUPO DE INVESTIGACIÓN CIENCIA E INGENIERÍA EN SISTEMAS AMBIENTALES “GCISA” de la Universidad del Cauca y fueron cedidos a préstamo para realizar la presente investigación. Los sistemas son de dimensiones 0,6 m de ancho, 1 m de largo y 0,6 m de altura, en fibra de vidrio; a la salida del humedal se cuenta con un acople que posee un tubo de PVC de 1 1/2”. Con esta tubería se garantizó un nivel del agua (23 cm), además cada unidad cuenta con dos tubos perforados de 2” de PVC sobre dos puntos centrales el cual permitió controlar el nivel del agua. Los 6 humedales fueron llenados con el medio de soporte (grava) hasta una altura de 30 cm.

Para el sistema de alimentación del lixiviado en los humedales, se adaptaron 3 canecas de 30 litros, las cuales fueron alimentadas con el lixiviado saliente de la laguna. Cada caneca distribuyó a 2 humedales a través de un sistema de válvulas de cierre lento (Ver ilustración 9 y 10).

5.3 ADECUACIÓN, REPARACIÓN Y LIMPIEZA DE LOS SISTEMAS

Para la adecuación se hizo el corte y retiro del material vegetal que había sembrado en los humedales; posteriormente se lavó y se desinfectó la grava; igualmente se hizo el lavado de los sistemas en fibra de vidrio y las canecas de distribución.

Fue necesario reparar las tuberías, piezómetros y cambiar las llaves de control de entrada y salida; por último, se revisó que la pendiente de los sistemas estuviera al 1 % y se procedió hacer nuevamente la disposición del medio de soporte.

Ilustración 4. Limpieza de los sistemas



Fuente: Propia

5.4 SIEMBRA Y ACLIMATACIÓN DE LAS PLANTAS

Se realizó un proceso de adaptación, el cual consistió en retirar las plantas de su medio (vivero), posterior a ello se traspasaron a un medio de soporte el cual contenía una mezcla de suelo/grava en una proporción 50/50 con el fin que se adaptaran las plantas al medio de soporte en los humedales, y se hizo el riego con una dilución agua/lixiviado de 75/25; a las dos semanas siguientes se realizó la mezcla 25/75 suelo/grava y el riego fue con una dilución de 50/50 de agua/lixiviado durante dos semanas; luego se sembraron en grava totalmente por un tiempo de una semana donde su riego fue del 25/75 de agua/lixiviado (ilustración 5); y por último ya se procedió a sembrar las plantas con grava y el riego con lixiviado al 100% (Ilustración 6). Se analizó cada semana las respuestas fisiológicas de las plantas debido al cambio del sustrato y el riego, con el que se determinó la capacidad de asimilación.

Ilustración 5. Aclimatación y siembra de las plantas



Fuente: Propia

Las plantas se sembraron en los humedales con los tipos de configuración P_H,H_P y una configuración aleatoria PHPH, en donde P es la especie Papiro enano (*Cyperus papyrus*) Y H la especie Heliconia Psittacorum (*Heliconia psittacorum*), la densidad de siembra fue de 8 plantas por humedal, 4 por cada especie, cada configuración tuvo su réplica bajo las mismas condiciones de dimensiones, pendiente del lecho, caudal y condiciones ambientales del lugar.

Ilustración 6. Configuraciones de siembra



Fuente:Propia

5.5 ARRANQUE DEL SISTEMA.

El sistema arrancó en modo Batch, el cual consiste en inundar el humedal con lixiviado sin flujo de entrada y salida, proceso que duró 3 semanas, la primera semana de este arranque se realizó una dilución de 50/50 de agua y lixiviado, se hicieron observaciones cada día para analizar el comportamiento de las plantas en su nuevo medio, luego se dejó 100% de lixiviado. Finalizado el modo Batch, se inicio con la respectiva alimentación a los sistemas cada 24 horas los 7 días de la semana (Ver ilustración 7), con un caudal de 10 mL por minuto aproximadamente, este caudal corresponde al caudal medio $Q/2$, este cálculo se realizó en base al modelo Garcia-Corzo, 2010 donde:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{e \times S \times h}{Q}$$

Donde;

- V: el volumen del humedal, en m^3 .
- Q: el caudal medio, en m^3/d .
- e: la porosidad, en tanto por uno. = 0,4 por estudio en lab. Suelo Universidad del Cauca.
- S: la superficie del humedal, en m^2 . = $0,6 m^2$
- h: la profundidad media del humedal, en m. = 0,23 m
- t: tiempo medio de residencia en el humedal, en días. = 2 días (método Reed).

Con estos datos se procedió a calcular el Q Y Q/2.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{e \times S \times h}{Q}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,4 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}^2 \times 0,23 \text{ m}}{2 \text{ dias}} = 0,0276 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q = 0,0276 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ horas}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 19.16 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \approx 20 \text{ ml}$$

$$Q = 20 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \text{ y } \frac{Q}{2} = 10 \text{ ml}$$

Durante todo el periodo de estudio se realizaron aforos diarios al caudal de entrada y salida del sistema, con el fin de garantizar el flujo continuo y mantener una lámina de agua de 0,23m.

Ilustración 7. Alimentación del sistema



Fuente:Propia

Ilustración 8. Aforo del caudal



Fuente: Propia

5.6 TOMA DE MUESTRAS.

La toma de muestras se realizó para las variables de respuesta DBO_5 , DQO, SST, y NO_3^- antes y después del tratamiento a través de las tres configuraciones de siembra de policultivos, además de la medición de co-variables como pH, Temperatura y Nitrógeno amoniacal.

Para las variables DBO_5 , DQO, SST, NO_3^- se realizaron 5 muestreos cada 15 días durante 3 meses, y para la co-variable nitrógeno amoniacal se realizaron 3 análisis cada mes; las muestras fueron analizadas en un laboratorio certificado.

En cuanto a las co-variables pH y temperatura fueron medidas periódicamente durante los meses del funcionamiento del sistema utilizando un potenciómetro.

Ilustración 9. Toma de muestras



Fuente:Propia

Tabla 2. Variables de respuesta.

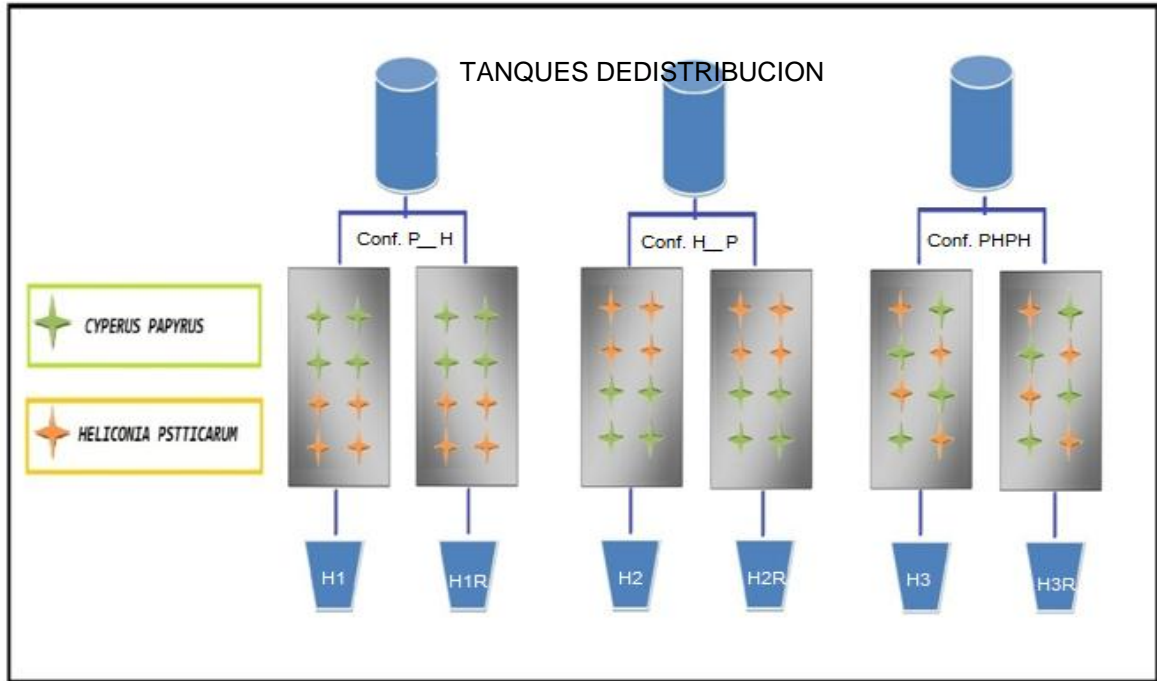
VARIABLE DE RESPUESTA	SITIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	CÓDIGO Standar dMethods
DBO₅ (DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO)	Laboratorio	Test de incubación 5 días	5210 B, ASTM D888-12 Método C
DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO)	Laboratorio	Reflujo Cerrado	SM 5220 C
SST (SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES)	Laboratorio	Secado a 103-105°C.	SM 4500-NO ₃ - B.
N-NO₃⁻	Laboratorio	Espectrofotometría Ultravioleta	SM 4500-NO ₃ - B.

Tabla 3.Co -variables de respuesta.

Co- VARIABLE DE RESPUESTA	SITIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	CÓDIGO StandardMethods
pH	In situ	Potenciómetro Oakton™ pH 11 Standard Portable Meter	-
TEMPERATURA	In- situ	Potenciómetro Oakton™ pH 11 Standard Portable Meter	-
N-AMONICAL(N-NH₃⁻)	Laboratorio	Destilación-Titolométrico	SM 4500- NH ₃ -N B, C.

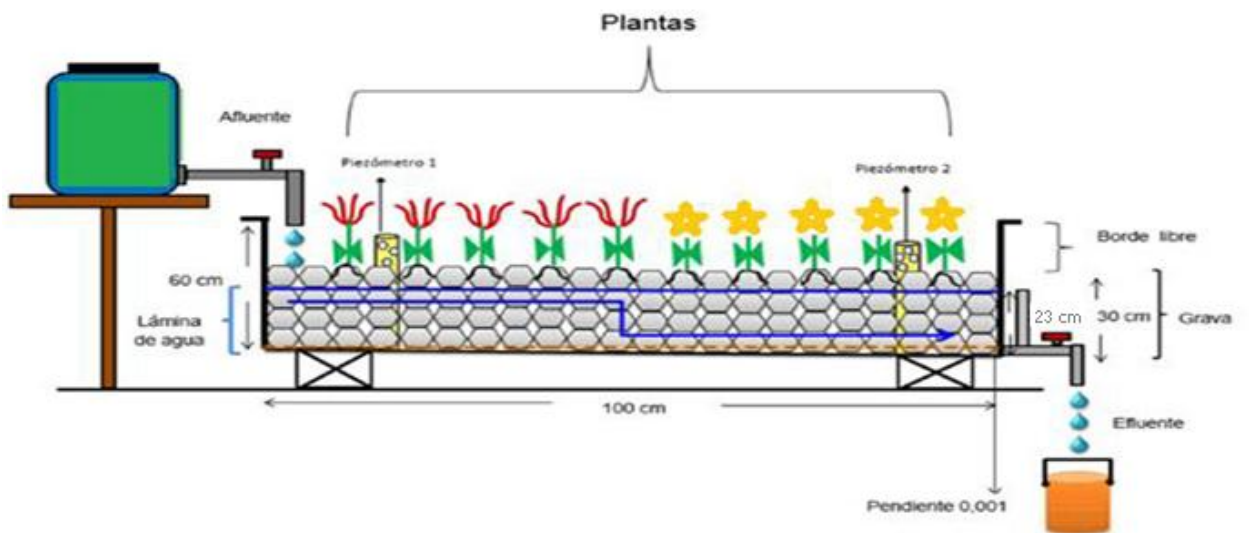
5.7 MONTAJE DE SISTEMAS DE HUMEDALES

Ilustración 10. Configuración de siembra (vista en planta)



Fuente: Propia

Ilustración 11. Humedal construido (vista en perfil)



Fuente: Fernández & Jiménez, 2015

Ilustración 12. Montaje final del sistema de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial a escala piloto.



Fuente: Propia

5.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El desarrollo del análisis estadístico se llevo a cabo mediante el programa SPSS versión 23 (Statistical Package for the Social Sciences) con una licencia de prueba y Microsoft Excel versión 2013; se procedió a realizar diferentes pruebas estadísticas con cada una de las variables de respuesta; pruebas estadísticas descriptivas que ayudan a organizar los datos numéricos, y a realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos, como la media, la mediana, rango, desviación estándar, asimetría y coeficiente de variación (Anexo 3); y pruebas de significación que sirven para realizar comparación de variables entre distintas muestras, cabe resaltar que antes de estas se precede a comprobar la normalidad en cada configuración, si existe normalidad se realizan pruebas paramétricas y en caso contrario pruebas no paramétricas.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante esta investigación se utilizó el lixiviado de la salida de la laguna de estabilización del relleno sanitario “El Ojito” el cual presentó un pH promedio de 8.03 y una DQO de 547,8 mg L⁻¹ promedio, clasificándolo como maduro o viejo (Tabla 1.), afectando la eficiencia de los sistemas de tratamiento de lixiviado, presentando bajas demandas de oxígeno, altos valores de pH y concentraciones elevadas de amonio; este último es el principal contaminante de dichos lixiviados (Kjeldsen et al., 2002), la suma de estos factores, más los operacionales, y externos hace que se obtenga una menor degradación de los contaminantes.

El experimento se llevó a cabo de manera comparativa entre una serie de tratamientos P_H (Papiro, Heliconia), H_P (Heliconia, Papiro), y PHPH (Configuración aleatoria Papiro, Heliconia), por medio de estas configuraciones se compararon las eficiencias de remoción para DBO₅, DQO, SST, NO₃⁻ y N-NH₃⁻. Teniendo en cuenta que el factor de tratamiento es la configuración de siembra y la unidad experimental está constituida por cada humedal.

Ilustración 13. Muestra de afluente y efluentes primer muestreo (02 de abril)

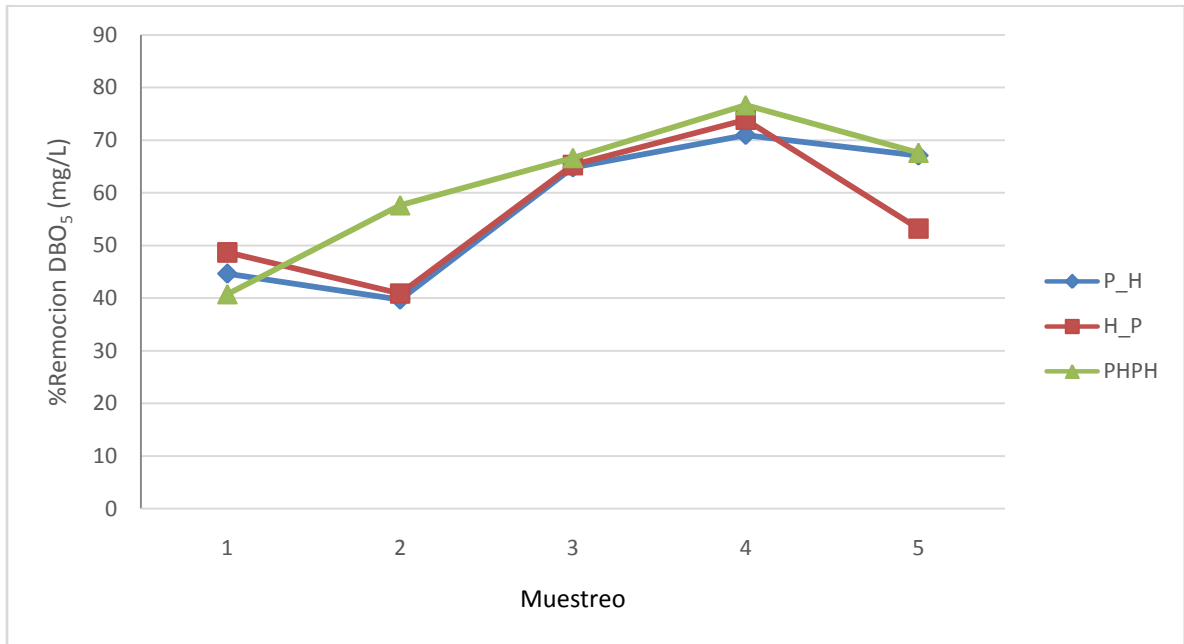


Fuente:Propia

6.1 EFICIENCIA REMOCIÓN MATERIA ORGANICA

6.1.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

Grafica 1. Comportamiento del porcentaje de remoción de DBO₅ (mg/L)



En la gráfica 1 se observa los diferentes porcentajes de remoción de cada configuración de siembra, presentando una remoción promedio de $57,43\% \pm 14,99$; $56,36\% \pm 13,94$ y $61,85\% \pm 14,90$ para la configuración P_H, H_P Y PHPH respectivamente, similares con los estudios hechos por Yalcuk & Ugurlu (2009) reportando remociones aproximadamente del 26,7-98% en sistemas de humedales artificiales operados en flujo subsuperficial horizontal aplicados al tratamiento de lixiviados.

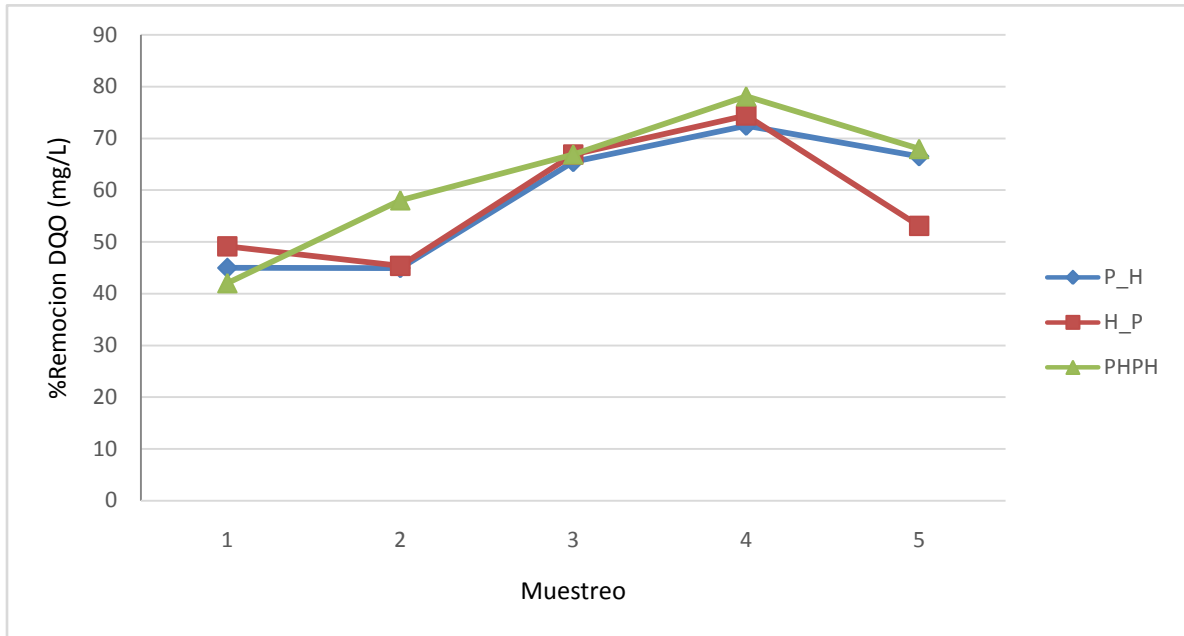
Además, se refleja una tendencia de remoción ascendente en el tiempo, con algunas pequeñas variaciones, estas indican que los sistemas aún no se han estabilizado; como también puede deberse a que la remoción de DBO₅ durante los primeros días de operación es muy rápida

y la remoción subsiguiente está más limitada y se cree que está influenciada por la producción de DBO₅ residual a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal (Lara, 1999). Adicional se observa una disminución pronunciada en el quinto muestreo, el cual se vio afectado por la variabilidad de concentración de DBO₅ a la entrada de los sistemas, debido a que como se observa en la tabla resumen de los análisis de laboratorio tuvo un incremento amplio en comparación a los anteriores muestreos (Anexo 1). La remoción de DBO₅ se puede dar por captación de las plantas, por la adsorción del medio, por la sedimentación y acción microbiológica (Axler, 2000; Davison, 2000; EPA 2000).

El porcentaje de remoción promedio para la DBO₅ fue mayor en la configuración PHPH en comparación con las otras dos, con una diferencia de 4,42 puntos porcentuales con la configuración P_H y 5,49 con la configuración H_P. Esto pudo deberse a la sinergia entre las funciones en respuesta a la diversidad biológica, debido a que la presencia de diversas especies logra proveer una mejor eficiencia en la distribución de la biomasa a nivel radicular y favorece una mayor cantidad de hábitats para diversas poblaciones microbianas que facilitan la degradación de contaminantes y la predación bacteriana (Karathanasis *et al*, 2003), procesos que ocurren en todo el sistema, a causa de la compensación temporal y espacial en crecimiento de la planta, la distribución de la raíz y la preferencia de nutrientes (Bulc, 2006).

6.1.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Grafica 2. Comportamiento del porcentaje de remoción de DQO (mg/L)



En la gráfica 2 se observa el comportamiento de los porcentajes de remoción de cada configuración de siembra, presentando una remoción promedio de $58,85\% \pm 13,98$ para la configuración P_H; $57,78\% \pm 13,27$ para la configuración H_P; y $62,60\% \pm 14,40$ para la configuración aleatoria PHPH; estos resultados de DQO obtenidos fueron similares a algunos estudios de tratamiento de lixiviados, como el reportado por Madera *et al.* (2013), que obtuvo una remoción promedio de DQO del 66 % tratando lixiviado sintético utilizando tres especies en policultivo; e igualmente el reportado por Delgado y Pino (2015) donde evaluaron dos macrófitas en monocultivo, obteniendo una eficiencia promedio de remoción de DQO del 57,84% tratando lixiviado del relleno sanitario “El Ojito” (Popayan, Cauca).

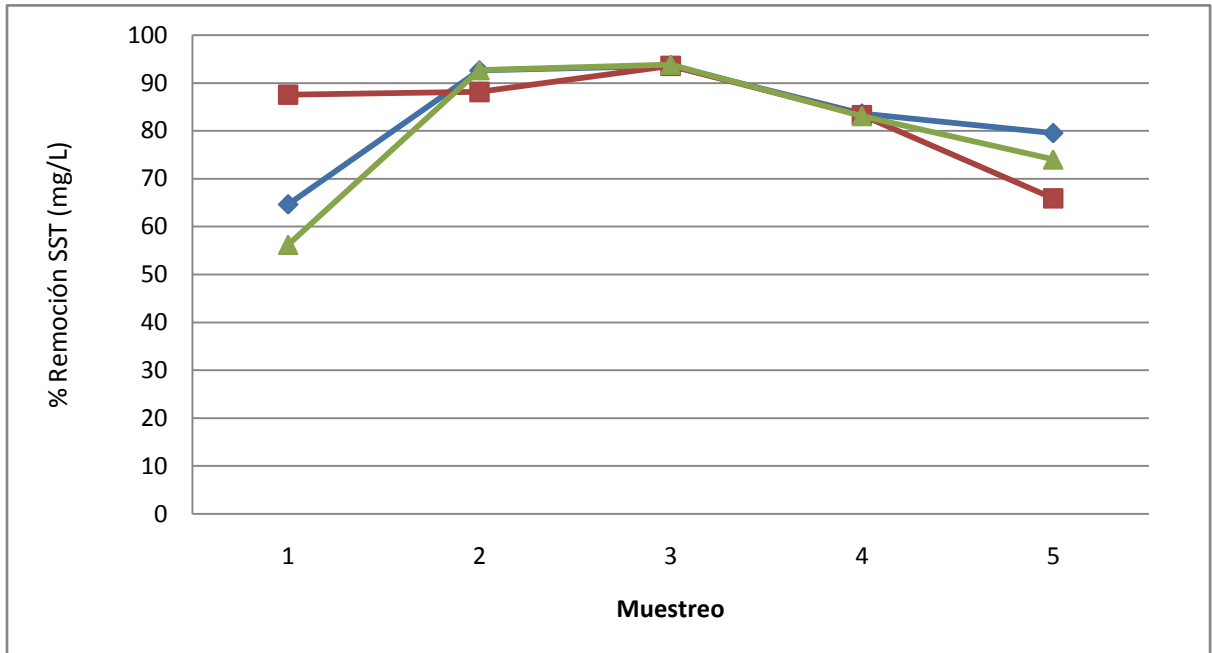
La remoción de DQO presenta una tendencia similar a la de DBO₅, las variaciones presentes pueden deberse adicionalmente a lo anteriormente explicado, la fluctuación en la eficiencia de remoción de la DQO se le atribuye a diversos factores como: la variabilidad en las concentraciones del lixiviado, la actividad metabólica o cometabolismo de las diferentes poblaciones microbianas al interior de los sistemas, a la composición del lecho de soporte (grava) que puede influir sobre otros mecanismos para la remoción, como son la adsorción y la precipitación, y también sobre las propias interacciones entre las variables fisicoquímicas de los humedales, el sustrato y la biopelícula (Cortés, 2014).

Esta disminución pronunciada en el quinto muestreo también puede deberse a que en este se presentó la temperatura más alta registrada durante todo el desarrollo del trabajo de investigación, este se corrobora con el climograma presentado en el anexo 5, es decir que se pudieron llevar a cabo procesos como la evaporación y evapotranspiración, procesos que concentran especialmente los componentes en el humedal, debido a que el volumen de agua disminuye y las concentraciones de nutrientes y carga orgánica se incrementan, fenómeno que pudo haber ocurrido para el caso de la DQO (Korkusuz *et al.*, 2004).

El porcentaje de remoción promedio para la DQO fue mayor en la configuración PHPH sobre las otras dos, con una diferencia de 4,48 puntos porcentuales con la configuración P_H y 3,75 con la configuración H_P, estudios previos demuestra que la riqueza de especies de plantas tiene efectos significativos en el funcionamiento del ecosistema (Hooper *et al.*, 2005).

6.1.3 Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Grafica 3. Comportamiento del porcentaje de remoción de SST (mg/L)



En la gráfica 3 se observa la variación de los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales para cada configuración de siembra, presentando una remoción promedio de $82,76\% \pm 13,56$ para la configuración P_H; $83,67\% \pm 10,94$ para la configuración H_P; y $79,98\% \pm 15,59$ para la configuración aleatoria PHPH. Los porcentajes de remoción obtenidos son similares a los encontrados en algunos estudios que indican que las remociones en humedales están en el rango de alrededor de $17,3-88\%$ (Wojciechowska *et al.* 2010) produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 10 mg/L (Londoño & Marín, 2009), como se puede verificar en el anexo 1, donde en la mayoría de los muestreos a la salida de los sistemas está por debajo de $12,2 \text{ mg/L}$.

La remoción de sólidos suspendidos en humedales construidos es muy efectiva y relativamente rápida, siendo suficiente un día para alcanzar altas remociones debido a que ocurre del 12 al 20% del área inicial del sistema. La remoción de sólidos suspendidos en los humedales de flujo subsuperficial se produce a través de la filtración del medio granular y por precipitación, los mecanismos que tienen lugar son la adsorción, proceso de equilibrio que consiste en la adhesión de moléculas de un material, encima de la superficie de otro absorbente, la hidrólisis y los mecanismos propios de la filtración (Ayllón, 2014).

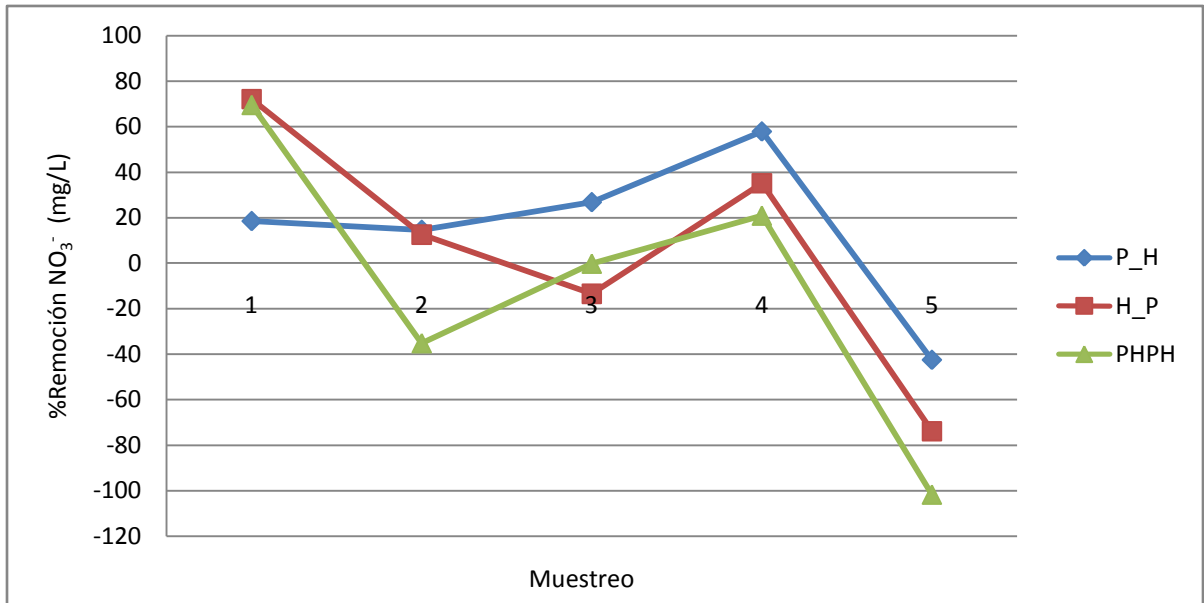
En la gráfica 3 se evidencia una tendencia ascendente en los primeros tres muestreos, con altas eficiencias de remoción, pero a partir del cuarto se presenta una disminución en el porcentaje de remoción, esto puede deberse al aumento poblacional de las macrófitas usadas en los sistemas, como lo indica Ayllon (2014), hay aumento de sólidos por la descomposición de rizomas y raíces en las zonas subterráneas e igualmente por la descomposición de algas, hongos y bacterias existentes en el medio; cabe resaltar que en temporada de invierno se alcanzan a presentar valores altos en la concentración de STT y que sumados con el volumen de agua elevado proporcionan una alta carga en este parámetro (Mendoza & López, 2004).

El porcentaje de remoción promedio para los SST fue mayor en la configuración H_P sobre las otras dos, con una diferencia de 0,92 y 3,69 puntos porcentuales con la configuración P_H y PHPH.

6.2 EFICIENCIA REMOCIÓN NITRÓGENO

6.2.1 Nitratos (NO_3^-)

Grafica 4. Comportamiento del porcentaje de remoción de NO_3^- (mg/L)



En la gráfica 4 se observa los diferentes porcentajes de remoción de nitratos de cada configuración de siembra, presentando una remoción promedio de $15,04\% \pm 57,49$; $6,49\% \pm 56,45$ y $-9,34\% \pm 70,69$ para la configuración P_H, H_P Y PHPH respectivamente. Los valores de eficiencia de remoción obtenidos son similares a los reportados por Cárdenas (2012), que utilizando humedales artificiales para el tratamiento de lixiviado sintético con dos especies en monocultivo, obtuvo una eficiencia media del 76%.

En la gráfica 4 también se observa gran variación de muestreo a muestreo, en los casos donde las remociones son negativas, indica que el porcentaje de nitratos aumenta dentro del sistema, es decir se genera un proceso de nitrificación de los compuestos amoniacales, pero este

proceso es limitado debido a las condiciones anaeróbicas típicas en los humedales; y cuando las remociones son positivas la eliminación de nitratos está relacionada más con el proceso de desnitrificación, este proceso se ve favorecido por condiciones anóxicas, presencia de materia orgánica y pH entre 7 y 8 (Vera *et al.*, 2010), lo que se ratifica con los valores obtenidos de pH que están dentro de este intervalo (Anexo 1). Esto puede deberse a la nitrificación y desnitrificación simultánea que pueden tener lugar en la matriz de raíces debido al desarrollo de micro-zonas aeróbicas y anóxicas (Nivala *et al.* 2007).

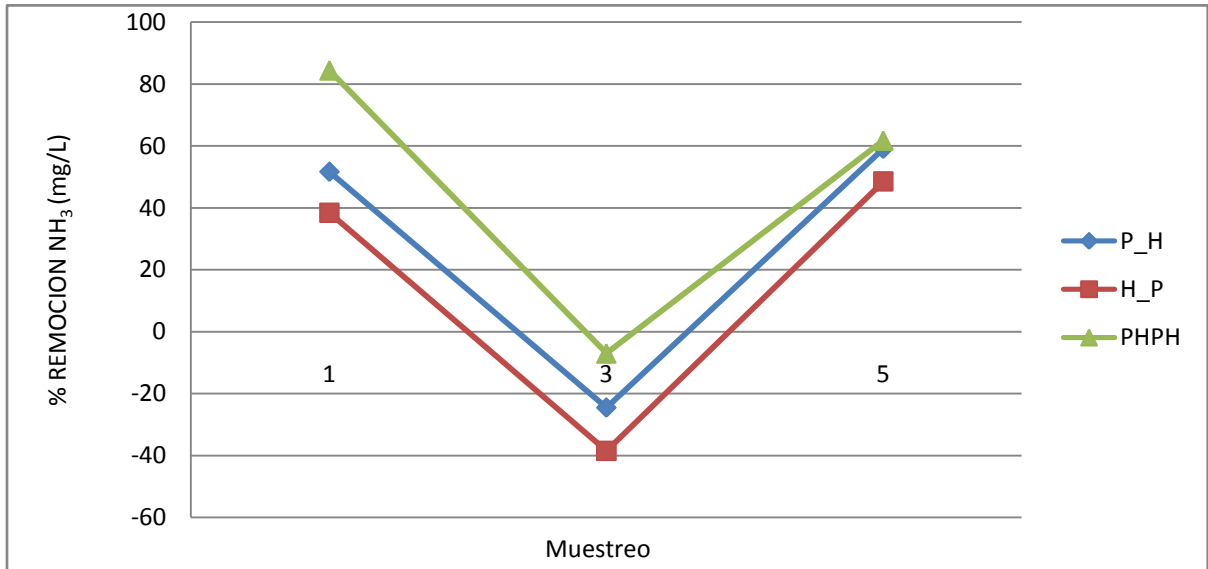
Los principales mecanismos responsables de la eliminación de nitrógeno en humedales construidos son: la asimilación por parte de la planta, la acumulación en el medio filtrante (asimilación microbiana), nitrificación-desnitrificación y el Anammox (Vymazal, 2007).

En la configuración PHPH la remoción promedio es negativa lo que puede indicar que en esta configuración prevalece la nitrificación, a diferencia de las otras dos configuraciones donde prevalecería la desnitrificación, a pesar de presentar eficiencias promedio bajas, entre estas dos la que mayor remoción presenta es la configuración P_H frente a la configuración H_P por 8.55 puntos porcentuales. La diversidad y la actividad de comunidades microbianas en la rizósfera varían según las especies macrófitas y las condiciones ambientales (Faulwetter *et al.*, 2009), esta puede ser otra causa por la que se presentaron fenómenos diferentes entre las configuraciones.

Estos resultados son aceptables al ser comparados con los reportados por Bulc *et al.*, (1997), donde las concentraciones de nitratos en el afluente fueron bajas y variaron desde (0.3-6.2 mg.L⁻¹) con eficiencias negativas y sólo una positiva de 17%.

6.2.2 Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃⁻)

Grafica 5. Comportamiento del porcentaje de remoción de N-NH₃⁻ (mg/L)



En la gráfica 5 se observa el comportamiento de los porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal para cada configuración de siembra, presentando una remoción promedio de 28,78%±41,92 para la configuración P_H; 16,16%±44,20 para la configuración H_P; y 46,37 para la configuración aleatoria PHPH; remociones relativamente bajas, como ya se ha demostrado en otros estudios, estos sistemas de tratamiento presentan ciertas limitaciones para lograr disminuciones considerables de nitrógeno, presentando un promedio de remoción del 46 al 50 % para el nitrógeno amoniacal (Vymazal, 2007). Es importante mencionar que el número de muestreos no fueron significativos para esta variable.

Se observa que en el muestreo 3 hay una disminución grande en la eficiencia de remoción, esto puede deberse a las fuertes lluvia que se presentó el día anterior y el día del muestreo, como se observa en el climograma (Anexo 5) se presentaron precipitaciones de 75 mm y 53 mm respectivamente; es decir que ocurre una dilución, reduciendo así las concentraciones,

este comportamiento es corroborado por Bulc (2006), el cual encontró que los valores del afluente y efluente son influenciados por la precipitación, reduciéndose debido al efecto de la dilución durante esta condición. Adicionalmente este fenómeno provoca el aumento de la velocidad del agua, lo que disminuye el tiempo de retención hidráulica de la masa de agua dentro de los humedales (Headley *et al.*, 2012).

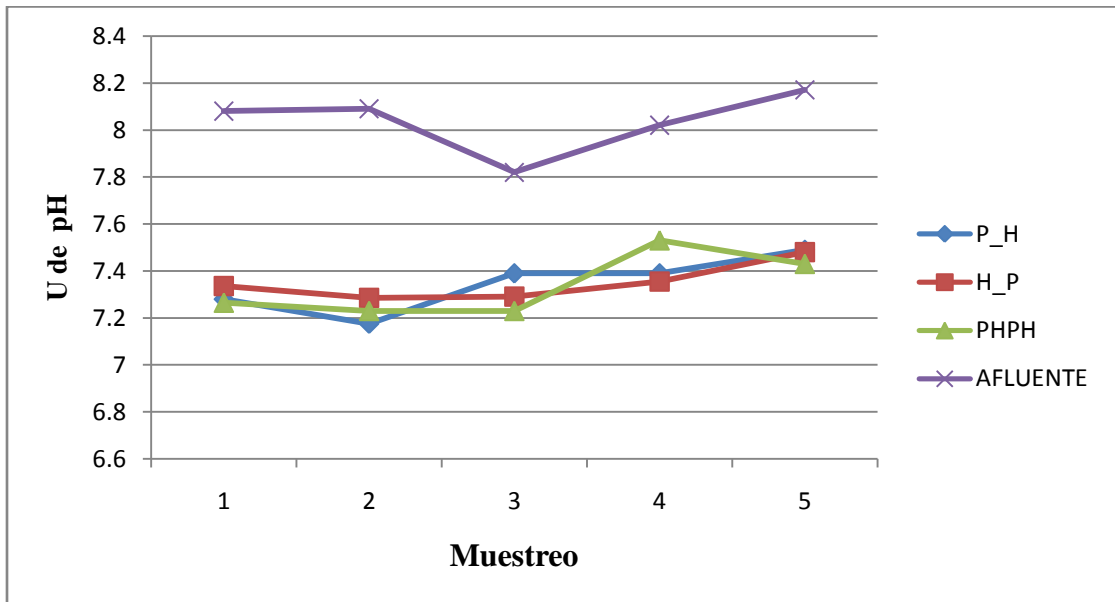
Entre las tres configuraciones, la que mayor eficiencia tuvo fue la configuración PHPH, con una diferencia de puntos porcentuales de 17, 59 y 30,21 con la configuración P_H y H_P respectivamente; La tercera configuración pudo tener mejor remoción por la diversidad de las plantas, como afirma Grace (2016) la riqueza de especies y composición es un determinante importante de los procesos y funciones de los ecosistemas, como la productividad, la retención de nutrientes, la actividad microbiana, las emisiones de gases de efecto invernadero, y la eliminación de nitrógeno.

La remoción del nitrógeno amoniacal puede ser un resultado colectivo de absorción de la planta y la volatilización, se cree que estos procesos sólo hacen una contribución menor; junto con la nitrificación, desnitrificación, inmovilizaciones en células microbianas y la adsorción sobre el soporte de los humedales construidos con una mayor contribución (Guangzhi, 2004).

6.3 CO-VARIABLES DE CAMPO

6.3.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

Grafica 6. Comportamiento del pH para el afluente y efluentes de cada configuración de siembra



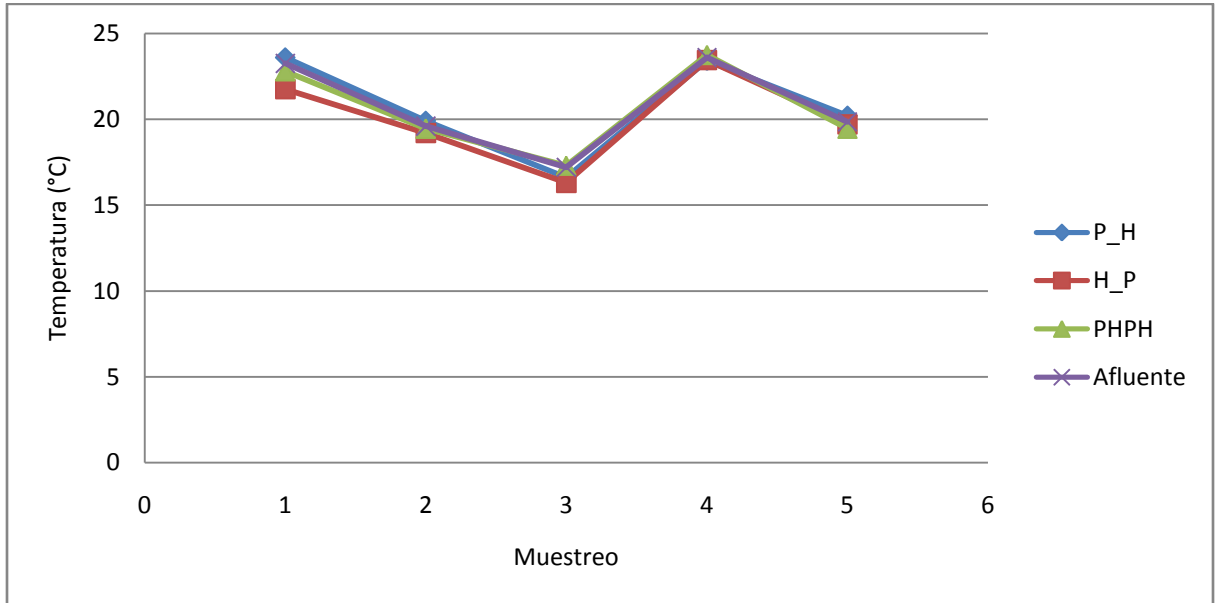
Los valores de pH obtenidos en el afluente y los efluentes del sistema se muestran en la gráfica 6, para el afluente el valor medio de pH obtenido fue de $8,04 \pm 0,12$, para los efluentes de la configuración P_H fue de $7,34 \pm 0,15$; para la configuración H_P fue de $7,35 \pm 0,12$; y para la configuración aleatoria PHPH $7,34 \pm 0,13$. Los valores promedio obtenidos de pH por las tres configuraciones está en el rango adecuado para el crecimiento bacteriano entre 4.0 y 9.5 (Metcalf & Eddy, 1991), esto puede indicar que en todos los sistemas existe un buen comportamiento respecto a la actividad microbiana.

Se presenta un pH ligeramente alcalino a la entrada, lo que indica que es un lixiviado maduro, justificado con la edad del relleno de aproximadamente 30 años, además Mosquera y

Lara (2012) reportan que un pH >7.5 es característico de rellenos sanitarios de alta edad; y a la salida de los sistemas se presenta un pH casi neutro, es decir que los valores de pH obtenidos está en el rango habitual para humedales construidos, como lo reporta Arias (2004) en sus estudios realizados, donde señala que los humedales construidos normalmente tienen un pH próximo al neutro o ligeramente ácidos.

6.3.2 Temperatura

Grafica 7. Comportamiento de la temperatura para el afluente y efluentes de cada configuración de siembra



En la gráfica 7 se muestra el comportamiento de la temperatura en el afluente y los efluentes de cada configuración de siembra, presentando un valor promedio para el afluente de $20,74^{\circ}\text{C} \pm 2,72$, para los efluentes la temperatura fue de $20,08^{\circ}\text{C} \pm 20,58$; $20,52^{\circ}\text{C} \pm 2,49$; $20,70^{\circ}\text{C} \pm 2,55$; para la configuración P_H, H_P Y PHPH respectivamente. Como se observa no se ven diferencias significativas entre el afluente y los efluentes de cada configuración, pero el valor promedio del afluente es ligeramente mayor en relación con los obtenidos en los afluentes, evidenciándose la inercia térmica de vegetación (Brix, 1994).

Las condiciones de temperatura en un humedal afectan tanto las actividades físicas como biológicas en el sistema. Una temperatura inferior a 10°C demora las reacciones responsables de la remoción de DBO_5 y de Nitrógeno; mientras que un aumento significativo de la misma va

acompañado de un aumento de evaporación, disminución de la solubilidad de Oxígeno, aceleración de reacciones químicas y biológicas (Londoño y Marín, 2009). Las reacciones mediadas microbialmente se ven afectadas por la temperatura, la respuesta es típicamente mucho mayor a los cambios en el extremo inferior de la escala de temperatura ($<15^{\circ}\text{C}$) que el rango más cálido ($20\text{-}35^{\circ}\text{C}$) (Kadlec y Wallace, 2009). Con los valores de temperatura obtenidos, se puede indicar que los sistemas presentan buenas condiciones para desarrollo del proceso biológico.

6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Para el cumplimiento del objetivo de comparación de la remoción de materia orgánica según la configuración de siembra, se realizan las pruebas de significancia para saber si desde el punto de vista estadístico las diferencias entre cada configuración son representativas y poder concluir cual es la más eficiente.

Como ya se menciono previamente a estas pruebas, se debe comprobar la normalidad, por lo que se realiza con la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 4) con un nivel de confianza del 95% y valor de significancia del 5%, la cual arrojo que los datos no provienen de una distribución normal para la primera configuración en la mayoría de los parámetros estudiados, debido a que en esta, no cumple la normalidad de su distribución y debe cumplirse en todas las configuraciones, no se pueden realizar pruebas estadísticas paramétricas; por ende se realizan pruebas no paramétricas, que no requieren pruebas previas para su desarrollo, como la prueba de Levene, la prueba de Kruskal-Wallis y el test de Duncan, las que permiten evaluar la igualdad de varianzas (homogeneidad), y la existencia o no de diferencias significativas entre las medianas y medias de remoción, respectivamente. (Tabla 5).

Tabla 4. Prueba de normalidad de Shapiro Wilk

	CONFIGURACIÓN DE SIEMBRA	SIG.
% REMOCION DQO	P_H	0,017
	H_P	0,314
	PHPH	0,055
% REMOCION DBO₅	P_H	0,006
	H_P	0,646
	PHPH	0,062
% REMOCION SST	P_H	0,072
	H_P	0,127
	PHPH	0,078
% REMOCION NO₃⁻	P_H	0,089
	H_P	0,667
	PHPH	0,253
% REMOCION N-NH₃⁻	P_H	0,026
	H_P	0,102
	PHPH	0,174

Tabla 5. Pruebas estadísticas de comparación múltiple

	Duncan		Kruskal Wallis		Levene
	Sig	(1-α)	Sig	(1-α)	Sig
%REMOCION DQO	0,471	0.529	0,703	0.297	0,942
% REMOCION DBO₅	0,436	0.564	0,628	0.372	0,827
%REMOCION SST	0,57	0,43	0,951	0.049	0,336
% REMOCION NO₃⁻	0,414	0.586	0,658	0.342	0,938
% REMOCION N-NH₃⁻	0,268	0.732	0,138	0.862	0,995

Al llevar a cabo la prueba de Kruskal-Wallis y el test de Duncan (Tabla 5) comparando la mediana y la medias de las tres configuraciones para cada uno de los parámetros estudiados, con un nivel de confianza de 95%; se obtuvo que no existe diferencias significativas entre las tres configuraciones, ya que se supera el valor de referencia 5% ($\alpha=0,05$); y la prueba de Levene

arroja que las varianzas poblacionales son iguales, lo que indica que los errores condicionales a lo que están expuestas las variables es constante a lo largo de las observaciones.

Cabe resaltar que el hecho que las pruebas estadísticas arroje que no hay diferencias significativas, no se puede determinar un argumento preciso entre las tres configuraciones y tampoco descartar los resultado obtenidos, puesto como expresa Gómez (2001) una distribución fuera de la normalidad conlleva al peligro de obtener conclusiones erróneas, donde se pierde mucha información, por lo que no se puede decir que sean iguales, ni que sean diferentes porque la probabilidad es menor del 95% ($1-\alpha$) (Tabla 5). Adicional el teorema del límite dice que si el tamaño de la muestra es suficiente, la distribución siempre tiende a ser normal, es decir que para esta investigación el número de muestreos pudo no ser representativo.

Por otra parte los coeficientes de variación obtenidos para los parámetros de DBO₅, DQO y SST estuvieron en el rango de 11-20%, es decir que hubo una precisión aceptable, y para los parámetros de NO₃- y N-NH₃- fueron mayor al 20%, lo que indica una precisión no confiable (Anexo 3), lo que también se refleja en la comparación de cada configuración de siembra con sus respectivas réplicas de los sistemas (Anexo 4), presentando diferencia en sus tendencias, contrario a lo que se espera, que hayan semejanzas, debido a que están bajos las mismas condiciones; esto refleja que hubo ocurrencia de factores externos que pudieron afectar los resultados, como el clima, operacionales, el tiempo de preservación en el envío de las muestras, y el aforo del caudal a la entrada y a la salida. Por otra parte están las variables internas que ocurren en los sistemas, actividad microbiana, adaptación de las plantas, tiempo de retención hidráulica y entre otros.

7. CONCLUSIONES

- Los humedales sembrados en esta investigación con policultivos de *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus*, mostraron ser sistemas alternativos para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios maduros bajo condiciones tropicales, logrando remociones de materia orgánica promedio de DBO₅ (58,55%), DQO (59,74%), y SST (82,14%) y de nitrógeno de NO₃- (4,06%) y N-NH₃- (30,44%).
- La configuración PHPH demostró ser más eficiente para los parámetros de DBO₅, DQO y N-NH₃ en relación con las otras configuraciones P_H y H_P, presentando valores medios superiores.
- La especie que mejor se adaptó fue el *Cyperus papyrus* en comparación con la especie *Heliconia psittacorum*, demostrando su alta capacidad de aclimatación, adaptación al tipo de agua y homogeneidad en su reproducción; debido a que esta última presentó daños en su fisiología, ocasionada por la alta toxicidad del lixiviado.
- Al comparar los valores máximos permisibles de la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos de tratamiento y disposición de residuos (lixiviados) de 800 mg O₂/L, 2000 mg O₂/L y 400 mg /L, para DBO₅, DQO y SST respectivamente, con los valores obtenidos de las concentraciones a la salida de los sistemas de humedales, indica el cumplimiento, puesto que se encuentran por debajo de dicha normatividad.

8. RECOMENDACIONES

- Se requiere de estudios con un período de operación de los sistemas más prolongado, para así poder determinar un patrón más estable de comportamiento de las eficiencias de remoción respecto al tiempo, como también tener más réplicas bajo las mismas condiciones para tener una mayor confiabilidad en los datos, ya que se busca obtener resultados significativos.
- Se recomienda hacer muestreos en puntos intermedios, en sistemas de mayor escala sembrados con policultivos, para así identificar si hay diferencias en la eficiencia de remoción entre cada especie, según su posición en la configuración de siembra.
- Realizar análisis microbiológico para identificar los tipos de microorganismos existentes en el humedal, debido a que estos son parte fundamental para la eficiencia de remoción de los contaminantes, degradación de materia orgánica y la transformación de compuestos nitrogenados y de fosforo a compuestos más simples; este análisis ayudaría a comprender mejor los procesos que se presentan en el interior de los sistemas.
- Para comprender la diferencia de eliminación de contaminantes de una macrófita a otra se debería analizar factores como: concentraciones de oxígeno disuelto por transporte a través de los rizomas, absorción de contaminantes, superficie de la biopelícula, aislante térmico, entre otros.
- Se sugiere que para futuros estudios se realicen análisis de nitrógeno total y nitrógeno Kjeldahl total (NTK), para entender mejor las transformaciones de nitrógeno, mediante cálculos de balance de masas usando concentraciones de amonio, nitrito y nitrato.

- Se recomienda realizar un estudio en los humedales artificiales acerca de la evapotranspiración y del balance hidrológico, puesto que estos afectan el tiempo de retención hidráulico real y la concentración de los contaminantes.

9. BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, M.(2005). Efecto de las aguas residuales y lixiviados en reactores de lodos activados a escala de laboratorio. Universidad de Medellín
- Akinbile, C., Yusoff, M., Ahmad Z. (2012). Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by cyperus haspan. *Journalwaste management*, 32, 1387-1393
- Akratos, C. & Tsihrintzis, V.(2007). Effect of temperature, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2),173–191.
- Arias, O. (2004) Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Trabajo de grado. Cataluña: universidad politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental.
- Ascuntar, D, Toro, A., Peña, M., Madera, C. (2009). Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions. *Ecological engineering*,35, 274-280.
- Axler, R. (2000). Residential subsurface flow treatment wetlands in northern Minnesota. M Wastewater treatment in tsunami affected areas of thailand by constructed wetlands. *Water sci. Technol emorias*. Proceedings of the 7th International Conference on wetland systems for water pollution control. Florida, EUA. 893-901.
- Ayllon, A. (2014). Determinacion del tractament primary optim per a aiguamolls construits de flux horitzontal. Tesis de especialización. Universidad Polictenica de Catalunya, España.
- Brix, H. (1994) Función of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water sci. Technol*, 29(4), 71-78.
- Brix, H. Koottatep, T., Laugesen, C. (2007). Wastewater treatment in tsunami affected areas of thailand by constructed wetlands. *Water sci. Technol*, (56), 69–74.

- Bulc, T. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological engineering*, 26(4), 365–374.
- Campos, I. (2000). Saneamiento ambiental. Primera edición. Editorial Universidad estatal a distancia Costa rica. 133-134.
- Cardenas, A. (2012). Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Proyecto fin de Master. Sevilla: Universidad de Sevilla..
- Contreras, A & Suárez, J. (2006). Tratamiento biológico de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista respuestas*. Universidad maría de Paula Santander. 1, 24.
- Corponariño. (2002). Sólidos suspendidos totales. *Retrieved january*, Recuperado de: <http://corponarino.gov.co/modules/wordbook/entry.php?entryid=367>
- Cortes, S., Madera, C. Peña, M; Salamanca, E., Lens, P. (2013). Eliminación de DQO, nitrógeno (TKN, NH₄⁺, NO₃⁻) y Cr (VI) en humedales construidos con policultivos tratando lixiviados de rellenos sanitarios a escala piloto. *Conexao academia*. revista científica sobre residuos sólidos. 3 (5). 13-18
- Cortés, A. (2014) Evaluación del desempeño de humedales construidos subsuperficial de flujo horizontal sembrados con especies nativas tropicales para la eliminación de Cr (VI) y Cd (II) de lixiviado de relleno sanitario. Trabajo de grado. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago de Cali.
- Crites, R.(2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá, Colombia
- Davison, L. (2000). On-site wastewater treatment by reed bed in the moist subtropics. Memorias. Proceedings of the 7th International Conference on wetland systems for water pollution control. Florida, EUA. 911-918

- Delgadillo, O., Camacho, A., Cerez, L., Andrade M. (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. *Cochabamba*, 1-17.
- Delgado, L. & Pino, U. (2015). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y plomo, en lixiviados del relleno sanitario “el ojito” del municipio de Popayán, cauca mediante humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Trabajo de grado. Universidad del Cauca, Facultad ingeniería civil, Programa Ingeniería ambiental. Popayan.
- Di, Iaconi C., Rossetti, S., Lopez, A. Ried, A., (2011), Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates. *Chemical Engineering Journal*, 168,1085-1092.
- EPA (2000). Constructed wetlands treatment of municipal wastewater. Manual. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio, E.U.A. 166.
- Fernández, C, Jiménez, Y. (2015). Evaluación de la conductividad hidráulica en humedales piloto de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “El Ojito” del municipio de Popayán. Universidad del Cauca.
- Faulwetter, J.L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M.D., Brisson, J., Camper, A.K., Stein, O.R., (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands. *Ecological engineering*,35, 987–1004.
- García, D., Leal D. (2006) Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del parque nacional natural amacayacu – amazonas. Trabajo de grado. Universidad de la Salle facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá D.C.
- García, J., Morato J., Bayona J. (2007). Depuración con sistemas naturales: humedales construidos. Recuperado de: http://eflus.com/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=154&Itemid=109

- García, J. & Corzo a. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 99
- Giraldo, E., (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista manejo integrado de residuos sólidos urbanos*. 44-50
- Gómez C, D. X., Segura S., J.(2008). Estudio de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domesticas: aplicación de modelos hidrodinámicos y macro cinéticos. Trabajo de Grado Ingeniería Química. Universidad del Valle. Cali-Colombia.
- Gómez, S., Vivo, M., Soria, E. (2001). Pruebas de significación en Bioestadística.*Revista de Diagnóstico Biológico*, 50(4).
- Grace. J., B. Grace, T.M. Anderson, E.W. Seabloom, E.T. Borer, P.B. Adler, W.S. Harpole, Y. Hautier, H. Hillebran, H.M. Lind, M. Pärtel. (2016). Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness.*Nature*, 529 ,390–39
- Guangzhi, S., Yaqian, Z., Stephen, A. (2004). Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*,115 (2), 189-197
- Hooper D., Hooper, F., Chapin III, J., Ewel, A. Hector, P. Inchausti, S. Lavorel, J.H. Lawton, D.M. Lodge, M. Loreau, S. Naeem, *et al.*(2005)Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.*, 75, 3–35
- Hoornweg, D., y Bhada-tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management.world bank urban development series, knowledgepapers 15.
- Jerez, E. (2007). El cultivo de las heliconias. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Habana, Cuba. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215858005>

- Jha, A., Singh, S., Singh, G., & Gupta, P. (2011). Sustainable municipal solid waste management in low income group of cities. *Tropical ecology*, 52 (1), 123 – 131.
- Kadlec, R. & Wallace, J. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological engineering*.
- Karathanasis, A.D., Potter, C.L., Coyne, M.S. (2003). Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering* 20, 157-169
- Kjeldsen, P., Barlaz M., Rooker, A., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T., (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32, 297-336.
- Korkusuz, E., Beklioglu M. & Demirel G. (2004). Treatment efficiencies of the vertical flow pilot-scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 28, 333-344.
- Kurniawan, T., Lo W., Chan G. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 129, 80-100.
- Lara, J. (1999) Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final, máster en ingeniería y gestión ambiental, universidad politécnica de cataluña, Barcelona.
- Lara, J., & Mosquera, Y., (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Tumbaga*. 7. 73-99
- Lahora, A. (2002) Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la EDAR de los gallardos (almería).
- Lei, Y., Shen, Z., Huang, R., Wang, W. (2007) Treatment of landfill leachate by combined aged-refuse bioreactor and electro-oxidation. *Water Research*, 41, 2417 – 2426.

- Londoño, L., Marín, C. (2009) Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
- Mæhlum, T., (1995). Treatment of landfill leachate in on-site lagoons and constructed wetlands. *Water science and technology*, 32(3), 129–135.
- Madera, C., Peña E., Peña, M., Rousseau, D., Lens, P. (2013). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 1–31.
- Madera, C., Peña, M., Peña E., Lens, P. (2015). Cr (VI) and COD removal from landfill leachate by polyculture constructed wetland at a pilot scale. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Marshall, R., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste management*, 33, 988–1003.
- Maza, V. (2006). Cultivo, cosecha y poscosecha de heliconia y flores tropicales. Medellín, Colombia. 220)
- Méndez., R., Castillo, E., Sauri, M., Quintal, C., Giacomán, G., Jiménez, B. (2009). Comparación de cuatro Tratamientos Físicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25, (3). 133-145.
- Mendoza, P., Lopez, V., (2004) Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario la esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio piloto de flujo ascendente. Universidad Nacional de Colombia.
- Metcalf & Eddy. (1999). Wasterwater engineering, treatment, disposal and reuse, 3rd Edition, Mc Graw-Hill International, U.S.A.
- Mosquera, J., Lara, J. (2012) Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revista *Tumbaga*, 1,(7), 73-99

- Nivala , J. Nivala, M.B. Hoos, C. Cross, S. Wallace, G.(2007) Parkin Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Sci. Total Environ.*, 380, 19-27
- Noguera, K. & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en latinoamérica: caso colombiano. *Acad. Colomb. Cienc.* 34 (132), 347-356.
- OPS (organización panamericana de la salud). (2005) Informe de la evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales en América latina y el caribe. D. C.
- OPS (organización panamericana de la salud), AIDIS (asociación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental), BID (banco interamericano de desarrollo). (2010) Informe de la evaluación regional de residuos sólidos urbanos en América latina y el Caribe.
- Delgadillo O. (2010). Alan Camacho Luis Fernando Pérez Mauricio Andrade. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales Disponible en: http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Peña, M., Van Ginneken, M., Madera, C. (2003) Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domesticas en zonas tropicales. *Ingeniería y competitividad*, 5 (1), 27-35.
- Ramalho, R. (1993) Tratamiento de aguas residuales. 2 ed. Barcelona, España. 91
- Reed, s. & Bastian, k. (1985). Wetland for wastewater treatment: an engineering perspective. (j. Godfrey, p.; kaynor, e.; pelczarski, s. Y benforado, ed.).New york: ecological considerations in wetland treatment of municipal wastewaters. Van nostrand reinhold company. 444–450.
- Renou, S., Givaudan J., Poulain S., Dirassouyan F., Moulin P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468–93

- Rodriguez, C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte (I y II). *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 24 (3), 35-48
- Rodriguez J., Pidre, J., Sánchez, L. (2007) Humedales artificiales. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Andalucía: CENTA.
- Romero, J. (2002). Calidad del agua. Bogotá, Colombia. *Ingeniería*, 2, p. 410.
- Romero, M., Colin, A., Sanchez, E., Ortiz, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Mexico.
- Ruiz, F. (2017). Uso de humedales construidos subsuperficiales de flujo horizontal sembrados con policultivos de especies nativas para la eliminación de DBO, DQO, NO₃- y metales pesados de lixiviados de relleno sanitario. Anteproyecto trabajo de grado Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago de Cali
- Serviaseo Popayán S.A. E.S.P. (2014) Plan de cierre, clausura y post clausura del relleno sanitario “el ojito” del municipio de Popayán.
- Sperling, M. y Chernicharo, C. (2003). Biological wastewater treatment in warm climate regions.
- SSPD (superintendencia de servicios públicos domiciliarios). (2013). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000) Folleto informativo de tecnologías de las aguas residuales. EPA Washington DC:832-F00-024.
- Vera A., Andrade C., Flores E., Núñez M., Cárdenas C., Morales E. (2010). Remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal construido en función del desarrollo de la macrófita *Typha Domingueensis* Pers. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*. 33 (2), 145 -152.

- Vergara, E., y Tchobanoglous, G. (2012).Municipal solidwaste and theenvironment: a global perspective. *Ann. Rev. Environ. Res.* (37) 277–309.
- Vymazal, J. (1995). Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic.. *Water Science and Technology*, 32, 357-364.
- Vymazal J; Brix H; Coope P, F; Green, M, B; Y Haberl R.(1998). Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, the Netherlands.
- Vymazal, J., Masa M. (2003).,Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478–490.
- Vymazal, (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *The Science of the total environment*, 380(1-3), 48–65.
- Vymazal, J. (2009). The use of constructed wetlands with horizontal subsurface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35, 117.
- Vymazal, J., & Masa M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Water Sci Technol.* 48(5). 143-8.
- Vymazal J. & Kröpfelová L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. *TheScience of the total environment*, 391.
- Watson, J.; Choate, K. y Steiner, R. (1989). Performance of conctructed wetland treatment systems at benton, hardin and pembroke, kentucky duringthe early vegetation establishment phase. In b. Cooper, f. Y findlater (ed.),Oxford.constructed wetland in water pollution control , 171–182.
- Wittgren, H. B. & Maehlum, T. (1997). Wastewater treatment wetlands in cold climates. *Water Science and Technology*, 35, 45-53.
- Wojciechowska E., Gajawska M., Obarska H.(2010). Treatment of landfill leachate by constructed wetlands: there case studies. *Polish J. of Environ. Stud.*,19 (3),. 643-650

Yalcuk, A. & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource technology*, 100, 2521-2526

ANEXOS

Anexo 1. Tabla resumen de los resultados del análisis fisicoquímico

Parámetro	Técnica analítica	Muestreo	Afluyente	Efluente						Limite (Res.631)
				H1 (P_H)	H1R (P_H)	H2 (H_P)	H2R (H_P)	H3 (PHPH)	H3R (PHPH)	
<DBO ₅ (mg O ₂ /L)	Test de incubación 5 días.	1	335	140	231	129	215	149	248	800
		2	262	162	154	155	155	100	122	
		3	331	128	105	118	112	117	104	
		4	267	75.9	79.1	68.4	71.2	62.3	62.4	
		5	548	189	172	237	276	203	152	
DQO (mg O ₂ /L)	Reflujo cerrado	1	514	212	354	196	327	229	367	2000
		2	442	254	233	246	237	182	189	
		3	509	188	164	180	157	171	166	
		4	430	113	124	107	113	94.1	94.1	
		5	844	292	273	367	425	309	232	
SST (mg /L)	Secado de los sólidos suspendidos totales a 103-105°C.	1	181	94	34	33	<12.2	78.5	80	400
		2	164	<12.2	<12.2	27	<12.2	<12.2	<12.2	
		3	180	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	
		4	63	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	<12.2	
		5	83	16.3	17.7	23.3	33.3	31	<12.2	
NITRATOS (mg NO ₃ ⁻ /L)	Espectrofotometría Ultravioleta	1	36	42.7	16	8.1	12	14	7.89	Análisis y reporte
		2	7.53	2.5	10.36	6.2	6.97	8.26	12.1	
		3	6.83	4.5	5.5	6.17	9.33	6.7	6.99	
		4	12	5.41	4.7	6.82	8.75	8.25	10.73	
		5	29.71	20.5	64.2	39.5	63.8	38.5	81.4	
NITROGENO AMONIA-CAL (mg NH ₃ -/L)	Destilación-Método Titulo métrico	1	255	103.3	143	110	204	74	5.58	Análisis y reporte
		3	143	188	168	204	192	154	152	
		5	632.19	266	251	320	331	233	251	
pH (U de pH)	Potenciómetro Oakton™ pH 11 Standard Portable Meter	1	8.08	7.24	7.32	7.34	7.33	7.32	7.21	6.0 -9.0
		2	8.09	7.12	7.23	7.33	7.24	7.26	7.2	
		3	7.82	7.52	7.2	7.28	7.3	7.24	7.25	
		4	8.02	7.47	7.31	7.17	7.54	7.54	7.52	
		5	8.17	7.43	7.55	7.51	7.45	7.48	7.38	
TEMPERATURA (°C)	Potenciómetro Oakton™ pH 11 Standard Portable Meter	1	23.6	21.8	21.7	22.3	23.3	23.3	23.2	Análisis y reporte
		2	19.9	19.2	19.2	19.2	19.7	19.4	19.8	
		3	16.6	15.6	17	17.2	17.4	17.5	16.9	
		4	23.4	23.3	23.6	23.9	23.3	23.8	23.4	
		5	20.2	20.1	19.3	19.8	19.1	20.1	19.6	

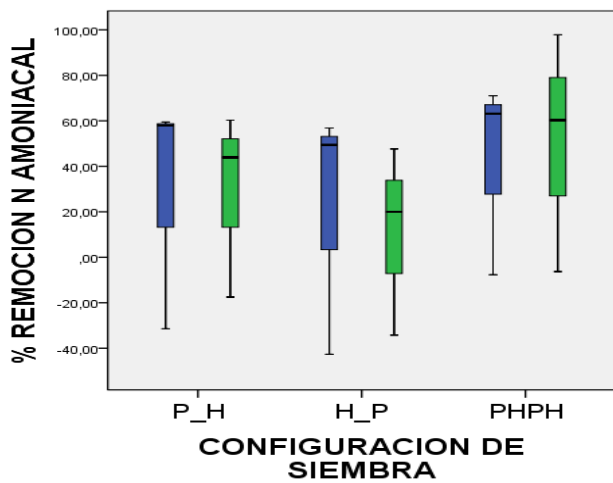
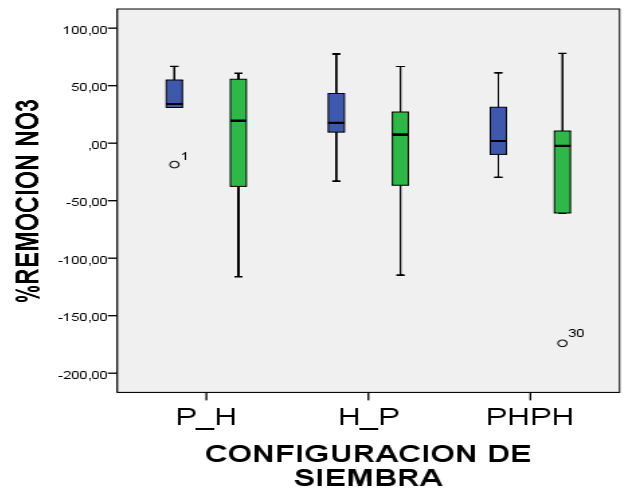
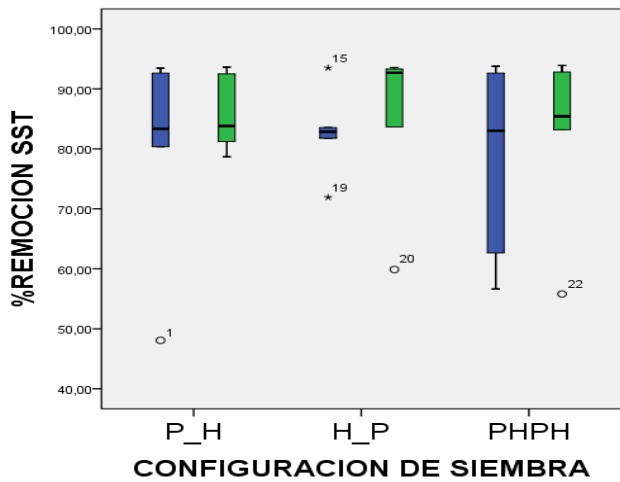
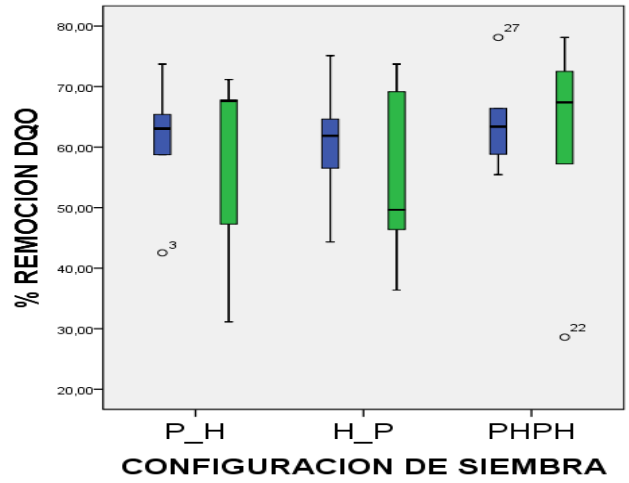
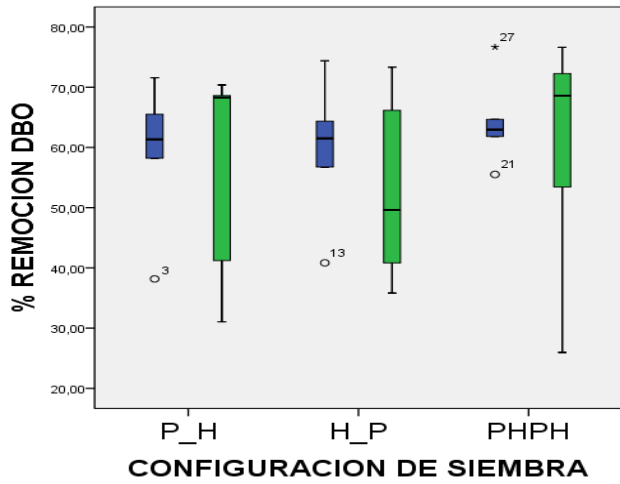
Anexo 2.Eficiencias de remoción de los sistemas

Parámetro	Muestreo	% REMOCION								
		H1 (P_H)	H1R (P_H)	PROMEDIO	H2 (H_P)	H2R (H_P)	PROMEDIO	H3 (PHPH)	H3R (PHPH)	PROMEDIO
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1	58,208	31,045	44,627	61,493	35,821	48,657	55,522	25,970	40,746
	2	38,167	41,221	39,695	40,840	40,840	40,840	61,832	53,435	57,634
	3	61,329	68,278	64,804	64,350	66,163	65,257	64,653	68,580	66,616
	4	71,573	70,375	70,974	74,382	73,333	73,858	76,667	76,629	76,648
	5	65,510	68,613	67,062	56,752	49,635	53,193	62,956	72,263	67,609
DQO (mg O ₂ /L)	1	58,755	31,128	44,942	61,868	36,381	49,125	55,447	28,599	42,023
	2	42,534	47,285	44,910	44,344	46,380	45,362	58,824	57,240	58,032
	3	63,065	67,780	65,422	64,637	69,155	66,896	66,405	67,387	66,896
	4	73,721	71,163	72,442	75,116	73,721	74,419	78,116	78,116	78,116
	5	65,403	67,654	66,528	56,517	49,645	53,081	63,389	72,512	67,950
SST (mg /L)	1	48,07	81,22	64,645	81,77	93,31	87,54	56,63	55,8	56,215
	2	92,62	92,5	92,56	83,54	92,68	88,11	92,62	92,8	92,71
	3	93,44	93,61	93,525	93,5	93,56	93,53	93,78	93,89	93,835
	4	83,33	83,81	83,57	82,86	83,65	83,255	83,02	83,17	83,095
	5	80,36	78,67	79,515	71,93	59,88	65,905	62,65	85,42	74,035
NITRATOS (mg NO ₃ ⁻ /L)	1	-18,611	55,556	18,472	77,5	66,667	72,083	61,111	78,083	69,597
	2	66,799	-37,583	14,608	17,663	7,437	12,550	-9,695	-60,691	-35,193
	3	34,114	19,473	26,794	9,663	-36,603	-13,470	1,903	-2,343	-0,220
	4	54,917	60,833	57,875	43,167	27,083	35,125	31,250	10,583	20,917
	5	31,000	-116,089	-42,545	-32,952	-114,742	-73,847	-29,59	-173,982	-101,784
NITROGENO AMONIACAL (mg NH ₃ ⁻ / L)	1	59,490	43,922	51,706	56,863	20	38,431	70,98	97,812	84,396
	3	-31,469	-17,483	-24,476	-42,657	-34,266	-38,462	-7,69	-6,294	-6,993
	5	57,924	60,297	59,110	49,382	47,642	48,512	63,14	60,297	61,720

Anexo 3. Resumen estadístico descriptivo de las variables de estudio

CONFIGURACION DE SIEMBRA		% REMOCION DQO	% REMOCION DBO ₅	%REMOCION SST	%REMOCION NO ₃ -N	% REMOCION N-NH ₃ ⁻
P_H	N	10	10	10	10	6
	Media	58.8488	57.4322	82.7638	15.0409	28.7803
	Mediana	64.2338	63.4201	83.5714	32.5569	50.9228
	Mínimo	31.13	31.04	48.07	-116.09	-31.47
	Máximo	73.72	71.57	93.61	66.80	60.30
	Rango	42.59	40.53	45.54	182.89	91.77
	Desv. Estándar	13.98081	14.98654	13.55622	57.48649	41.91699
	Asimetría	-1.031	-.888	-2.090	-1.508	-.934
C.V.	18.96%	20.94%	14.48%	86.06%	69.52%	
H_P	N	10	10	10	10	6
	Media	57.7763	56.3609	83.6673	6.4882	16.1607
	Mediana	59.1921	59.1222	83.5937	13.6630	33.8212
	Mínimo	36.38	35.82	59.88	-114.74	-42.66
	Máximo	75.12	74.38	93.56	77.50	56.86
	Rango	38.73	38.56	33.68	192.24	99.52
	Desv. Estándar	13.26628	13.93705	10.93809	56.44931	44.20080
	Asimetría	-.185	-.211	-1.225	-.994	-.682
C.V.	17.66%	18.74%	11.69%	72.84%	77.73%	
PHPH	N	10	10	10	10	6
	Media	62.6035	61.8507	79.9787	-9.3364	46.3745
	Mediana	64.8967	63.8044	84.2981	-.2196	61.7204
	Mínimo	28.60	25.97	55.80	-173.98	-7.69
	Máximo	78.12	76.67	93.89	78.08	97.81
	Rango	49.52	50.70	38.09	252.07	105.50
	Desv. Estándar	14.40668	14.90328	15.58961	70.69488	43.41301
	Asimetría	-1.453	-1.641	-.821	-1.381	-.534
	C.V.	18.44%	19.44%	16.60%	90.54%	44.38%
	Desv. Estándar	13.56922	14.30924	13.12009	60.58915	42.52372
	Asimetría	-.777	-.794	-1.269	-1.245	-.496
	C.V.	17.37%	18.66%	13.97%	77.60%	43.48%
TOTAL	N	30	30	30	30	18
	Media	59.7429	58.5479	82.1366	4.0642	30.4385
	Mediana	63.2267	62.3941	83.5937	14.1230	48.5123
	Desv. Estándar	13.56922	14.30924	13.12009	60.58915	42.52372
	C.V.	17.37%	18.66%	13.97%	77.60%	43.48%

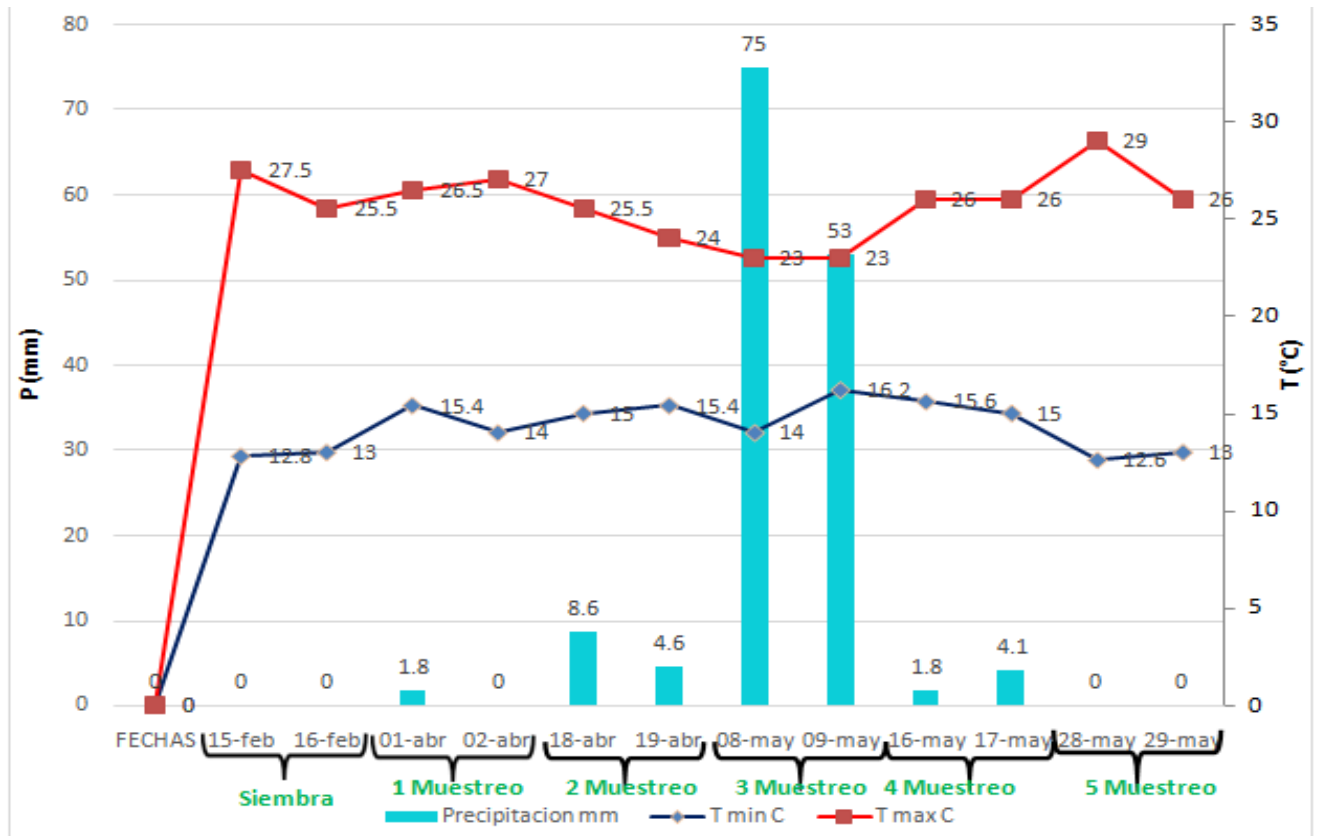
Anexo 4. Comportamiento de la remoción de los parámetros en los humedales con su respectiva replica



N° DE HUMEDAL

■ 1 Humedal
■ 2 Replica

Anexo 5. Climograma



Este climograma fue realizado con los datos meteorológicos de la estación del IDEAM que se encuentra en el aeropuerto Guillermo León Valencia, Popayan, Cauca.